

湘西典型锰渣库主要优势植物种类及重金属耐性特征*

李凤梅¹, 杨胜香¹, 曹建兵², 彭清静¹, 符待君¹, 龙华来¹

(1. 吉首大学 生物资源与环境科学学院 锰锌矿业重金属污染综合防治技术湖南省工程实验室
锰锌钒产业技术协同创新中心, 湖南 吉首 416000; 2. 花垣县环境保护局, 湖南 花垣 416400)

摘要:【目的】采取植被重建方法治理锰渣库重金属污染。【方法】全面调查了湘西典型锰矿区的植被资源,并对矿区的主要优势植物及根际土进行了重金属检测分析。【结果】湘西锰渣库现有高等植物35种,隶属32个属,15个科,其中空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、加拿大飞蓬(*Erigeron canadensis*)、鸭跖草(*Commelina communis*)、商陆(*Phytolacca acinosa*)、日本看麦娘(*Alopecurus japonicus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria plicata*)、魁蒿(*Artemisia princeps*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)等11种植物为湘西典型锰矿区的优势植物,植物体内重金属镉、锰、铅和锌的含量均高于正常植物重金属含量,为重金属耐性物种。锰矿区土壤中镉、锰、铅和锌平均含量分别为22.15, 7 442.16, 824.04和1 096.64 mg·kg⁻¹,明显高于国家土壤质量三级标准和湖南省土壤重金属元素背景值。对优势植物重金属含量的分析表明,野菊、鸭跖草、商陆、日本看麦娘、狗尾草、马唐的重金属转移系数大于1,表现出较强的向茎叶转移的能力,具有重金属蓄积的特征,可用于重金属轻度污染土壤的修复。空心莲子草、鬼针草、加拿大飞蓬、狗牙根、魁蒿的重金属转移系数小于1,表明它们向茎叶转移重金属的能力较差,具有重金属规避特征,可用于重金属重度污染土壤的修复。【结论】重金属规避型植物适合种植在重金属污染严重、使用价值相对较低、面积较大的矿山废弃地。

关键词: 锰渣库; 优势植物; 重金属耐性; 湘西

中图分类号: X171; X820

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)04-0107-07

湖南湘西自治州锰矿资源丰富,蕴藏量高达 2.969×10^7 t,占全国锰储量的22%,是中国重要的锰矿石和电解锰生产基地,素有“东方锰都”的美誉^[1]。电解锰生产过程中会产生大量的锰渣,平均生产1 t电解锰,会产生锰渣8~9 t^[2]。锰渣的排放、堆存不仅破坏和占用了大量的土地资源,而且导致表层土壤、地表水、地下水被重金属污染,生态环境被破坏,并可能导致地面塌陷、山体滑坡、泥石流等灾害的发生。对湘西锰渣库重金属污染进行治理是当地矿山生态环境保护的一项基本任务。对锰渣库区进行生态修复,不仅能控制污染和改善景观,同时也可减轻污染对农田、水体及人群健康的威胁。

目前,重金属尾渣的治理措施主要物理法、化学法、植被法等3种方法。物理法和化学法虽简单有效,但在费用高、工程量大、易造成二次污染等问题^[3]。植被法是近些年发展起来的一种绿色生态技术,因具有成本低、不破坏土壤结构、美化环境、适合大面积推广等优势,已为社会各界所认可^[4]。对植物而言,锰渣库的生长环境恶劣,存在重金属含量高、结构性差、营养物质贫乏等不利因素。然而,由于长期自然选择的作用,某些特殊类型的植物能够在重金属污染严重的环境中生长,进而对重金属产生耐性。薛生国等人^[5]对湖南省湘潭锰矿区植物和土壤进行了调查,发现商陆科(Phytolaccaceae)植物商陆(*Phytolacca acinosa*)对锰具有很高的耐性,且具有明显的富集特性。唐文杰等人^[6]通过对广西全州、板苏、下雷等3个锰矿区20种主要优势植物进行调查检测,发现商陆、油茶(*Camellia oleifera*)表现出很强的锰累积特征。这些重金属耐性植物可作为先锋植物,对重金属异常区的植被恢复和生态重建起着重要的作用。本研究以湖南省湘西州花垣县典型锰渣库为研究对象,调查了锰渣库自然生长的主要植物,测试了主要优势植物体内重金属含量,分析它们对重金属的耐性特征,以为锰渣库

