

# 黔西北土法炼锌区水土流失的特点及防治对策

吴桂容<sup>1,2</sup>, 敖子强<sup>1</sup>, 林文杰<sup>3</sup>, 于俊义<sup>1</sup>, 黄永<sup>1</sup>, 江山<sup>1</sup>

(1) 厦门大学生命科学学院, 福建厦门 361005 2 贺州学院化学与生物工程系, 广西贺州 542800

3 韩山师范学院化学系, 广东潮州 521041)

**摘要:** 通过对土法炼锌区的土壤、废渣、植物、地表水和沉积物进行实地调查和采样分析, 发现土法炼锌区水土流失主要是由于含有  $\text{SO}_2$  和重金属的废气导致植被严重破坏、土壤裸露造成的; 水土流失同时导致了重金属的迁移扩散, 污染土壤中重金属可溶态比重大, 而废渣中重金属可溶态比重小, 主要随废渣一起流失。减少土法炼锌区水土流失的主要途径是恢复植被和利用工程措施将废渣固定。对于污染土壤来说限制因子是土壤 pH 值低, 可溶态重金属比重大, 主要对策是增加土壤的 pH 值, 选择耐酸性和耐重金属的树种恢复植被; 对于废渣来说限制因子是废渣持水保肥能力差, 重金属含量高, 及废渣本身的结构疏松, 主要对策是保持废渣的 pH 值不降低, 利用工程措施将废渣固定, 及改变土壤的结构来恢复植被; 废渣和污染土壤上的先锋植物醉色草 (*Buddlejia lindleyana*) 可作为首选来恢复植被。

**关键词:** 水土流失; 重金属固定; 植被恢复; 先锋植物

**中图分类号:** S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2010)06-0535-03

水土流失是我国土地资源遭到破坏最常见的地质灾害, 是指在水流作用下, 土壤被侵蚀、搬运和沉淀的整个过程。水土流失可使大量肥沃的表层土壤丧失, 据统计, 我国每年流失土壤约 50 亿 t, 损失 N、P、K 元素约 4000 多万 t。除乱砍滥伐、陡坡开垦以及樵采等人类直接作用造成水土流失之外, 采矿、选矿、冶炼的大规模掠夺性粗放型生产, 随意排放的废渣、废气、废液等间接作用, 也是导致水土流失原因之一<sup>[1]</sup>。黔西北是贵州铅、锌的主要产地, 且煤炭资源丰富, 为该地区炼锌提供了天然的条件。该地区有 300 多年的土法炼锌历史, 分布着上万个土法炼锌窑。经调查, 整个黔西北堆放的冶炼废渣为  $2.051 \times 10^7$  t, 造成 1200  $\text{hm}^2$  废弃地, 其中废渣堆放面积达 400  $\text{hm}^2$ 。在自然条件下, 污染土壤上的植被恢复极其缓慢, 而在废渣上几乎是寸草不生, 因而水土流失相当严重<sup>[2]</sup>。根据污染土壤和废渣不同的理化性质, 选择当地生长的先锋植物和耐性植物有针对性地进行植被恢复和重金属的固定, 旨在为防止水土流失和土地复垦提供基础数据和科学依据。

## 1 材料与方法

背景土壤、废渣和污染土壤样品经过风干后过 180 目筛。废渣和污染土壤采用 Tessier 连续提取法<sup>[3]</sup>, 将重金属分为 5 种形态: (1) 可交换态 ( $F_1$ ): 1 mol/L Mg( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub> (pH 值 = 7) 提取; (2) 碳酸盐态 ( $F_2$ ): 1 mol/L NaAc (pH 值 = 5) 提取; (3) 铁锰氧化物结合态 ( $F_3$ ): 0.04 mol/L  $\text{NH}_3\text{OH} \cdot \text{HCl}$  (溶剂

为 HAC) 提取; (4) 有机态 ( $F_4$ ): 0.02 mol/L  $\text{HNO}_3$  和 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  及 3.2 mol/L  $\text{NH}_4\text{Ac}$  提取; (5) 残渣态 ( $F_5$ ): 用  $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$  进行消解, 重金属元素用原子吸收分光光度法测定。

背景土壤、废渣和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>[4-5]</sup>, 具体的方法如下: 总碳 (TC) 采用重铬酸钾氧化法; 全氮采用凯氏法; 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。废渣和污染土壤样品 pH 值和电导率的测定采用 1:5 土液比, pH 计和电导仪测定<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土法炼锌导致水土流失的原因

