

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.06.005

粤东铅锌尾矿三种优势植物对重金属的吸收和富集特性研究

刘惠娜, 杨期和*, 杨和生, 李姣清, 刘德良

(广东省嘉应学院, 广东 梅州 514015)

摘要: 为探讨铅锌矿废弃地优势植物在重金属污染土壤植物修复中的应用潜力, 利用野外采样分析法, 从粤东梅县丙村铅锌尾矿区采集其三种优势植物类芦、黄荆、盐肤木的根、茎、叶和土壤样品, 测定和分析 Pb、Zn、Cu、Cd 四种重金属含量。结果表明: 该矿区土壤污染严重, Pb、Zn、Cd 含量远超土壤环境质量的三级标准, Cu 超出二级标准; 根际土壤和非根际土壤重金属含量均为 $Pb > Zn > Cu > Cd$, 但根际土壤的重金属含量显著低于非根际土壤; 这三种植物对 Pb、Zn、Cu 的转移系数大于 1.0, 对 Cu 的富集系数最高, Pb 最小, 但对四种重金属的富集系数均小于 1.0, 均未达到超富集植物临界含量标准。三种植物为该矿区的优势植物, 说明它们对土壤的重金属污染有很强的耐性, 虽然并非典型的超富集植物, 但对污染土壤仍有较好的修复效果。

关键词: 铅锌尾矿; 富集植物; 重金属污染; 植物修复

中图分类号: X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2012)06-0743-07

Characteristics of absorption and accumulation of heavy metals for three dominant plants in Pb-Zn mine tailings eastern Guangdong

LIU Hui-Na, YANG Qi-He*, YANG He-Sheng,

LI Jiao-Qing, LIU De-Liang

(Jiaying University, Meizhou 514015, China)

Abstract: The root, stem, leave samples of three dominant plants, *Neyraudia reynaudiana*, *Vitex negundo*, *Rhus chinensis*, and soil samples were collected from Bingcun Pb-Zn mine tailings in Meixian County, Eastern Guangdong. The contents of Pb, Zn, Cu, Cd were then measured and analyzed comparatively. The results were as followed: the soil pollution in this wasteland was serious, the Pb, Zn and Cd contents were far more than the environmental quality standard for Grade III, Cu content also exceeded the standard for Grade II. The descending order of heavy metals in non-rhizosphere soil and rhizosphere soil was both $Pb > Zn > Cu > Cd$, but the heavy metal contents in rhizosphere soil were significantly lower than that in the non-rhizosphere soil. The transfer coefficients of three plants for Pb, Zn, Cu were greater than 1.0, and the enrichment factor of Cu was the highest, while Pb was the minimum, but the enrichment factors of four heavy metals were all less than 1.0, so these three plants did not meet the standards of critical content of hyperaccumula-

收稿日期: 2012-03-16 修回日期: 2012-06-23

基金项目: 广东省自然科学基金(815140150100003, 10151401501000000); 广东省科技计划项目(2008B030302003, 2010B031800011, 2010B031900045); 广东省高等学校科技创新重点项目(cxzd1132); 人才引进专项[Supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province(815140150100003, 10151401501000000); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(2008B030302003, 2010B031800011, 2010B031900045); Key Project of Scientific and Technological Innovation in Guangdong Institutions of Higher Learning (cxzd1132); Talent Introduction Special Project of Colleges and Universities in Guangdong Province]

作者简介: 刘惠娜(1973-), 女, 广东平远人, 硕士研究生, 高级实验师, 主要研究方向为矿区植被恢复, (E-mail) lhn@jyu.edu.cn.

* **通讯作者:** 杨期和, 男, 博士, 教授, 从事植物生理生态学及恢复生态学研究, (E-mail) yangqh@jyu.edu.cn.

tors. These three plants were the dominant plants in this wasteland, indicating that they had a strong tolerance to the heavy metal pollution in the soil, although they were not typical hyperaccumulator, but there was still good effect on remedying contaminated soil.

Key words: Pb-Zn mine tailings; hyperaccumulator; heavy metal contamination; phytoremediation

铅锌尾矿是粤东产量最大的工业固体废弃物之一。这些废弃物的排放、堆存破坏和占有大量的土地资源,导致区域(表层土壤、地表水、地下水)重金属污染、土地退化、作物减产和品质下降,危及人体健康和矿产业的可持续发展(Baker & Walker, 1989; 周启星等, 2004)。在这些废弃地上重建植被进行植物修复,是将污染减少到最低限度的重要措施之一。在自然界中,存在着对重金属具有富集能力和耐性特征的植物种类,目前已报道的超富集植物已有 400 余种,但大多数超富集植物有生长缓慢、植株矮小和生物量低等缺点。因此,寻找理想的超富集植物仍是污染土壤植物修复技术的关键之所在(储彬彬等, 2010; 崔晓艳等, 2010)。

目前筛选出的超富集植物绝大多数是利用野外采样分析法,即从重金属污染较重的矿山附近地区采集植物及土壤样品,测定其对重金属富集和转移能力,从而确认其是否为超富集植物(崔晓艳等, 2010; 路畅等, 2010)。本文旨在通过分析研究铅锌矿废弃地优势植物对重金属的吸收富集特点,探讨其在重金属污染土壤植物修复上的应用潜力,以期为粤东的重金属污染土地的植被重建和生态修复提供科学依据和基础材料。

