

不同土壤生境下斑茅对重金属的富集特征^{*}

黄红英¹ 徐 剑^{1**} 白 音¹ 张伟群² 朱 飞³ 李 婷¹ 王晓维¹ 安超华¹

(¹韶关学院英东生命科学学院, 广东韶关 512005; ²韶关市农业科学研究所, 广东韶关 512029; ³韶关技师学院农牧系, 广东韶关 512023)

摘 要 为了筛选 Cu、Zn、Pb、Cd 多重金属离子的富集植物, 对不同土壤生境(铜铁矿、钨矿、铅锌矿和无矿场污染)的优势种斑茅(*Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet)对 Cu、Zn、Pb、Cd 离子富集情况进行了调查。结果表明, 斑茅对 Cu、Zn、Pb、Cd 离子有富集优势并以 Cu 富集显著, 斑茅根系土壤与斑茅地上部 Cu 含量存在相关性($P < 0.05$), 斑茅对 Pb 和 Cd 的富集与转运存在极显相关性($P < 0.01$); 在强酸、多金属污染弃耕农田土壤中, 斑茅不仅符合 Cu 超富集植物的特征, 而且其对 Zn、Pb 和 Cd 3 种重金属的富集系数和转运系数均 > 1 。在 Cd、Cu、Pb 和 Zn 均低于国家土壤环境质量二级标准(GB 15618–1995)的弃耕农田中, 斑茅对 Cu、Zn 和 Cd 的富集系数均 > 1 。研究表明, 斑茅可以作为 Cu、Zn、Pb、Cd 多金属污染土壤的富集植物进行人工修复。

关键词 土壤生境; 斑茅; 重金属

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1000–4890(2012)4–0961–06

Enrichment of heavy metals in *Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet in different soil habitats. HUANG Hong-ying¹, XU Jian^{1**}, BAI Yin¹, ZHANG Wei-qun², ZHU Fei³, LI Ting¹, WANG Xiao-wei¹, AN Chao-hua¹ (¹College of Yingdong Life Science, Shaoguan University, Shaoguan 512005, Guangdong, China; ²Shaoguan Institute of Agricultural Science, Shaoguan 512029, Guangdong, China; ³Department of Agriculture and Animal Husbandry, Shaoguan Technician Institute, Shaoguan 512023, Guangdong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 961–966.

Abstract: Metal ores mining and processing have caused serious pollution of different environmental compartments, and the soil heavy metal contamination around mining areas is of great concern because of its potential health risk to the local inhabitants. In order to screen the phyto-accumulators of heavy metals, an investigation was conducted on the enrichment of heavy metals (Cu, Zn, Pb and Cd) by the dominant species *Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet growing on the different soil habitats in the vicinity of Dabaoshan copper ore mine, Ruyuan tungsten mine, and Renhua lead and zinc mine in Guangdong Province of South China, taking the Ruyuan non-polluted site as the control. By means of field sampling and chemical analysis, the concentrations of Cu, Zn, Pb and Cd in *S. arundinaceum* and soil were determined. The results showed that *S. arundinaceum* had the advantages in accumulating Cu, Zn, Pb and Cd, especially Cu. There was a significant correlation between the Cu concentrations in the sampling soils and sampling *S. arundinaceum* shoots ($P < 0.05$), and between the enrichment and transportation of Pb and Cd by *S. arundinaceum* ($P < 0.01$). In strong acidic and multi-metals contaminated soil environment, *S. arundinaceum* was featured with high enrichment capacity, which reflected the characteristics of *S. arundinaceum* as a Cu hyperaccumulator, and the enrichment factor and transport coefficients of Zn, Pb and Cd were greater than 1. For the *S. arundinaceum* growing on the abandoned farmland in which the concentrations of soil Cd, Cu, Pb and Zn were below the National Soil Environmental Quality Standards of Grade II (GB 15618–1995), the enrichment

^{*} 韶关市科技计划项目(韶科 2010-67)和韶关学院科研项目(韶学院 2010-207)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: xuj@sgu.edu.cn

收稿日期: 2011-08-15 接受日期: 2011-12-05

factor of Cu, Zn and Cd was all greater than 1. This study showed that *S. arundinaceum* could be used as one of remediation plants for the abandoned farmlands contaminated by multi-metals Cu, Zn, Pb, and Cd.