* 收稿日期:2016-05-22 修回日期:2017-02-24 网络出版时间:2017-05-16 11:26

资助项目:国家自然科学基金(No.41561076; No.41471257; No.21266008);湖南省科技计划重点项目(No.2016SK2039);湖南省研究生科研创新项目资助(No.CX2016B29);湘西自治州科技计划项目(州科字[2016]39号)

第一作者简介:李凤梅,女,研究方向为矿山重金属污染治理与生态恢复,E-mail: 1670514253@qq.com;通信作者:杨胜香,副教授,E-mail: yangsx1998@163.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170516.1126.068.html>

的重金属污染治理与植被重建提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究地点概况

锰矿区位于湖南省湘西自治州花垣县境内,地理位置为东经 $109^{\circ}11' \sim 110^{\circ}55'$ 、北纬 $27^{\circ}44' \sim 29^{\circ}47'$ 。矿区为丘陵地貌,土壤类型多属黄红壤、黄壤及红色石灰土,地势由东南向西北倾斜,海拔为 $300 \sim 1\,800\text{ m}$,属中亚热带季风湿润气候,具有明显的大陆性气候特征,年平均气温 $15 \sim 16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量为 $1\,250 \sim 1\,500\text{ mm}$,多年平均日照时数 $1\,291 \sim 1\,406\text{ h}$ 。光热水基本同季,有利于植物生长。

1.2 样品采集、处理与分析

对湘西州花垣县锰渣库进行实地考察,选择典型锰渣库进行现场植被调查与采样。记录自然生长的所有植物种类及生活型,目测估计植物的丰富度,区分优势种和常见种。以矿区排水沟为分界线划分为不同的植被小区,在每个植被小区内采用随机采样法(图 1),采集生物量大、生长旺盛的优势植物。采集 $3 \sim 5$ 株相同植物混合成 1 个样品,包括成熟和幼嫩个体;并同步采集植物的根际土,采集深度为 $0 \sim 30\text{ cm}$,同样将 $3 \sim 5$ 个点的土样混为 1 个样品。最终实地采集植物样品、土壤样品各 48 个,并将采集的所有植物样品和土壤样品立即放入聚乙烯塑料袋,封装后带回实验室。

植物样品按根、茎叶分开,用自来水冲洗干净,然后用去离子水清洗 3 次后晾干,于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min ,之后在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘箱中烘干至质量不再改变。烘干后的植物样品用研钵磨碎,过 60 目尼龙筛,备用。土壤样品在室内阴凉处自然风干、剔除植物落叶及碎石等杂物、再用木槌捶碎、过 60 目尼龙筛,备用。

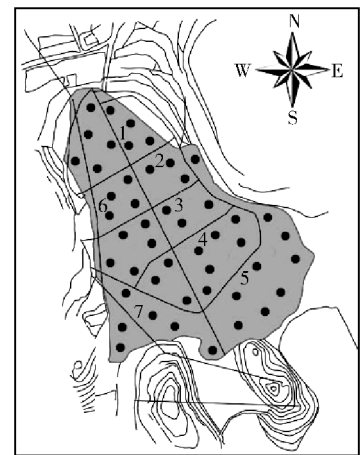
植物样品重金属含量采用浓硝酸-高氯酸消解法^[7]测定。称取植物样品约 0.5 g ,倒入消化管内,加入 5 mL 浓硝酸浸泡过夜。第 2 天放入消化炉内 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min , $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min , $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 1 h ,冷却,加 1 mL 高氯酸,然后 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 20 min , $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h ,冷却,定容,过滤。土壤样品重金属含量采用王水-高氯酸消解法^[8]测定,称取土壤样品约 0.2 g ,倒入消化管内,加 4 mL 王水(其中浓硝酸与浓盐酸体积比为 $1:3$)浸泡过夜,第 2 天放入消化炉内 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min , $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min , $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 1 h ,冷却,加 1 mL 高氯酸,然后 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 20 min , $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 1 h ,冷却,定容,过滤。消解后的植物和土壤样品采用美国热电公司生产的 iCAP6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定重金属元素镉、锰、铅和锌的含量。质量保证采用双平行样和加标回收法,各元素的加标回收率为 $91.8\% \sim 107.6\%$,符合元素分析质量控制标准。