1 材料与方法

1.1 调查地自然概况

梅县丙村铅锌尾矿(116°16'34" E, 24°21'44" N)占地面积约 4 hm², 闲置时间约 30 a。该区域属亚热带季风气候, 年均气温 21.2 °C, 降雨量 1 472.9 mm, 相对湿度 78%, 无霜期 306 d。铅锌尾矿地为一阶梯状坡地, 坡顶平台为废弃的洗矿池和矿渣堆放处, 沿斜坡阶梯平台可分为 6 层, 从上至下分别称为第 1~6 个小区, 分别用 L1、L2、L3、L4、L5、L6 表示(图 1)。在此废弃地生长的植物主要有类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、节节草(*Equisetum ramosissimum*)、莎草(*Cyperus rotundus*)、截叶铁扫帚(*Lespedeza cuneata*)、小飞蓬(*Comniza canadensis*)等。矿渣堆放处的优势植物为类芦, L1 的优势植物为类芦、黄荆和香附子(*Rhizoma cyperi*), 其它层的为类芦、黄荆和盐肤木。L4、L5 层植被盖度较大, 为 50%~60%, L1、L2、L3 和 L6 层较稀疏, 分别为 10%~15%、25%~30%、35%~40%、20%~30%, 植物多样性的变化趋势也与此相同。

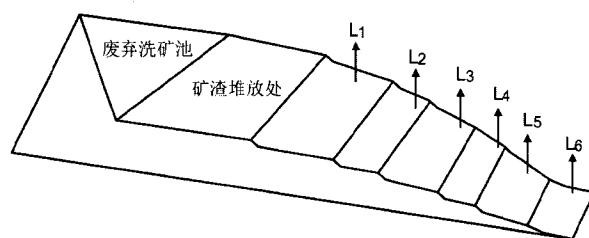


图 1 铅锌尾矿地示意图

Fig. 1 Pb-Zn mine tailings

1.2 土壤和植物样品的采集

植物、非根际土壤和根际土壤样品采用交叉间隔布点法(5~7 个点)在确定样区采样, 植物样品装入聚乙烯塑料袋子密封保存, 带回实验室后立即进行预处理, 每个样区取样重复 3 次。同时在植物样品采集点采集相应的土壤样品(0~15 cm 表层土壤), 非根际土壤样品的采集通常离植物根系 20~25 cm, 根际土壤采用抖落法取得, 即根刨出后, 先轻拌, 带回实验室后, 再拌动根系, 落下的土则视为根际土壤, 然后离根 25 cm 以外处土壤作为非根际土壤。以距该尾矿约 5 km 象山的植物和土壤样品为对照。土壤取样重复 3 次。

1.3 样品分析与数据处理

植物样品分为根和地上部(茎、叶)。先用自来水充分冲洗去除泥土和污物, 然后用蒸馏水冲洗 2~3 遍, 沥干后于 100 °C 下杀青 30 min, 在 70~80 °C 下烘至恒重, 磨碎后过 60 目尼龙筛; 土壤样品经自然风干后磨碎, 过 200 目尼龙筛。过筛后的植物和土壤样品, 置于干燥器中保存。取干燥植物粉末 0.2 g 置于 XT-9900 上海新拓微波消解仪消化, 加浓硝酸 7 mL, 再加氢氟酸 0.5 mL, 过氧化氢 3 mL。用 AA-400 型原子吸收分光光度法测定样品的 Cu、

Cd、Zn 和 Pb 含量。检测数据均重复 3 次。利用 SPSS10.0 进行最小显著性差异检验(LSD 检验)。

1.4 重金属的富集与转移能力评价

转移系数(Biological transfer coefficient,BTC)=地上部分重金属含量/根部重金属含量。转移系数越大,说明植物从根部向地上部分运输重金属的能力越强(Baker & Walker,1989)。

富集系数 BAC(Biological Accumulating Coefficient)=植物体(或器官)内污染物浓度/土壤内污染物浓度。富集系数越大,富集能力就越强(Baker &

表 1 铅锌尾矿区非根际土壤重金属的含量 (mg · kg⁻¹,n=24)
Table 1 Heavy metal contents of non-rhizosphere soils in the Pb-Zn mine talings

地点 Location	Pb	Zn	Cu	Cd
MD	8925.73±65.50a	3741.49±32.97a	229.95±4.91a	36.72±0.65a
L1	8628.13±32.36a	3593.97±5.310a	206.72±6.61a	30.30±0.50a
L2	8390.91±73.00b	3320.38±17.54b	193.05±2.82ab	27.36±0.47b
L3	8107.67±9.410bc	3223.37±32.06b	188.32±0.97b	22.37±1.09b
L4	7897.62±60.72c	2990.09±16.19bc	171.69±4.43b	19.94±0.09cd
L5	7507.50±17.65c	2829.56±34.06c	162.71±3.19c	16.02±0.65d
L6	8571.37±24.17a	3606.59±7.780a	201.23±1.92a	30.08±0.48b
CK	16.97±1.24d	7.97±1.00d	4.51±0.18d	0.11±0.01e

注:MD(mine dump)表示矿渣堆放处。表中数据为测定平均值±标准差,同一列数据后相同字母表示处理间无显著差异,不相同则存在显著差异(P>0.05)。下同。

Note:Data with the same letters have no significant difference at 0.05 level. The same below.

Walker,1989)。

2 结果与分析

2.1 铅锌尾矿各小区土壤重金属含量

尾矿区各小区土壤重金属含量总体上是 Pb>Zn>Cu>Cd,其中矿渣堆放处含量最高,从 L1 至 L5 逐渐减少,而 L6 却明显高于 L1-L5,接近矿渣堆放处(表 1)。这很可能是因为 L6 处于低洼处,由于长期雨水的冲淋作用,重金属在此处累积。该尾矿重金属污染较严重,远高出正常对照的土壤,根据土壤环境质量标准值(GB15618-1995)(McGrath 等,2001),矿渣堆放处(Mine dump,MD)和 6 个小区的 Pb、Zn、Cd 含量均远超出土壤环境质量三级标准,Cu 含量也超出二级标准。