导致水土流失的人为因素主要是乱砍滥伐、刀耕火种以及不合理的土地利用等, 而土法炼锌区水土流失形成虽包含以上因素, 但更多是矿山开采、冶炼等过程中“三废”污染引起的土壤、水、空气等环境介质重金属超标, 使植被减少, 土地生产力退化。土法炼锌是指利用本地丰富的氧化锌矿石、煤炭资源和熟练的制罐技术, 沿用传统的冶炼技术生产粗锌。冶炼过程中, 重金属主要以烟尘沉降方式污染周围土壤, 且污染范围比较广, 污染的另一个途径为堆放的废渣通过地表径流和地下径流污染废渣下方的土壤。表 1 表明, 污染土壤的 Pb、Zn 和 Cd 含量分别是 261、407、7.6 mg/kg, 都超过了土壤环境质量二级标准的限量, 其中 Cd 的超标倍数最大。该地区的背景土壤类型主要为山地黄壤和黄棕壤, 土壤 pH 值 (5.39) 呈酸性, 污染土壤的 pH 值 (4.5) 非常低, 为强酸性土壤, 主要是冶炼使用的高硫煤 (3% ~ 5%), 燃烧过程中产生的  $\text{SO}_2$  沉降导致的<sup>[8]</sup>。废渣主要由矿渣和煤渣两部分组成, 其中重金属主要集中在矿渣中, 含量由大到小为矿渣 > (矿渣 + 煤渣) > 煤渣, 废渣的铅、锌、镉的含量分别为 4.634、

收稿日期: 2010-03-04

基金项目: 贵州省科学技术基金 (编号: 20062014); 广西重点实验室研究基金 (编号: 桂科能 0704K002)。

作者简介: 吴桂容 (1970-), 女, 广西贺州人, 博士研究生, 副教授, 主要从事污染生态学研究。E-mail: hzwgr510@163.com。

通信作者: 敖子强, 博士研究生, 主要从事环境生态和污染生态学研究。E-mail: aoziqiang628@163.com。

表 1 土壤环境质量标准 (GB15618—1995) 和基质的重金属含量及 pH 值

基质	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	pH 值
一级 (≤)	35	100	0.2	自然背景
二级 (≤)	250	200	0.3	< 6.5
	300	250	0.6	6.5~7.5
	350	300	1.0	> 7.5
三级 (≤)	500	500		> 6.5
背景土壤	81	86	0.58	5.39
废渣	4 634	11 625	31.75	8.97
污染土壤	261	407	7.6	4.5

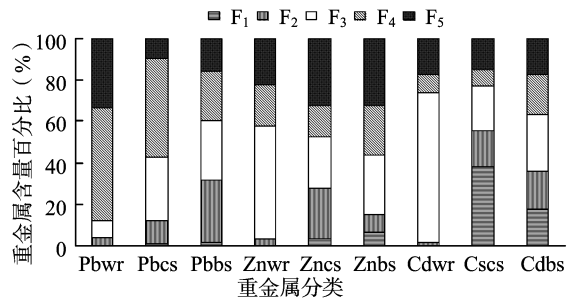
11 625 31 75 mg/kg 大大超过土壤背景值, 都超过 GB 15618—1995 的二类标准<sup>[7]</sup>。废渣呈碱性, 重金属的活性大大降低, 但是当 pH 值降低后, 废渣中的重金属就会释放出来, 成为潜在的污染源。

土法炼锌导致了严重的环境污染和生态破坏。土法炼锌区内植被和土壤遭到严重破坏, 甚至寸草不生, 造成水土流失、土壤肥力降低、土地生产力下降, 在严重影响自然景观和生态环境的同时, 废渣的堆积还压占大量的土地, 导致耕地减少、粮食减产。土壤表面和矿渣经雨水冲洗, 重金属通过地表径流和渗透作用进入水体, 在使水质变差的同时, 严重影响当地的生产和生活条件<sup>[1]</sup>。

### 2.2 土法炼锌区水土流失的特点

土法炼锌区的调查发现水土流失除一般危害外还伴随严重的重金属迁移扩散。这不仅对土壤、水、空气、植被、微生物等人类生存环境有毒害作用, 而且重金属还可能通过食物链进入人畜体内, 对人畜健康造成很大的影响。

废渣的浸出试验表明, Cu Pb Cd Zn As 的最大值分别为 0.025 0.271 0.006 5.3 058 0.303 mg/kg 均未超出《危险废物鉴别标准—浸出毒性鉴别》GB 5085.3—1996 标准限值。污染土壤重金属的可交换态的含量大, 容易被植物吸收利用。废渣中的铅、锌、镉的总含量分别为 (4 361~31 631)、(5 359~57 178)、(19.6~311) mg/kg 从废渣的形态分析来看, 绝大部分以铁锰结合态、碳酸盐结合态、残渣态为主, 生物有效态相对含量少 (图 1), 铅的有效态占总量的 0.03%~1.30%, 锌的有效态占总量的 0.03%~3.30%, 但其绝对含量很大, 大大超过土壤质量标准。从河流的重金属组成比来看, 河流重金属的主要集中在水体的悬浮物中, 是水中的溶解态重金属含量的数十倍、甚至上千倍。从重金属的来源来看, 水体中的重金属主要来源于堆积于河床的废渣以及因水土流失而导致的废渣进入河流, 通过地表径流进入河流的重金属所占的比例很小, 低于 10%。河流沉积物中的重金属大大超过土壤环境质量标准, 进入河流的重金属大部分转入固相, 结