数据统计分析采用 Excel 2007 与 SPSS 16.0 进行。其中最大值、最小值的筛选采用 Excel 2007;平均值和标准误的计算采用 SPSS 16.0。生物富集系数和转移系数采用公式“生物富集系数=植物体内重金属质量/土壤中重金属质量”和“转移系数=植物地上部分中重金属质量/根部中重金属质量”来计算。

2 结果与讨论

2.1 湘西锰渣库基本理化性质

深入了解尾渣的基本理化性质是尾渣库植被恢复最基本也是最关键的步骤之一。一般来说,锰渣库存在许多限制植物生长的因素,属于非常恶劣的生长环境,主要表现为:1) 物理结构不良、持水保肥能力差;2) 极端贫瘠,氮、磷、钾及有机质含量低;3) 金属毒性高,影响植物各种代谢途径、抑制植物对营养元素的吸收;4) 表层不稳定,昼夜温差变化大。为确切了解锰渣的基本理化性质及锰渣对植被恢复的影响,分析了湘西典型锰渣库土壤的基本理化性质,结果见表 1。锰渣库土壤呈弱酸性,pH 基本符合植物生长的要求^[9]。电导率相对较高,是限制植物生长的因素之一。从重金属总量来看,锰渣库土壤中镉、锰、铅、锌总量均较高,总锰、总锌、总铅、总镉含量分别为 $7\,442.16, 1\,096.64, 824.04, 22.15\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于国家土壤质量三级标准和湖南省土壤重金属元素背景值。重金属毒性会影响有机质降解,导致土壤养分不足^[10]。从营养元素来看,锰渣库土壤中氮、磷、钾及有机质含量相对较低。因此,重金属毒性和极端贫瘠是锰渣库限制植物定居和生长的主要因素。



注:1~7 为排水沟,黑色圆圈为采样点,深色区域为采样区域。

图 1 锰渣库采样点分布

Fig. 1 Sampling location of the manganese mine tailings

表 1 湘西典型锰渣库基本理化性质

Tab. 1 Physico-chemical properties of the typical manganese mine tailings in Xiangxi

参数	pH	电导率/ (dS · m ⁻¹)	营养元素含量/(mg · kg ⁻¹)				重金属含量/(mg · kg ⁻¹)			
			有机质	总氮	总磷	总钾	总镉	总锰	总铅	总锌
最大值	8.02	4.86	25 300	46.41	220.09	705.57	47.75	21 334.45	1 565.00	2 099.63
最小值	4.31	2.06	11 900	28.01	160.21	336.21	8.38	1 334.45	391.75	518.38
均值	5.68	2.62	18 600	37.21	190.15	520.89	22.15	7 442.16	824.04	1 096.64
国家土壤质量三级标准 ^[11]							1.0		500	500
湖南省背景值 ^[12]							0.097	583	26	74.2

2.2 湘西锰渣库主要优势植物

尽管锰渣库土壤存在诸多限制植物生长的因子,但植物种类繁多,且各有不同的适应机制,总有一些植物能够适应这种特殊的环境在锰渣库上定居、生长^[13]。典型锰渣库共记录植物 35 种,隶属 32 属,15 科(表 2)。