Key words: soil habitat; *Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet; heavy metal.

韶关市蕴含丰富的矿产资源,是我国重要的矿产基地,已探明储存的矿种 88 种,拥有大宝山矿业有限公司、凡口铅锌矿和韶关冶炼厂等一批以矿产采选和冶金的大型企业。采选和冶金产生的富含硫(S)、镉(Cd)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)等多种重金属的矿山废水以及选矿和洗矿产生的重金属污水是导致附近农田和水体严重污染的主要原因(李丽等,2010),迫使很多农田被弃耕,生产的粮食作物重金属含量严重超标,给周围居民身体健康带来威胁(邹晓锦等,2008a;Zhuang *et al.*, 2008, 2009)。韶关地区由于矿厂污染导致环境恶化引起了许多学者的关注,主要对大宝山矿(周建民等,2004; Zhou *et al.*, 2007; Zhuang *et al.*, 2008, 2009)和铅锌矿(束文圣等,2001;王凡路等,2003)土地污染发生机制、污染评价体系(杨清伟等,2003, 2007;郑佳佳等,2008;黄穗虹等,2009)和综合治理修复(林初夏等,2003;束文圣等,2003;邹晓锦等,2008b)等方面开展了研究,有铅锌尾矿恢复植物调查报道(Shu *et al.*, 2000;孙庆业等,2001;阳承胜等,2001),和大宝山矿污染土壤超富集植物筛选的报道(黄红英等,2001a)。

斑茅(*Erianthus arundinaceus* (Retz.) Jeswiet)又名大密、芭茅、大巴茅,是甘蔗属多年生、密丛高大草本,是与甘蔗近缘的野生种之一,因其抗旱耐瘠、宿根性好、分蘖力强、分布广而受到甘蔗育种家们的重视(周耀辉,1989)。学者对斑茅的植物学性状(杨清辉等,1997)、能源潜力植物(鄢家俊等,2009)、组织培养(李富生等,1998)、斑茅染色体(杨清辉等,1997)和多态性分析(张木清等,2004)进行

了研究,斑茅作为原位自然植被超富集植物筛选及应用见报道(黄红英等,2011b)。斑茅是韶关地区撂荒地及污染弃耕农田常见的植物,在弃耕多年农田土壤上成为了单一的优势种群。本研究分析了不同土壤生境下的斑茅对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的富集与转运能力,旨在为筛选适合韶关地区生长的多种重金属超富集植物提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

随机选取水源来自铜铁矿、钨矿、铅锌矿及无采矿场的附近土壤作为研究样地,样地的生境见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 植物及土壤取样 每个样地选取采用梅花法挖取斑茅 6 株,计数每株斑茅的分蘖株数、测量株高和根系长度,并采集根系下土壤,来分别进行斑茅植株和根系下土壤中 Pb、Zn、Cd 和 Cu 含量测定。此外,还对每个样地的灌溉水和土壤的酸碱度进行测定。

1.2.2 土壤处理 取自不同样地的土壤样品进行室温风干,四分法取部分样品用研钵捣碎,过 100 目筛,在 110 ℃烘箱中干燥 24 h 后保存在干燥器皿中备用。所用容器使用前均用 20% 的 HNO₃ 浸泡 24 h 以上做净化处理,以避免样品遭受各种可能性污染。

1.2.3 植物处理 不同样地采集的斑茅分地上部分和地下部分进行漂洗、杀青、干燥和研磨。漂洗用自来水充分冲洗后,经蒸馏水洗净,再用去离子水冲洗;杀青采用恒温干燥箱在 105 ℃条件下烘 30 min,干燥采用恒温干燥箱在 70 ℃下烘至恒重,研磨并经