注: wr—废渣, cs—污染土壤, bs—背景土壤; Pbwrr、Pbcsc、Pbbbs分别为前三者中Pb含量, Znwr、Znccs、Znncs为其Zn含量, Cdwr、Cdcs、Cdbcs为其Cd含量; F<sub>1</sub>—可交换态, F<sub>2</sub>—碳酸盐态, F<sub>3</sub>—铁锰氧化物结合态, F<sub>4</sub>—有机态, F<sub>5</sub>—残渣态

图1 基质重金属的赋存形态

合在悬浮物和沉积物中, 悬浮物的重金属在迁移过程中, 当其负荷量超过搬运能力时, 便进入沉积物。河流沉积物是重金属的重要载体, 随环境改变而不断释放出来, 是主要的重金属二次污染源<sup>[2]</sup>。

土法炼锌区水土流失治理难度大、治理费用高, 从而导致巨大的社会压力。因土法炼锌区水土流失的诱发因素具有特殊性, 使其治理技术、方法、手段明显不同, 它不能简单地通过封山育林、种植适生植物、先锋植物、乡土植物等达到恢复植被的目的, 而且更主要的是使土壤重金属固定, 避免迁移扩散, 这就无形中增加了水土流失的治理难度和治理费用。治理难度大是土法炼锌区水土流失的一个重要特点, 治理费用高则是不可忽略且必须面对的关键问题<sup>[1]</sup>。

### 2.3 植被恢复的限制因子

植物难以在污染土壤生长的主要原因是污染土壤的重金属含量高, 尤其是重金属的可溶态和可交换态的含量高, 是限制植物生长的重要条件, 其次是污染土壤 pH 值低 (4.5), 污染土壤出现酸化现象 (pH 值为 4.5)。酸性环境可使土壤加速溶出离子和盐分, 提高土壤重金属的生物有效性, 导致微生物生长环境受到破坏和酶失活<sup>[8-9]</sup>, 是植物生长的不利因子。对于大多数植物而言, 正常生长的 pH 值范围为 5~7, 小于 3 或大于 9 都会严重影响植物生长, 甚至植物不可能生长。碱性条件易引起微量元素 Fe、Mg、B 缺乏<sup>[9]</sup>。研究区废渣为强碱性 (pH 值为 8.97), 是植物生长的胁迫因子。土壤 EC 是表示盐分含量的重要特征, 与土壤盐分具有显著的相关性<sup>[10]</sup>。从表 2 可看出, 废渣的 EC 为 2.85 mS/cm, 表明其盐分远远大于背景土壤, 是植物生长的胁迫因子。土壤阳离子交换量是土壤的基本特性和土壤肥力的影响因素之一, 它直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分 (K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等) 的能力, 同时影响土壤的其他基本化学性质<sup>[11]</sup>。

表 2 土壤的基本理化性质

基质	阳离子交换量 (cmol/kg)	电导率 (mS/cm)	总碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
废渣	3.4	2.85	142	0.5	1.0	1.1	5.3	12.5	73.3
污染土壤	12.5	0.15	14.8	1.1	0.8	6.3	75.8	0.5	91
背景土壤	14.1	0.07	12.2	1.0	1.0	4.5	55.3	1.1	61.7

有机质在土壤营养中处于核心地位, 影响土壤的基本化学特性和植物生长。土壤有机质缺乏是植被重建的不利因

子。废渣的 TN 和碱解氮都表现出明显的缺乏, 其原因是: (1) 有机质含量低, TN 少, 有机态氮矿化作用产生的有效态

氮少; (2)在碱性条件下, N 不断地以氨的形式损失掉<sup>[9]</sup>, 进一步加剧了 N 的缺乏。一般而言, 在各种铅锌矿尾矿中, 重金属的毒性是植被恢复的主要限制因子之一<sup>[12]</sup>。本研究中, 废渣中 Pb、Zn、Cd 总含量最高, 但可交换态重金属含量最低, 甚至低于背景土壤, 这主要是因为碱性条件下, 重金属以固定态存在。土壤中重金属以多种形态存在, 只有生物有效态重金属才能进入植物体内, 因而重金属生物有效性指标能更好地表征土壤重金属向植物体内的转移趋势<sup>[13]</sup>。废渣中重金属可交换态含量低于背景土壤, 说明重金属毒性不是废渣废弃地恢复的主要限制因子。废渣上植被恢复的限制因子主要是盐碱胁迫、养分 (TN、碱解氮、TK) 缺乏。植物根系生长缓慢, 局限于很小的范围, 难以利用深层水分。在自然状况下, 植物根系暴露于高温干燥的表层, 吸收完土壤有效养分后, 植物因干旱而濒于死亡, 因而在自然条件下植被难以恢复。