2.2 铅锌尾矿区各植物根际土壤重金属含量

同一小区三种植物根际土壤中的重金属含量显著低于非根际土壤。同种植物根际土壤重金属含量的变化趋势与非根际土壤一致。同一小区类芦根际土壤中的 Pb、Cu、Cd 含量低于黄荆和盐肤木,多数情况下达显著水平,说明它对尾矿中 Pb、Cu、Cd 的净化效果优于后两者;黄荆根际土壤重金属 Zn 含量显著低于其它两种植物,表明它对 Zn 的净化效果优于另两种植物(表 2)。由表 2 可知,同种植物对不同重金属元素的吸收不同,即使是同一种重金属元素,会因其在土壤中含

量不同,吸收量也有

2.3 植物体各器官重金属含量及转移系数

总体而言,该铅锌尾矿区的三种植物,其根、茎和叶的重金属含量均显著高于对照(无明显重金属污染土壤中生长的植物)。植物体器官的重金属含量在种间多存在显著差异。即使是同种植物的同一器官,由于生长于不同小区,含量也不同(表 3)。同种植物生长于相同小区土壤中,其重金属含量在不同器官间存在差异,多数达显著水平,但重金属含量在器官间的分布趋势不同。

由于铅锌尾矿土壤中,Pb、Zn 含量高于 Cu、Cd,因此在三种植物器官中,前两种重金属含量高于后者。对于类芦,Pb 含量排序是根>茎>叶;Zn 含量在根和茎间无显著差异,但均显著高于叶;Cu 含量排序是根>茎>叶;Cd 是根>叶>茎。对于黄荆,Pb 含量排序是根>叶>茎;Zn 含量在根和叶间无显著差异,但均显著高于茎;Cu 含量排序是根>茎>叶;Cd 含量在茎和叶间无显著差异,根的含量为前两者的 2.5~3 倍。对于盐肤木,Pb、Zn 含量排序是茎>根>叶,Cu 是茎>根>叶,多数情况下差异并不显著;Cd 是根>叶>茎(表 3)。

在这三种优势植物中,转移系数排序:Pb 是盐肤木>黄荆>类芦,Zn 是黄荆>盐肤木>类芦,Cu 是盐肤木>黄荆>类芦,Cd 是类芦>黄荆>盐肤木(表 3)。三种植物对 Pb、Zn、Cu 的转移系数均大于 1,有较强的转移能力。

表 2 铅锌尾矿区根际土壤重金属的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=54$)
Table 2 Heavy metal contents of non-rhizosphere soils in the Pb-Zn mine tailings

种名 Species	地点 Location	Pb	Zn	Cu	Cd
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i>	MD	8418.86±62.47a	3140.37±30.96c	89.75±3.61b	26.41±0.58ab
	L1	8198.34±30.24c	2983.57±9.870cd	86.73±6.53bc	20.48±0.51c
	L2	7795.51±68.04e	2740.43±16.86f	83.25±1.98bc	17.25±0.39d
	L3	7452.23±19.15f	2573.42±30.98h	79.12±1.82c	12.45±1.42e
	L4	7207.32±57.42g	2380.59±18.82i	75.61±4.21cd	9.53±0.21f
	L5	6957.31±18.25j	2198.62±31.45j	72.31±3.41d	6.12±0.72g
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	L6	8101.65±26.16c	2974.71±9.420d	85.97±1.21b	20.08±0.61c
	L1	8309.42±30.78b	2849.89±9.541d	89.65±5.34b	29.01±0.46a
	L2	8091.67±71.04c	2632.18±15.49g	86.15±1.98b	26.36±0.47b
	L3	7832.31±11.32e	2416.41±29.32h	83.18±1.32c	21.52±1.87c
	L4	7598.18±58.76f	2219.65±14.62j	80.39±4.01c	18.86±0.12cd
	L5	7207.32±16.81g	2013.32±31.75k	78.01±2.11c	15.78±0.35d
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	L6	8319.98±22.14ab	2767.47±8.470f	88.41±2.87ab	28.12±0.51a
	L2	7997.31±69.85d	3521.29±16.49b	98.52±3.52ab	25.81±0.39ab
	L3	7731.51±19.71e	3223.37±32.06c	94.21±1.87ab	21.18±1.21c
	L4	7492.90±61.38f	2990.09±16.19cd	91.59±5.02ab	18.38±0.79cd
	L5	7169.03±15.71h	2829.56±34.06e	88.63±3.68b	15.21±0.72d
	L6	8371.37±24.17a	3606.59±7.780a	101.76±2.76a	27.12±0.51a

2.4 植物体各器官重金属富集系数

三种植物中,根、茎、叶对三种重金属中的任何一种,富集系数均小于1,比较而言,Cu的富集系数最高,Pb最小。类芦和黄荆对三种重金属的富集系数排序均是根>茎>叶,盐肤木 Pb、Zn、Cu 的富集系数排序是茎>根>叶,Cd 是根>茎>叶。对照土壤(非铅锌尾矿污染的正常土壤)中生长的植物,Pb、Zn 的富集系数显著高于尾矿中的植物,但 Cu 的反而低,Cd 多数情况下差别不大(表4)。

3 结论与讨论

3.1 讨论

超富集植物是指能超量吸收重金属并能将其不断运移到地上部的植物(Baker & Walker, 1989; 崔晓艳等, 2010)。目前筛选和确认 Pb、Zn、Cu、Cd 超富集植物的标准有3个:临界含量特征,茎或叶富集 Pb、Cu 重金属的临界含量为 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $10\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 或者达到未受污染的普通植物的 10~100 倍;具富集和转移特征,即富集系数和转移系数都大于1;具一定耐性能力(Tang 等, 1997; McGrath 等, 2001; 孙约兵等, 2008)。本研究中,类芦、黄荆和盐肤木对 Pb、Zn、Cu 的转移系数均>1.0,但对四种重金属的富集系数均<1.0,因此,并非典型的超富集植物。同样,在