表 2 湘西典型锰渣库主要优势植物种类

Tab. 2 Main plant species in the typical manganese mine tailings in Xiangxi

科	种	丰富度	生活型	科	种	丰富度	生活型
苋科 (Amaranthaceae)	空心莲子草 (<i>A. philoxeroides</i>)	D	多年生草本	商陆科 (Phytolaccaceae)	商陆 (<i>P. acinosa</i>)	D	多年生草本
漆树科 (Anacardiaceae)	盐麸木 (<i>Rhus chinensis</i>)	F	灌木或小乔木	禾本科 (Poaceae)	日本看麦娘 (<i>A. japonicus</i>)	D	一年生草本
菊科 (Asteraceae)	魁蒿 (<i>A. princeps</i>)	F	多年生草本		狗牙根 (<i>C. dactylon</i>)	D	多年生草本
	大狼把草 (<i>Bidens frondosa</i>)	F	一年生草本		马唐 (<i>D. sanguinalis</i>)	F	一年生草本
	鬼针草 (<i>B. pilosa</i>)	D	一年生草本		白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>)	F	多年生草本
	野菊 (<i>C. indicum</i>)	D	多年生草本		黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)	F	多年生草本
	加拿大飞蓬 (<i>E. canadensis</i>)	D	两年生草本		芒 (<i>Miscanthus sinensis</i>)	F	多年生草本
	鼠麴草 (<i>Gnaphalium affine</i>)	F	两年生草本		鹅观草 (<i>Roegneria kamoji</i>)	F	多年生草本
	苦苣菜 (<i>Ixeris polycephala</i>)	F	一年或 二年生草本		狗尾草 (<i>S. plicata</i>)	F	一年生草本
	千里光 (<i>Senecio scandens</i>)	F	多年生草本	蓼科 (Polygonaceae)	杠板归 (<i>Polygonum perfoliatum</i>)	F	多年生 蔓性草本
	苍耳 (<i>Xanthium sibiricum</i>)	F	一年生草本		羊蹄 (<i>Rumex japonicus</i>)	F	多年生草本
石竹科 (Caryophyllaceae)	鹅肠菜 (<i>Myosoton aquaticum</i>)	F	多年生草本	毛茛科 (Ranunculaceae)	打破碗花花 (<i>Anemone hupehensis</i>)	F	多年生草本
	繁缕 (<i>Stellaria media</i>)	F	一年生草本		扬子毛茛 (<i>Ranunculus sieboldii</i>)	F	多年生草本
鸭跖草科 (Commelinaceae)	鸭跖草 (<i>C. communis</i>)	D	一年生草本	蔷薇科 (Rosaceae)	插田泡 (<i>Rubus coreanus</i>)	F	灌木
大戟科 (Euphorbiaceae)	铁苋菜 (<i>Acalypha australis</i>)	F	一年生草本		灰白毛莓 (<i>Rubus tephrodes</i>)	F	灌木
锦葵科 (Malvaceae)	地桃花 (<i>Urena lobata</i>)	F	直立半灌木	茄科 (Solanaceae)	白英 (<i>Solanum lyratum</i>)	F	草质藤本
桑科 (Moraceae)	藤构 (<i>Broussonetia kaempferi</i> Sieb. var. <i>australis</i> Suzuki)	F	蔓生藤状灌木		龙葵 (<i>Solanum nigrum</i>)	F	一年生草本
酢浆草科 (Oxalidaceae)	红花酢浆草 (<i>Oxalis corymbosa</i>)	F	多年生草本				

注:D表示优势种,F表示常见种。

从物种组成来看,其中禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)植物种数较多,分别有 8,9 种,占锰渣库植物物种总数的 22.9%,25.7%。该结果与唐文杰等人^[6]在广西全州、板苏、下雷 3 个锰矿区植被调查结果相类似,这与禾本科、菊科植物的种子传播能力较强、植物本身对环境的适应性较广有关^[14-15]。从植物生活型来看,研究地所生长植物以草本植物为主,共 29 种,占锰渣库植物总物种数的 82.9%。张学洪等人^[16]对广西荔浦锰矿区植被调查也发现草本植物占了整个矿区植物的 81.2%,这反应出草本植物对恶劣环境的适应能力较强^[17]。从植物丰富度来看,锰渣库的主要优势植物为空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、加拿大飞蓬(*Erigeron canadensis*)、鸭跖草(*Commelina communis*)、商陆、日本看麦娘(*Alopecurus japonicus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria plicata*)、魁蒿(*Artemisia princeps*)和马唐(*Digitaria sanguinalis*)。