表 1 不同样地斑茅的生境
Table 1 Different soil habitats of *Saccharum arundinaceum*

样地	所属地区	地理位置	水源背景	土壤类型	土地耕作情况	斑茅生长情况
新温屋村弃耕农田	韶关市曲江区沙溪镇	24°46'42. 31"N, 113°39'55. 81"E	铜铁矿(生产中)	水稻壤	弃耕	优势种
桐子坪村弃耕农田	韶关市乳源县一六镇	24°48'48. 11"N, 113°26'10. 01"E	地下水(周围无采矿场)	水稻壤	弃耕	单一斑茅群落
下塘村河滩	韶关市乳源县一六镇		钨矿(已停产)	沙质土	撂荒	优势种
下塘村旱地	韶关市乳源县一六镇			沙质土	弃耕	单一斑茅群落
简屋村尾矿库坝	韶关市仁化县董塘镇	25°00'07. 16"N, 113°36'05. 61"E	铅锌矿场库外排水(生产中)	山地红壤	撂荒	偶见种

100 目筛后保存在干燥器皿中备用。

1.2.4 土壤及植物分析方法 土壤重金属含量采用盐酸:硝酸:高氯酸的体积比为 5 : 5 : 2 的消解方法,植物样品的重金属含量采用硝酸:高氯酸的体积比为 4 : 1 的消解方法;消解后土壤和植物样品用火焰原子吸收分光光度计(日立 Z-2300,±0.001 mg · kg⁻¹)行测定,Cd、Pb、Cu 和 Zn 的波长分别为 22818、28313、32418 和 21318 nm,每样测定重复 3 次。土壤和水 pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定,土液质量比 1 : 2.5。以中华人民共和国国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)(土壤 pH<6.5,土壤环境质理标准值(mg · kg⁻¹)是:Cd ≤ 0.3, Cu ≤ 50, Pb ≤ 250, Zn ≤ 200;土壤 pH 在 6.5 ~ 7.5 的标准值是:Cd ≤ 0.6, Cu ≤ 100, Pb ≤ 300, Zn ≤ 250)和农田灌溉水质标准(GB 5084-92)(旱作 pH 5.5 ~ 8.5)进行对比分析。并采用 DPS 统计软件对土壤、斑茅地下部和地上部之间重金属含量进行一元线性回归方程的显著性检验。

1.3 植物富集重金属的评价方法

1.3.1 富集指标

富集系数=植物体某重金属含量/土壤中某重
金属含量

转运系数=植物地上部的某重金属含量/地下
部分的某重金属含量

1.3.2 超富集植物特征 超富集植物判断标准日前采用较多的是 Brooks(1998)的论述以及 McGrath 和 Zhao(2003)的修订,超富集植物应同时具备以下 3 个基本特征:1)植株地上部(干重)重金属临界含量为 Zn、Mn>10000 mg · kg⁻¹, Co、Cu、Ni、Si、Pb>1000 mg · kg⁻¹,Cd>100 mg · kg⁻¹;2)植物地上部重金属含量大于根部该种重金属含量;3)植物地上部富集系数>1。

2 结果与分析

2.1 不同生境下斑茅形态特征及根系土壤 pH 变

化情况

由于灌溉水源背景及土地利用方式不同,不同样地斑茅根系土壤 pH 及斑茅地上部生长有差别,从不同样地斑茅的分布看:斑茅在新温屋村弃耕农田和下塘村河滩是优势种,在桐子坪村弃耕农田和下塘村弃耕旱地以单一斑茅群落分布,在简屋村尾矿库坝是偶见种。以样地斑茅分蘖数多少和按冠幅大小排序:新温屋村>桐子坪村>简屋村>下塘村,按株高大小排序:桐子坪村>下塘村>新温屋村>简屋村(表 1、表 2)。