郴州苏仙区铅锌尾矿区,有9种优势植物能在污染土壤上定居,对 Cu、Cd、Pb 和 Zn 4 种重金属元素均有不同程度的积累,积累量均未达到超累积植物所规定的临界含量,其中野菊花(*Dendranthema indicum*)、旋鳞莎草(*Cyperus ichelianus*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)3 种植物地上部生物量较大且对某些重金属向地上部转运能力较强,对重金属污染土壤有一定修复潜力。在同一土壤层上,丙村铅锌尾矿区根际土壤重金属含量显著低于非根际土壤,由于这些植物对土壤重金属的吸收,因此可选取相对应的植物作为先锋植物对土壤进行修复。

丙村铅锌尾矿的土壤重金属污染是一种复合污染,Pb、Zn、Cd 含量远超国家三级土壤标准,Cu 含量也超二级标准。南京栖霞山铅锌矿区土壤 Pb、Zn、Cd 等污染严重,部分土壤还存在 Cu 轻度污染(储彬彬等, 2010),这与本研究结果甚相似。郴县东坡铅锌矿区的土壤污染也是以 Pb、Zn 和 Cd 为主的重金属复合污染,该区域内作物中的 Pb、Cd 残留很高(曾清如等, 1997; 夏家淇等, 2006);会泽废弃铅锌尾矿也达到重度污染等级,复垦地已不适宜耕种农作物。铅锌矿尾矿区土壤缺磷无氮、有机质含量低,阳离子代换量低,保水保肥能力较弱,而尾砂中含量高的 Pb、Cd、Zn 等对周边地区土壤和水体造成污染(路畅等, 2010; 储彬彬等, 2010)。丙村铅锌尾矿土壤重金属含量较高,其主要原因是长期废弃矿累积

导致 Pb、Zn、Cu、Cd 含量不断上升。由于尾矿废弃地为一坡地,闲置约 30 a,雨水冲淋导致不同小区土壤重金属含量不同,进而导致植被覆盖不均,含量越高,盖度越小,且物种多样性也越低。在地势低洼处的 L6 区,土壤重金属含量明显高于其它小区而接近矿渣堆放处,这是因为长期的雨水冲淋导致重金

属在此处累积。不同小区的植被优势种不外乎类芦、黄荆和盐肤木,说明这三种植物对当地这种污染的土壤有较强的耐性。

矿山废弃地中自然定居的草本植物通常由于生物量大、生长快,又适应于矿区严酷的生存环境,通常适于用做尾矿的植被恢复。类芦对 Pb 的转移系

表 3 尾矿不同小区的植物各器官的重金属含量及转移系数 (n=63)
Table 3 Heavy metal contents and TC(transfer coefficient) of plants in different zones of mining wasteland

地点 Location	种名 Species	元素 Element	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	转移系数 TC	地点 Location	种名 Species	元素 Element	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	转移系数 TC
MD	类芦	Pb	372.95	122.9	50.48	0.46	L4	类芦	Pb	346.71	103.65	39.90	0.41
	<i>Neyraudia</i>	Zn	251.58	250.57	126.24	1.50		<i>Neyraudia</i>	Zn	227.45	227.57	110.24	1.49
	<i>reynaudiana</i>	Cu	151.51	124.74	117.85	1.60		<i>reynaudiana</i>	Cu	131.34	107.58	100.48	1.58
		Cd	5.06	2.60	3.39	1.18			Cd	3.57	1.78	2.76	1.27
L1	类芦	Pb	364.67	120.35	48.37	0.46		黄荆	Pb	150.90	90.79	95.27	1.23
	<i>Neyraudia</i>	Zn	247.68	241.39	124.60	1.48		<i>Vitex</i>	Zn	235.81	202.76	237.80	1.87
	<i>reynaudiana</i>	Cu	145.92	120.84	114.81	1.61		<i>negundo</i>	Cu	87.60	76.43	64.57	1.61
		Cd	4.97	2.04	3.12	1.18			Cd	1.80	0.62	0.67	0.72
	黄荆	Pb	165.56	101.15	120.42	1.34		盐肤木	Pb	120.76	193.70	92.73	2.37
	<i>Vitex</i>	Zn	251.55	218.30	250.49	1.86		<i>Rhus</i>	Zn	190.30	242.75	92.80	1.76
	<i>negundo</i>	Cu	100.41	89.54	75.24	1.64		<i>chinensis</i>	Cu	68.74	70.09	65.43	1.97
		Cd	2.05	0.79	0.81	0.78			Cd	1.80	0.70	0.45	0.64
L2	类芦	Pb	358.24	114.37	45.05	0.45	L5	类芦	Pb	340.43	97.59	35.15	0.39
	<i>Neyraudia</i>	Zn	237.52	234.08	118.92	1.49		<i>Neyraudia</i>	Zn	223.34	223.18	106.46	1.48
	<i>reynaudiana</i>	Cu	140.82	114.91	110.57	1.60		<i>reynaudiana</i>	Cu	126.64	101.80	96.55	1.57
		Cd	4.01	1.95	2.84	1.19			Cd	3.47	1.68	2.58	1.23
	黄荆	Pb	160.82	96.87	115.92	1.32		黄荆	Pb	145.76	85.80	90.91	1.21
	<i>Vitex</i>	Zn	247.89	214.97	245.30	1.87		<i>Vitex</i>	Zn	230.92	198.79	232.10	1.87
	<i>negundo</i>	Cu	97.31	85.37	71.91	1.60		<i>negundo</i>	Cu	82.37	71.43	60.89	1.61
		Cd	1.94	0.68	0.75	0.65			Cd	1.67	0.57	0.61	0.71
	盐肤木	Pb	128.98	201.29	100.04	2.35		盐肤木	Pb	128.98	201.29	100.04	2.34
	<i>Rhus</i>	Zn	200.27	252.43	101.07	1.76		<i>Rhus</i>	Zn	200.37	252.43	101.07	1.76
	<i>chinensis</i>	Cu	75.89	78.70	74.46	2.00		<i>chinensis</i>	Cu	75.89	78.70	74.46	2.02
		Cd	1.98	0.86	0.57	0.67			Cd	1.98	0.86	0.57	0.72
L3	类芦	Pb	353.51	110.42	43.46	0.41	L6	类芦	Pb	360.42	115.09	47.25	0.45
	<i>Neyraudia</i>	Zn	232.31	230.62	114.41	1.49		<i>Neyraudia</i>	Zn	240.43	238.28	121.72	1.50
	<i>reynaudiana</i>	Cu	136.76	110.59	104.98	1.58		<i>reynaudiana</i>	Cu	145.87	119.51	115.52	1.61
		Cd	3.68	1.67	2.75	1.27			Cd	4.31	2.35	3.44	1.34
	黄荆	Pb	154.82	93.47	110.43	1.23		黄荆	Pb	164.32	102.17	120.22	1.35
	<i>Vitex</i>	Zn	240.46	208.54	240.13	1.87		<i>Vitex</i>	Zn	251.80	218.42	251.31	1.87
	<i>negundo</i>	Cu	92.81	80.32	68.47	1.60		<i>negundo</i>	Cu	100.33	87.31	75.80	1.63
		Cd	1.86	0.54	0.67	0.65			Cd	2.07	0.72	0.82	0.74
	盐肤木	Pb	125.64	197.47	97.54	2.35		盐肤木	Pb	134.98	206.21	103.14	2.29
	<i>Rhus</i>	Zn	196.28	248.69	97.49	1.76		<i>Rhus</i>	Zn	203.31	256.50	106.17	1.78
	<i>chinensis</i>	Cu	72.73	74.83	70.56	2.00		<i>chinensis</i>	Cu	80.81	82.64	76.43	1.97
		Cd	1.87	0.76	0.50	0.67			Cd	2.21	0.93	0.65	0.71
CK	类芦	Pb	3.41	0.82	0.87	0.50	CK	黄荆	Pb	2.31	2.01	1.02	1.31
	<i>Neyraudia</i>	Zn	2.18	2.20	1.16	1.54		<i>Vitex</i>	Zn	1.80	1.62	1.51	1.74
	<i>reynaudiana</i>	Cu	1.82	1.31	1.62	1.61		<i>negundo</i>	Cu	1.13	1.04	0.57	1.42
		Cd	0.08	0.06	0.05	1.38			Cd	0.07	0.02	0.01	0.43
	盐肤木	Pb	2.98	2.21	2.14	1.46		盐肤木	Cu	1.80	1.62	1.36	1.66
	<i>Rhus chinensis</i>	Zn	2.41	1.52	1.97	1.45		<i>Rhus chinensis</i>	Cd	0.05	0.02	0.01	0.60