2.3 湘西锰渣库主要优势植物重金属含量

湘西典型锰渣库主要优势植物体内重金属含量见表 3。总体来看,不同植物、同种植物的不同部位对重金属的吸收特征表现出较大的差异,这可能与矿区土壤的 pH、有机质含量、重金属有效态含量等相关密切^[18-20]。与正常植物相比,除狗尾草根和野菊根外,所有植物镉含量均超出正常含量的上限值;锰渣库中加拿大飞蓬、鸭跖草、商陆、日本看麦娘体内锰含量较高,植物根部或茎叶内锰含量超出正常含量;锰渣库的加拿大飞蓬根和茎叶铅含量超出正常范围;锰渣库的空心莲子草根、野菊、加拿大飞蓬根、鸭跖草、商陆茎叶锌含量超出正常值。上述结果与锰渣中重金属含量较高有关,进一步反应了植物对重金属的吸收特征与所在基质重金属元素含量的相关性。同时,这也与祝滔等人^[21]在重庆秀山锰矿以及黄小娟等人^[22]在重庆溶溪林锰矿的调查结果一致。

表 3 湘西典型锰渣库主要优势植物重金属含量

Tab. 3 Heavy metal concentrations of the main dominant plants in the typical manganese mine tailings in Xiangxi mg · kg⁻¹

植物种类	部位	总镉	总锰	总铅	总锌
空心莲子草	茎叶	1.70±0.14	153.92±37.36	8.63±1.55	91.25±21.12
(<i>A. philoxeroides</i>)	根	2.25±0.10	631.63±70.17	26.48±3.75	174.59±30.80
鬼针草	茎叶	1.59±0.21	237.85±21.08	6.88±0.76	45.07±5.27
(<i>B. pilosa</i>)	根	3.06±0.45	204.85±49.66	13.72±1.03	72.97±6.95
野菊	茎叶	1.13±0.08	376.94±29.41	8.72±0.31	86.39±2.67
(<i>C. indicum</i>)	根	0.43±0.05	202.25±27.14	4.20±0.43	28.15±3.45
加拿大飞蓬	茎叶	2.44±0.50	124.31±29.39	69.61±6.94	105.18±11.60
(<i>E. canadensis</i>)	根	12.83±1.72	1 465.95±157.73	160.69±27.17	290.30±36.71
鸭跖草	茎叶	2.39±0.25	6 290.47±654.36	52.39±2.95	255.40±21.04
(<i>C. communis</i>)	根	4.58±1.09	2 046.02±63.60	47.29±8.25	351.57±70.10
商陆	茎叶	6.21±1.06	8 044.55±624.24	7.39±0.65	243.95±28.78
(<i>P. acinosa</i>)	根	3.85±0.56	827.83±86.66	3.65±0.80	48.40±7.68
狗牙根	茎叶	1.47±0.06	299.48±70.42	22.25±2.23	48.11±4.87
(<i>C. dactylon</i>)	根	2.53±0.66	714.14±82.78	40.40±6.53	95.55±6.09
日本看麦娘	茎叶	2.30±0.46	2 868.97±305.61	34.19±1.70	129.20±9.72
(<i>A. japonicus</i>)	根	1.47±0.45	1 853.61±218.60	41.53±15.25	121.51±13.87
魁蒿	茎叶	7.39±0.82	374.48±136.27	27.25±4.22	60.61±10.12
(<i>A. princeps</i>)	根	10.01±1.08	414.14±52.28	40.90±8.49	103.05±9.08
狗尾草	茎叶	0.89±0.13	204.81±19.40	7.87±0.81	79.03±11.89
(<i>S. plicata</i>)	根	0.51±0.06	489.71±67.82	6.96±0.19	35.30±1.88
马唐	茎叶	1.22±0.51	603.61±135.85	41.53±15.25	114.01±19.55
(<i>D. sanguinalis</i>)	根	1.30±0.13	293.97±43.08	34.19±1.70	79.20±11.16
植物正常重金属含量 ^[23]		0.2~0.8	1~700	0.1~41.7	1~160