2.2 不同生境下斑茅根系土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量

由表 3 可见,以国家土壤环境质量二级标准评判 5 个样地土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的分布概况为:桐子坪村(土壤 pH 在 6.5 ~ 7.5)Cd、Cu、Zn、Pb 含量均低于标准;新温屋村(土壤 pH<6.5)除 Pb 含量低于标准外,Cu、Zn、Cd 超出标准;下塘村(土壤 pH<6.5)Cu 含量低于标准、Zn、Pb 和 Cd 均超出标准,简屋村(土壤 pH 在 6.5 ~ 7.5)Cu、Zn、Pb 和 Cd 均超出标准。综合 5 个样地 Pb、Zn、Cd 和 Cu 含量污染程度排序为:简屋村>下塘村>新温屋村>桐子坪村;铜铁矿生产主要造成新温屋村 Cu、Zn 和 Cd 的污染,钨矿和铅锌矿生产主要造成下塘村和简屋村 Pb、Zn 和 Cd 的污染。上游钨矿停产多年但是下游的河滩和旱地土壤多种重金属污染依然严重,再次证明被污染土壤修复难的特性,下游河滩和旱地水源相同,但人为耕作干扰不同,土壤中金属含量差异不大,河滩比旱地略低。

研究表明,以铜铁矿尾矿水作为灌溉水新温屋村土壤以 Cu 和 Cd 污染严重,其次是 Zn 轻度污染;钨矿和铅锌矿尾矿水灌溉的土壤以 Zn、Pb 和 Cd 污染为主,韶关地区矿场周围的土壤以 Cd 污染最为广泛,综合 4 个样地 Cu、Zn、Pb 和 Cd 污染程度排序为:简屋村>下塘村>新温屋村。

表 2 不同样地斑茅形态特征及根系土壤 pH 变化情况
Table 2 Morphological characteristics and root system soil pH of *Saccharum arundinaceum* collected from different plots

样地	灌溉水 pH	土壤 pH	斑茅		
			株高(m)	分蘖数(株·丛 ⁻¹)	冠幅(m ²)
新温屋村弃耕农田	5.01±0.01	3.84±0.01	1.98±0.25	24.33±7.61	0.40±0.17
桐子坪村弃耕农田	6.38±0.01	7.23±0.05	2.90±1.15	19.17±2.40	0.18±0.09
下塘村河滩	6.36±0.01	6.07±0.02	2.79±0.60	8.67±4.37	0.04±0.01
下塘村旱地	6.21±0.01	5.74±0.04	2.33±0.42	16.00±4.05	0.07±0.02
简屋村尾矿库坝	9.61±0.01	7.24±0.03	1.77±0.27	17.83±12.11	0.11±0.03

数据为平均值±SD。

表 3 不同生境下斑茅对 Pb、Zn、Cd 和 Cu 的富集
Table 3 Accumulation of *Saccharum arundinaceum* to Pb, Zn, Cd and Cu in different soil habitats

			新温屋村	桐子坪村	下塘村河滩	下塘村旱地	简屋村
重金属含量 (mg · kg ⁻¹)	土壤	Cu	332. 8±1. 0	14. 4±0. 0	51. 5±0. 4	48. 2±0. 2	128. 1±2. 1
		Zn	289. 2±0. 8	56. 4±0. 3	504. 9±1. 8	521. 1±1. 1	2533. 7±22. 5
		Pb	76. 5±0. 1	47. 1±0. 5	355. 2±0. 4	370. 4±1. 4	1174. 5±24. 3
		Cd	1. 2±0. 0	0. 6±0. 0	7. 2±0. 1	7. 8±0. 0	17. 7±0. 2
	斑茅	Cu 地上部	2247. 5±31. 2	57. 0±0. 6	40. 80±0. 2	61. 5±0. 6	55. 4±0. 2
		地下部	75. 3±0. 4	182. 7±2. 0	99. 9±8. 1	61. 0±0. 1	54. 9±1. 1
		Zn 地上部	1545. 3±26. 2	78. 0±0. 1	111. 5±1. 6	146. 8±4. 5	107. 0±2. 2
		地下部	328. 6±3. 2	244. 9±3. 1	985. 2±7. 4	281. 0±4. 5	611. 3±7. 6
		Pb 地上部	127. 6±1. 8	7. 2±0. 1	10. 7±0. 1	14. 9±0. 1	11. 4±11. 4
		地下部	4. 4±0. 1	21. 5±0. 1	160. 6±2. 0	161. 0±1. 9	262. 9±2. 4
		Cd 地上部	4. 9±0. 0	0. 3±0. 0	0. 2±0. 0	0. 8±0. 0	0. 3±0. 0
		地下部	1. 9±0. 1	0. 8±0. 0	5. 3±0. 2	2. 7±0. 1	2. 6±0. 0
富集系数	Cu	地上部	6. 8	3. 4	0. 8	1. 3	0. 4
		地下部	0. 2	12. 7	1. 9	1. 3	0. 4
	Zn	地上部	5. 3	1. 4	0. 2	0. 3	0. 04
		地下部	1. 1	4. 3	2. 0	0. 5	0. 2
	Pb	地上部	1. 7	0. 2	0. 03	0. 04	0. 01
		地下部	0. 06	0. 5	0. 5	0. 4	0. 2
	Cd	地上部	4. 2	0. 5	0. 03	0. 1	0. 02
		地下部	1. 6	1. 3	0. 7	0. 3	0. 2
转运系数	Cu		29. 9	0. 3	0. 4	1. 0	1. 0
	Zn		4. 7	0. 3	0. 1	0. 5	0. 2
	Pb		20. 1	0. 3	0. 1	0. 1	0. 04
	Cd		2. 7	0. 4	0. 04	0. 3	0. 1