表 4 尾矿不同小区中植物不同器官重金属富集系数
Table 4 Biological accumulating coefficient for heavy metal of plants in different zones in mining wasteland

地点 Location	种名 Species	元素 Element	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	地点 Location	种名 Species	元素 Element	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
矿渣	类芦	Pb	0.042	0.014	0.006	L4	类芦	Pb	0.044	0.013	0.005
堆放处	<i>Neyraudia</i>	Zn	0.067	0.067	0.034		<i>Neyraudia</i>	Zn	0.076	0.076	0.037
	<i>reynaudiana</i>	Cu	0.661	0.544	0.514		<i>reynaudiana</i>	Cu	0.765	0.627	0.585
		Cd	0.138	0.071	0.092			Cd	0.179	0.089	0.138
L1	类芦	Pb	0.042	0.014	0.006		黄荆	Pb	0.019	0.011	0.012
	<i>Neyraudia</i>	Zn	0.069	0.067	0.035		<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.079	0.068	0.080
	<i>reynaudiana</i>	Cu	0.706	0.585	0.555			Cu	0.510	0.445	0.376
		Cd	0.164	0.067	0.103			Cd	0.090	0.031	0.034
	黄荆	Pb	0.019	0.012	0.014		盐肤木	Pb	0.015	0.025	0.012
	<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.070	0.061	0.070		<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.064	0.081	0.031
		Cu	0.486	0.433	0.364			Cu	0.400	0.408	0.381
		Cd	0.068	0.026	0.027			Cd	0.090	0.035	0.023
L2	类芦	Pb	0.043	0.014	0.005	L5	类芦	Pb	0.045	0.013	0.005
	<i>Neyraudia</i>	Zn	0.072	0.070	0.036		<i>Neyraudia</i>	Zn	0.079	0.079	0.038
	<i>reynaudiana</i>	Cu	0.729	0.595	0.573		<i>reynaudiana</i>	Cu	0.778	0.626	0.593
		Cd	0.147	0.071	0.104			Cd	0.217	0.105	0.161
	黄荆	Pb	0.019	0.012	0.014		黄荆	Pb	0.019	0.011	0.012
	<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.075	0.065	0.074		<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.082	0.070	0.082
		Cu	0.504	0.442	0.372			Cu	0.506	0.439	0.374
		Cd	0.071	0.025	0.027			Cd	0.104	0.036	0.038
	盐肤木	Pb	0.015	0.024	0.012		盐肤木	Pb	0.017	0.027	0.013
	<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.060	0.076	0.030		<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.071	0.089	0.036
		Cu	0.393	0.408	0.386			Cu	0.466	0.484	0.458
		Cd	0.072	0.031	0.021			Cd	0.124	0.054	0.036
L3	类芦	Pb	0.044	0.014	0.005	L6	类芦	Pb	0.042	0.013	0.006
	<i>Neyraudia</i>	Zn	0.072	0.072	0.035		<i>Neyraudia</i>	Zn	0.067	0.066	0.034
	<i>reynaudiana</i>	Cu	0.726	0.587	0.557		<i>reynaudiana</i>	Cu	0.725	0.594	0.574
		Cd	0.165	0.075	0.123			Cd	0.143	0.078	0.114
	黄荆	Pb	0.019	0.012	0.014		黄荆	Pb	0.019	0.012	0.014
	<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.075	0.065	0.074		<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.070	0.061	0.070
		Cu	0.493	0.427	0.364			Cu	0.499	0.434	0.377
		Cd	0.083	0.024	0.030			Cd	0.069	0.024	0.027
	盐肤木	Pb	0.015	0.024	0.012		盐肤木	Pb	0.016	0.024	0.012
	<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.061	0.077	0.030		<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.056	0.071	0.029
		Cu	0.386	0.397	0.375			Cu	0.402	0.411	0.380
		Cd	0.084	0.034	0.022			Cd	0.073	0.031	0.022
CK	类芦	Pb	0.201	0.048	0.051	CK	黄荆	Pb	0.136	0.118	0.060
	<i>Neyraudia</i>	Zn	0.274	0.276	0.146		<i>Vitex negundo</i>	Zn	0.226	0.203	0.189
	<i>reynaudiana</i>	Cu	0.404	0.290	0.359			Cu	0.251	0.231	0.126
		Cd	0.157	0.118	0.098			Cd	0.137	0.039	0.020
	盐肤木	Pb	0.176	0.130	0.126		盐肤木	Cu	0.399	0.359	0.302
	<i>Rhus chinensis</i>	Zn	0.302	0.191	0.247		<i>Rhus chinensis</i>	Cd	0.098	0.039	0.020