2.4 湘西花垣锰渣库主要优势植物重金属耐性特征

在锰渣库自然生长的植物对重金属均具有一定的耐性,不同的耐性机制使植物对重金属的吸收、转移和累积特征表现出较大的差异。生物富集系数和转移系数是用来表征植物对重金属元素耐性特征的两个常用指

标^[24]。锰渣库主要优势植物对重金属元素的生物富集系数和转移系数见表 4。从生物富集系数来看,除鸭跖草和商陆对锰的生物富集系数大于 1 外,所有植物对重金属元素镉、锰、铅、锌的富集能力均较弱且生物富集系数均小于 1。这说明在锰渣库自然生长的植物可能进化出某些机制尽量减少对重金属元素的吸收或者将体内过量的重金属排出体外^[25],故这些物种可以作为锰渣库生态修复的先锋植物。从转移系数来看,野菊、鸭跖草、商陆、日本看麦娘、狗尾草、马唐对镉、锰、铅、锌的转移系数均较高,吸收重金属后表现出较强的向茎叶转移的能力。这说明它们可能发展了某种特殊的生理机制,如通过主动运输将重金属运送到液泡、叶脉、木质部等部位贮存起来,减少重金属毒性并保障植物正常生长^[26],因此这些物种可作为重金属轻度污染土壤的修复植物。空心莲子草、鬼针草、加拿大飞蓬、狗牙根和魁蒿对 4 种重金属元素的转移系数均较低且均小于 1,吸收重金属后向茎叶转移的能力较差。这说明这些植物将吸收的重金属元素囤积在根部,减少向地上部转移,从而减少对光合、呼吸、生殖系统的伤害^[27],故它们可作为重金属重度污染土壤(如尾渣库)的修复植物。

表 4 湘西典型锰渣库优势耐性植物的富集系数和转移系数

Tab. 4 Bioconcentration factor and transfer factor of the dominant plants in the typical manganese mine tailings in Xiangxi

植物种类	镉		锰		铅		锌	
	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
空心莲子草(<i>A. philoxeroides</i>)	0.10	0.75	0.10	0.24	0.04	0.33	0.25	0.52
鬼针草(<i>B. pilosa</i>)	0.23	0.52	0.06	0.76	0.02	0.50	0.11	0.62
野菊(<i>C. indicum</i>)	0.51	1.00	0.48	1.39	0.08	1.39	0.48	0.75
加拿大飞蓬(<i>E. canadensis</i>)	0.74	0.19	0.20	0.08	0.27	0.43	0.38	0.36
鸭跖草(<i>C. communis</i>)	0.34	0.52	1.04	3.07	0.11	1.11	0.58	0.73
商陆(<i>P. acinosa</i>)	0.49	1.61	1.11	9.72	0.01	2.02	0.28	5.04
狗牙根(<i>C. dactylon</i>)	0.20	0.58	0.13	0.42	0.07	0.55	0.14	0.50
日本看麦娘(<i>A. japonicus</i>)	0.18	1.56	0.59	1.55	0.09	0.82	0.24	1.06
魁蒿(<i>A. princeps</i>)	0.71	0.74	0.22	0.34	0.10	0.57	0.15	0.59
狗尾草(<i>S. plicata</i>)	0.06	1.72	0.10	0.42	0.02	1.13	0.10	2.24
马唐(<i>D. sanguinalis</i>)	0.12	0.94	0.12	2.05	0.09	1.21	0.17	1.44

注:BCF 为生物富集系数,TF 为转移系数。

3 结论

综上所述,本研究得出以下 3 点结论:1) 湘西典型锰渣库重金属镉、锰、铅、锌总量均较高,而氮、磷、钾及有机质含量相对较低,因此重金属毒性和极端贫瘠是锰渣库限制植物定居和生长的主要因素。2) 湘西典型锰渣库共记录到高等植物 35 种,隶属 32 属,15 科。主要优势植物为空心莲子草、鬼针草、野菊、加拿大飞蓬、鸭跖草、商陆、日本看麦娘、狗牙根、狗尾草和魁蒿和马唐。3) 总体来看,所有优势植物对重金属均具有一定的耐性,且不同植物对重金属的吸收和蓄积特征不同。野菊、鸭跖草、商陆、日本看麦娘、狗尾草和马唐吸收重金属后表现出较强的向茎叶转移的能力,可作为重金属轻度污染土壤的修复植物;空心莲子草、鬼针草、加拿大飞蓬、狗牙根和魁蒿吸收重金属后向茎叶转移的能力较差,可作为重金属重度污染土壤(如尾渣库)的修复植物。