#### 2.4 污染土壤和废渣上生长的植物

由于土法炼锌富含 SO<sub>2</sub> 和重金属的浓烟使周围的草木全无, 土法炼锌制止后, 恶劣的生境也只有少数几种植物存活。经过对污染土壤和废渣上生长的植物进行调查, 在污染土壤上生长的植物有醉鱼草 (*Buddleja lindleyana*)、柳叶苦苣菜 (*Ixeris gracilis*)、黄花菜 (*Artemisia annua*)、杜鹃花 (*Rhododendron simsii*)、木姜子 (*Litsa cubeba*) 和接骨草 (*Sambucus chinensis*) 等, 在废渣上生长的植物有醉鱼草、柳叶苦苣菜等。其中在污染土壤和废渣上生长得很好的植物醉鱼草, 其根系发达, 能够耐干旱和高含量的重金属, 是具有明显优势的先锋植物。醉鱼草种子较多, 繁殖速度快, 是防止污染土壤和废渣水土流失的植物首选。

### 3 结论与讨论

一般的水土流失主要是通过封山育林、种植适生经济作物、退耕还林、坡改梯、砌墙保土、发展生态农业等措施, 达到恢复生态环境、促进经济发展的目的。而土法炼锌区水土流失因诱发因素的特殊性及重金属带来的危害性, 除一般的水土流失治理目标, 要充分地考虑重金属污染的影响, 从而达到防止水土流失和控制重金属污染扩散的目的。黔西北土法炼锌已基本上得到制止, 从而基本上消除了冶炼过程中产生的大气污染, 消除了整个区域范围的污染物增加。根据目前土法炼锌区生态环境的破坏现状, 迫切需要解决的问题是防止水土流失, 保护现有的土地资源, 控制污染物的进一步扩散。

水体重金属污染的主要载体是固体悬浮物, 水体中的固体悬浮物主要来源于堆放在水体中的废渣和水土流失而带入的固体颗粒, 因而减少河流污染的途径是固定堆放的废渣, 以及通过生物和工程措施控制水土流失, 减少固体悬浮物进入

水体。

采用实用的植被恢复技术方法在裸露的生境上进行植被恢复, 从根本上遏止水土流失, 保护土地资源。根据污染土壤和废渣的理化性质采取针对性的措施, 对于污染土壤来说增施碱石灰, 提高土壤的 pH 值, 降低重金属的活性; 对于废渣来说, 主要采用工程措施将废渣固定下来, 在周围修建碱性沟等工程措施防止重金属的迁移扩散, 然后在上层客土和增施有机肥, 改良土壤为植物生长提供条件。

进行植被恢复技术的关键是植物种类的选择。由于土法炼锌形成的特殊生境, 进行植被恢复时最好选择当地的植物种, 对于污染土壤来说要考虑耐重金属和强酸性, 对于废渣来说要考虑耐干旱和贫瘠。通过调查, 发现污染土壤和废渣上生长的先锋植物醉鱼草具备了上述的条件, 其生长速度快, 繁殖能力强, 可以作为首选植被恢复种。

#### 参考文献:

- [1] 陈伟华, 宋建波, 苏孝良. 矿山石漠化——与喀斯特石漠化并存的一种石漠化类型 [J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(5): 39-44
- [2] 敖子强, 林文杰, 严重玲, 等. 土法炼锌区土壤重金属形态及其转化 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 564-569
- [3] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851
- [4] 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
- [5] 鲁如坤. 农业土壤化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000 24-196
- [6] 吴攀, 刘丛强, 杨元根, 等. 炼锌固体废渣中重金属 (Pb, Zn) 的存在状态及环境影响 [J]. 地球化学, 2003, 32(2): 139-145
- [7] 环境污染分析科研协作组. 环境污染分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1982 25-26
- [8] 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
- [9] 黄铭鸿. 环境污染与生态恢复 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 148-155
- [10] 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
- [11] 刘世全, 蒲玉琳, 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
- [12] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, et al. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques [J]. Chemosphere, 2002, 47: 1103-1111.
- [13] 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 等. 替代黑麦幼苗测定土壤中重金属生物有效性的研究 [J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 337-340