数为 0.39~0.46,对 Zn 的为 1.48~1.54,对 Cu 的为 1.58~1.61,对 Cd 的为 1.18~1.34。路畅等(2010)在广西铅锌矿区研究发现:芦苇(*Phragmites australis*)、蜈蚣草(*Nephrolepis cordifolia*)和五节芒对 Pb 的转移系数分别为:3.89、1.56、1.49;蒲公英(*Taraxacum officnala*)对 Pb、Zn、Cu 则分别为 3.70、7.00、1.67。芦苇、蜈

蚣草、五节芒、蒲公英均是粤东地区的常见植物,但调查时在丙村铅锌矿区并未发现,可能是由于当前的土壤基质不适合于其生存,也可能是周边缺乏这些植物种源,在不断改善尾矿区土壤质量的基础上,人工引入这些植物构建植被应该有利于加快重金属污染的消除。盐肤木对 Pb、Cu 的转移系数分别为 2.29~2.37、1.97~2.02,黄荆对 Zn 转移系数为

1.86~1.87, 高于其它一些植物, 如金樱子 (*Rosa laevigata*) 对 Pb、Zn、Cu 的转移系数为 0.10、0.04 和 0.51, 红背山麻杆 (*Alchornea trewioides*) 对 Zn 为 0.43、1.04、0.79 (路畅等, 2010)。

对于类芦和黄荆, 其体内的 Pb、Zn、Cu、Cd 主要积累于根, 地上部分的含量较低。类芦茎中 Pb、Cu、Zn 和黄荆茎中 Cu 含量均高于叶; 类芦叶中 Cd 含量和黄荆叶中 Pb 含量均高于茎, 多数植物叶内重金属含量一般高于茎, 不同部位的重金属含量为根>叶>茎, 这与一般植物对重金属的富集规律一致。本研究发现盐肤木的 Pb、Zn、Cu 含量排序是茎>根>叶; 崔晓艳等 (2010) 的研究显示蜈蚣蕨、铁线草 (*Adiantum capillus-veneris*)、鬼针草 (*Bidens pilosa*) 和五节芒表现出茎叶 Pb 含量>根部 Pb 含量的相反规律, 其 Pb 转移系数分别为 1.43、1.45、1.34 和 1.75。说明它们从根部向地上部运输 Pb、Zn 或 Cu 的能力很强, 这可能是植物耐重金属的一种对策, 因为植物可通过落叶而将重金属排出体外。

同一种植物对不同重金属元素有不同的吸收能力和分布状况; 不同植物种类对同一种重金属元素的吸收以及吸收后在体内的转运和分布也不同; 土壤重金属含量较高的植物各部位重金属含量也略高。本研究还发现, 类芦、黄荆和盐肤木在不同重金属含量的土壤中, 它们对同一种重金属的转移系数、根、茎或叶对重金属的富集系数多数情况下变化幅度很小, 甚至可以说是基本上保持恒定。在低势低洼的 L6 处, 雨水的冲淋导致土壤重金属含量较高, 很可能由于水分和养分条件也较好, 植物对重金属的吸收状况也较好, 因此富集系数与其它小区差异不大。对重金属的转移能力应是其长期对环境适应的结果, 是否可视为其一种固有特性? 丙村铅锌尾矿区矿渣堆放处及坡地的 L1、L2、L3、L6 土壤重金属含量极高且相差不大, 而这些植物器官吸收的重金属量可能已达最大值, 因此就不难解释这些植物的根、茎、叶的重金属富集系数相近, 但为何在重金属含量差别较大的 L4、L5 处与前者差别仍然不大? 这尚需进一步的生理生态实验予以探析。

3.2 结论

(1) 在粤东梅州市梅县丙村铅锌阶梯式坡地尾矿区中, 土壤中 Pb、Zn、Cd 含量远超土壤环境质量的三级标准, Cu 含量也超出二级标准, 因此存在较严重的重金属污染。(2) 对此阶梯式尾矿各区的土壤的重金属含量取样测定和比较分析, 发现根际土