参考文献:

- [1] 陈明辉,孙继茂,付益平,等.湘西州矿产资源现状及找矿方向[J].矿产与地质,2008,22(2):93-96.
CHEN M H, SUN J M, FU Y P, et al. Current status of the mineral resources in Xiangxi autonomous prefecture and the prospecting direction in this area[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(2): 93-96.
- [2] 吴建锋,宋谋胜,徐晓虹,等.电解锰渣的综合利用进展与研究展望[J].环境工程学报,2014,8(7):2645-2652.
WU J F, SONG M S, XU X H, et al. Prospects and advances of comprehensive utilization of electrolytic manganese residue[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2645-2652.
- [3] GALENDE M A, BECERRIL J M, GOMEZ-SAGASTI M T, et al. Chemical stabilization of metal-contaminated mine

- soil: early short-term soil-amendment interactions and their effects on biological and chemical parameters[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2014, 225(2): 1863-1876.
- [4] BACCHETTA G, CAPPAL G, CARUCCI A, et al. Use of native plants for the remediation of abandoned mine sites in Mediterranean semiarid environments[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 94(3): 326-333.
- [5] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物商陆[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 935-937.
XUE S G, CHEN X Y, LIN Q, et al. *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae): a new manganese hyperaccumulator plant from Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 935-937.
- [6] 唐文杰, 李明顺. 广西锰矿区废弃地优势植物重金属含量及富集特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1757-1763.
TANG W J, LI M S. Heavy metal concentrations of dominant plants and bioaccumulation in three manganese mine wastelands, Guangxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1757-1763.
- [7] ALLEN S E. *Chemical analysis of ecological materials*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [8] MCGRATH S P, CUNLIFFE C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36(9): 794-798.
- [9] SHU W S, YE Z H, ZHANG Z Q, et al. Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in Southern China[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13(1): 49-60.
- [10] RASHED M N. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals from mine tailing through age accumulation in soil and some wild plants at Southeast Egypt[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3): 739-746.
- [11] 中华人民共和国环境保护部. 土壤环境质量标准 GB 15618-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental quality standard for soils GB 15618-1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [12] 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, 1995.
China National Environmental Monitoring Centre. The background content of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [13] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 2038-2045.
YANG S X, TIAN Q J, LIANG S C, et al. Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 2038-2045.
- [14] WONG M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 775-780.
- [15] 罗亚平, 吴晓芙, 李明顺, 等. 桂北锰矿废弃地主要植物种类调查及土壤重金属污染评价[J]. *生态环境*, 2007, 16(4): 1149-1153.
LUO Y P, WU X F, LI M S, et al. Investigation of main plant species and assessment of soil heavy metal pollutions in manganese mine wastelands in north Guangxi[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1149-1153.
- [16] 张学洪, 刘杰, 黄海涛, 等. 广西荔浦锰矿废弃地植被及优势植物重金属生物蓄积特征[J]. *地球与环境*, 2006, 34(1): 13-18.
ZHANG X H, LIU J, HUANG H T, et al. Bioaccumulation of heavy metals by dominant plants growing in Lipu Manganese mine, Guangxi, China[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(1): 13-18.
- [17] 刘鸿雁, 邢丹, 肖玖军, 等. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3217-3224.
LIU H Y, XING D, XIAO J J, et al. Interactions between natural vegetation succession and waste residue in lead-zinc tailings deposited sites[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3217-3224.
- [18] 陈牧霞, 地里拜尔, 苏力坦, 杨潇, 等. 新疆污灌区重金属含量及形态研究[J]. *旱区资源与环境*, 2007, 21(1): 150-154.
CHEN M X, DILIBAR S, YANG X, et al. Research on concentration and chemical speciation of heavy metal sin sewage irrigated soil of Xin Jiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(1): 150-154.
- [19] CALVET R, BOURGEOIS S, MSAKY J J. Some experiments on extraction of heavy metals present in soil[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1990, 39(1): 31-45.
- [20] RAMOS L, HERNANDEZ L, GONZALEZ M J. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana national park[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 50-57.
- [21] 祝滔, 江长胜, 郝庆菊, 等. 重庆秀山锰矿区土壤和植物锰污染调查与评价[J]. *环境科学*, 2012, 35(9): 167-172.
ZHU T, JIANG C S, HAO Q J, et al. Investigation and assessment of contaminated soils and plants by Mn in manganese mining area in Xiushan autonomous county of Chongqing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(9): 167-172.
- [22] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4201-4211.
HUANG X J, JIANG C S, HAO Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals

- by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15):4201-4211.
- [23] 曹鉴燎, 池柏良. 都市生态走廊[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- CAO J L, CHI B L. City ecological corridor[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
- [24] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ZHOU Q X, SONG Y F. Remediation of contaminated soils: principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [25] BAKER A J M. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4):643-654.
- [26] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P B A, et al. Phytoremediation; a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Nature Biotechnology*, 1995, 13(5):468-474.
- [27] MENDEZ M O, MAIER R M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—a emerging remediation technology[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, 116(3):278-283.

Species and Heavy Metal Tolerance of Main Dominant Plants in Manganese Mine Tailings, Xiangxi

LI Fengmei¹, YANG Shengxiang¹, CAO Jianbing², PENG Qingjing¹, FU Daijun¹, LONG Hualai¹

(1. College of Bio-resources and Environmental Science, Hunan Provincial Engineering Laboratory of Control and Remediation of Heavy Metal Pollution from Mn-Zn Mining and Collaborative Innovation Center of Manganese-Zinc-Vanadium Industrial Technology (the 2011 Plan of Hu'nan Province), Jishou University, Jishou Hu'nan 416000;

2. Huayuan Environmental Protection Bureau, Huayuan Hu'nan 416000, China)

Abstract: [Purposes] To revegetate the manganese mine tailings. [Methods] An extensive vegetation survey was carried out in the typical manganese mine tailings in Xiangxi and determination of heavy metals in plants and the corresponding soils were applied. [Findings] There were 35 species belonging to 32 genera and 15 families in the typical manganese mine tailings, Xiangxi. The main dominant species were *Alternanthera philoxeroides*, *Bidens pilosa*, *Chrysanthemum indicum*, *Erigeron Canadensis*, *Commelina communis*, *Phytolacca acinosa*, *Alopecurus japonicus*, *Cynodon dactylon* and *Setaria plicata*, *Artemisia princeps*, *Digitaria sanguinalis*. The concentrations of Cd, Mn, Pb, and Zn in these plants were over than that in the plants which lived in normal soil. These plants can adapt to the unfavorable edaphic conditions of the manganese mine tailings and were tolerant to heavy metals. And the average content of Cd, Mn, Pb, and Zn in the mine tailings was 22.15, 7442.16, 824.04, 1096.64 mg·kg⁻¹, respectively, which were obviously over Soil Environmental Quality Standard Three and distinctly higher than the mean value of the four heavy metal elements (Cd, Mn, Pb, and Zn) in the control to the Hunan Province's level. *C. indicum*, *C. communis*, *P. acinosa*, *A. japonicus*, *S. plicata* and *D. sanguinalis* whose transfer factors (TFs) were over 1 absorbed and transferred metals to the shoots, which indicated that they can be used to clean up the soils containing light to moderate toxic metal concentration. *A. philoxeroides*, *B. pilosa*, *E. Canadensis*, *C. dactylon* and *A. princeps* whose TFs were less than 1 absorbed and held metals in the roots, which suggested that they were suitable for remediation of the mine land with high heavy metals concentration, including mine tailings. [Conclusions] The excluder was more suitable for remediation of the mine wastelands with high heavy metal concentration, low-value and extensive area.

Keywords: manganese mine tailings; dominant plant; heavy metal tolerance; Xiangxi

(责任编辑 方 兴)