壤和非根际土壤重金属含量是 $Pb > Zn > Cu > Cd$; 三种优势植物类芦、黄荆、盐肤木根际土壤的重金属含量显著低于非根际土壤。(3) 三种植物对不同的重金属元素有不同的吸收能力和分布状况; 不同的植物种类对同一种重金属元素的吸收以及吸收后在体内的转运和分布也不同; 三种植物对 Pb、Zn、Cu 的转移系数均大于 1.0, 但对四种重金属的富集系数均小于 1.0, 均未达到超富集植物临界含量标准。(4) 三种植物四种重金属的转移系数排序: Pb 是盐肤木>黄荆>类芦, Zn 是黄荆>盐肤木>类芦, Cu 是盐肤木>黄荆>类芦, 而 Cd 则是类芦>黄荆>盐肤木。三种植物对 Cu 的富集系数最高, Pb 最小。类芦和黄荆对三种重金属的富集系数排序均是根>茎>叶, 而盐肤木对 Pb、Zn、Cu 的富集系数排序是茎>根>叶, Cd 是根>茎>叶。这三种植物对土壤的重金属污染有很强的耐性, 虽然并非典型的超富集植物, 但对污染土壤仍有一定的修复效果。

参考文献:

- 周启星, 魏树和, 张倩茹. 2004. 生态修复 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- Baker AJM, Walker PL. 1989. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plant [M]//Shaw AJ. Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. Boca Raton: CRC press Inc.; 155-178
- Chu BB (储彬彬), Luo LQ (罗立强). 2010. Evaluation of heavy metal pollution in soils from nanjing qixiashang lead-zinc mines (南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价) [J]. *Rock & Min Analys* (岩矿测试), 29(1): 5-8
- Cui XY (崔晓艳), Guo WJ (郭维君), Chen XJ (陈学军). 2010. Enrichment characteristics of heavy metals by dominant plants in siding lead-zinc abandoned mine area (泗顶铅锌矿废弃地优势植物的重金属富集特征) [J]. *Metal Mine* (金属矿山), (4): 180-182
- Lu C (路畅), Wang YH (王英辉), Yang JW (杨进文). 2010. Soil heavy metal pollution and dominant plants selection in Pb-Zn mining areas of Guangxi (广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选) [J]. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 41(6): 1471-1475
- McGrath SW, Zhao FJ, Lornbi E. 2001. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils [J]. *Plant Soil*, 232: 207-14
- Sun YB (孙约兵), Zhou QX (周启星), Ren LN (任丽娜), et al. 2008. The identification of hyperaccumulative plants in tailing dumps of the Qingchengzi lead-zinc mining area (青城子铅锌尾矿区植物对重金属的吸收和富集特征研究) [J]. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 27(6): 2166-2171
- Tang SR, Huang CY, Zhu ZX. 1997. *Commelina communis* Copper hyperaccumulator found in Anhui Province of China [J]. *Pedosphere*, 7(3): 207-210
- Wei SH (魏树和), Zhou QX (周启星), Wang X (王新), et al. (下转第 755 页 Continue on page 755)

齿,锯齿自尾尖边缘至近叶基处;叶柄纤细,长 3~5 mm,背面有短丝毛,腹面除边缘外无毛。花 2~3 朵簇生于叶腋;花白色,无梗,有香气,径约 2.5~3 cm;苞被不分为苞片和萼片,壳质易碎,花开后脱落,10~12 枚,从上至上,由外至内逐渐增大,半圆状贝壳形到近圆形,内外皆有丝状短柔毛,最下面的 1 枚长宽各为 0.5 mm,最上面的 1 枚基部近革质,近圆形,长 1.3 cm,宽 1 cm,先端圆,内外皆被短丝毛,惟外面较密;花瓣 6~8 枚或更多,易脱落,除内轮花瓣基部贴生外轮雄蕊外,其余彼此分离;最外面的 1 枚由苞被向花瓣过渡,下部革质,上部膜质,半圆形,贝壳状,革质部分外面略被毛,其余花瓣均为膜质,倒卵形至长圆状倒卵形,长 1.2~2.2 cm,宽 0.9~1.5 cm,先端二裂至 5 mm,外面先端裂口处有短丝毛,其余内外皆无毛;雄蕊多数,长短不一,排成 3 轮,长 0.5~1.1 cm,仅外轮基部连合 1 mm,其余彼此完全分离,花丝无毛,花药 2 室,近基部着药;子房圆锥状,密被短丝毛,花柱长 7~8 mm,基部被短丝毛,柱头 3 裂,裂片长 2 mm,中轴胎座,3 室,每室胚珠 3~5,子房室常出现败育。果未见。花期 10~12 月。

本种接近窄叶短柱茶 *C. fluvialis* Hand.-Mzt., 花略有香气,惟不同在于本种叶常为倒卵形,具尾尖,后者叶狭披针形,渐尖。

广西:广西壮族自治区林业科学研究院,油桐山, alt. 121 m, 108°21'32.1" E, 22°55'30.6" N, 引种栽培, 采集时间为 2011 年 12 月,叶创兴 9981(Typus! 模式标本), 9982, 9983, 9984, 均存于中山大学标本室(SYS)。本种属灌木型,花多而密,果可早熟。根据采作油料用的果实,果红褐色,圆球形,有近倒卵形,

宽 1.8~2.3 cm,高 1.8~2.3 cm,先端圆或急尖,果皮革质,表皮毛褪去;果干时 3 片开裂,常 1~2 室发育,偶有 3 室皆发育的,每室 1 种子。种子深褐色,近圆形或果为 2 室时,种子一面平凸,径 1.3~1.7 cm,表面无毛;果单室或 2 室发育时,中轴被挤成薄片贴向果壁,果 3 室皆发育时,中轴三棱形。由于其果量多,且可早熟,作木本油料作物当是好种;同时花有香气,个体中偶有半重瓣的花,可进而作观赏植物栽培。

致谢 新种墨线图由谢庆建先生绘,特此致谢!

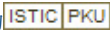
参考文献:

- 张宏达,任善湘. 1998. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社, 49(3):1-195
- Sealy JR. 1958. A revision of the genus *Camellia*[M]. London: The Royal Horticultural Society
- Ye CX(叶创兴). 1987. Three new species of *Camellia*(山茶属三新种)[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*(中山大学学报·自然科学版), 1:17-20
- Ye CX(叶创兴). 1990. A discussion on relationship among the genera in Theaceae (Theaceae) (山茶亚科属间亲缘关系的探讨)[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*(中山大学学报·自然科学版), 29(1):74-81
- Ye CX(叶创兴), Zhang HD(张宏达), Xu ZR(许兆然). 1993. Systematic study of sect. *Chrysantha* changon (金花茶组植物的系统研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), 增刊 4:115-149
- Ye CX(叶创兴). 1996. New data from genus *Camellia*(Theaceae)(山茶属新资料)[J]. *Acta Univ Sunyatseni; Sci Nat Edit*(中山大学学报·自然科学版), 35(4):127-129
- Ye CX. 1997. Classification in the genus *Camellia* L. [J]. *Am Camellia Yearbook*:9-23
- Zhang HD(张宏达), Ye CX(叶创兴). 1982. New species of Theaceae from China(中国山茶科植物新记录)[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*(中山大学学报), 4:72-77

(上接第 749 页 Continue from page 749)

2005. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum*(一种新发现的镉超积累植物龙葵)[J]. *Chin Sci Bull*(科学通报), 50(1):33-38
- Xia JQ(夏家淇), Luo YM(骆永明). 2006. Definition and three evaluation guidelines of soil contamination(关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨)[J]. *J Ecol & Rural Environ*(生态与农村环境学报), 22(1):87-90
- Yan Y(闫研), Li JP(李建平), Zhao ZG(赵志国), et al. 2008. Advances in the mechanisms of heavy metal tolerance and accumulation in hyperaccumulators(超富集植物对重金属耐受和富集机制

- 的研究进展)[J]. *Guihaia*(广西植物), 28(4):505-510
- Yang XE(杨肖娥), Long XX(龙新宪), Ni WZ(倪吾钟), et al. 2002. *Sedum alfredii* H.: a new Zn hyperaccumulating plant first found in China(东南景天, 一种新的锌超积累植物)[J]. *Chin Sci Bull*(科学通报), 47(3):1 003-1 006
- Zeng QR(曾清如), Zhou XH(周细红), Tie BQ(铁柏清), et al. 1997. Study on characteristics of heavy metal pollution and its controlling measures in lead zinc mine area(铅锌矿自然扩散晕内重金属的污染特征及其防治技术)[J]. *Rural Eco-Environ*(农村生态环境), 13(1):12-15

作者: [刘惠娜](#), [杨期和](#), [杨和生](#), [李姣清](#), [刘德良](#), [LIU Hui-Na](#), [YANG Qi-He](#), [YANG He-Sheng](#), [LI Jiao-Qing](#), [LIU De-Liang](#)
作者单位: [广东省嘉应学院, 广东梅州, 514015](#)
刊名: [广西植物](#) 
英文刊名: [Guihaia](#)
年, 卷(期): 2012, 32(6)
被引用次数: 2次

参考文献(13条)

1. [周启星;魏树和;张倩茹](#) [生态修复](#) 2004
2. [Baker AJM;Walker PL](#) [Ecophysiology of metal uptake by tolerant plant](#) 1989
3. [储彬彬, 罗立强](#) [南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价](#)[期刊论文]-[岩矿测试](#) 2010(1)
4. [崔晓艳, 郭维君, 陈学军](#) [泗顶铅锌矿废弃地优势植物的重金属富集特征](#)[期刊论文]-[金属矿山](#) 2010(4)
5. [路畅, 王英辉, 杨进文](#) [广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选](#)[期刊论文]-[土壤通报](#) 2010(6)
6. [McGrath SW;Zhao FJ;Lombi E](#) [Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils](#) 2001
7. [孙约兵, 周启星, 任丽萍, 王林](#) [青城县铅锌尾矿区植物对重金属的吸收和富集特征研究](#)[期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2008(6)
8. [Tang SR;Huang CY;Zhu ZX](#) [Commelina communis Copper hyperaccumulator found in Anhui Province of China](#) 1997(03)
9. [魏树和;周启星;王新](#) [一种新发现的镉超积累植物龙葵](#) 2005(01)
10. [夏家淇, 骆永明](#) [关于土壤污染的概念和3类评价指标的探讨](#)[期刊论文]-[生态与农村环境学报](#) 2006(1)
11. [闫研, 李建平, 赵志国, 林庆宇](#) [超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展](#)[期刊论文]-[广西植物](#) 2008(4)
12. [杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 傅承新](#) [东南景天 \(Sedum alfredii H\) ——一种新的锌超积累植物](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2002(13)
13. [曾清如;周细红;铁柏清](#) [铅锌矿自然扩散晕内重金属的污染特征及其防治技术](#) 1997(01)

引证文献(2条)

1. [简敏菲, 周雪玲, 余厚平, 朱咏梅](#) [乐安河-鄱阳湖湿地植物群落特征及其优势植物对重金属 Cu、Pb、Cd 的富集](#)[期刊论文]-[广西植物](#) 2015(03)
2. [冯宏, 戴军, 吴家龙, 郭彦彪](#) [水土保持植物类芦对氮磷钾养分水平的响应](#)[期刊论文]-[华南农业大学学报](#) 2015(2)

引用本文格式: [刘惠娜](#). [杨期和](#). [杨和生](#). [李姣清](#). [刘德良](#). [LIU Hui-Na](#). [YANG Qi-He](#). [YANG He-Sheng](#). [LI Jiao-Qing](#). [LIU De-Liang](#) [粤东铅锌尾矿三种优势植物对重金属的吸收和富集特性研究](#)[期刊论文]-[广西植物](#) 2012(6)