2.3 不同生境下斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集及转运特征

2.3.1 不同生境下斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集特征 从表 3 可知,新温屋村斑茅地上部对 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种金属离子的富集系数分别为:6.8、5.3、1.7 和 4.2,地下部对 Zn 和 Cd 的富集系数系数分别为:1.1 和 1.6,地上部对 Cu 富集量(2247.5 mg · kg⁻¹)超过超富集植物 Cu 吸收量(1000 mg · kg⁻¹),且斑茅地上部含量(2247.5 mg · kg⁻¹)大于地下部含量(75.3 mg · kg⁻¹),地上部 Cu 的富集系数(6.8)和转运系数(29.9)均>1,具备 Cu 超富集植物的特征(黄红英等,2011c)。

桐子坪村斑茅地上部对 Cu、Zn 富集系数分别为:4.0 和 1.4,地下部对 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属离子的富集系数分别为:12.7、4.3、0.5 和 1.3,说明桐子坪村的斑茅对 Cu 和 Zn 有富集优势外,其地下部对 Pb 和 Cd 也有富集优势。

综合下塘村河滩和旱地斑茅地上部与地下部对 Cu 均表现有富集优势外,地下部对 Zn 富集也有优势,河滩斑茅比旱地斑茅略有优势,体现在河滩斑茅地下部对 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属富集系数比旱

地高。

简屋村的斑茅地上部和地下部均未表现对 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属离子富集优势,富集系数低。

2.3.2 不同生境下斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的转运特征 5 个样地中,新温屋村样地的斑茅对 Cu、Pb、Zn、Cd 转运系数均>1,下塘村河滩和简屋村的斑茅对 Cu 转运系数>1,其余样地斑茅对 Cu、Pb、Zn、Cd 转运系数均<1。

2.3.3 土壤、斑茅地下部和地上部之间重金属含量进行一元线性回归方程的显著性检验 从表 4 可知,斑茅根系土壤与斑茅地上部重金属 Cu-Cu 之间存在相关性($P<0.05$),说明斑茅对 Cu 的吸附具有优势,随着土壤中重金属污染的程度加重,吸附量也增加;富集系数和转移系数只有 Pb-Pb 和 Cd-Cd 有显极显著相关性($P<0.01$),说明斑茅对 Pb、Cd 吸附越多,相应地向地上部分转运的 Pb、Cd 也越多。

综合不同土壤生境斑茅对 Pb、Zn、Cd 和 Cu 的富集系数和转运系数总体上以新温屋村>桐子坪村>下塘村>简屋村,呈现高污染低富集、低污染高富集的特征,土壤强酸促进斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 富集和转运。

表 4 土壤、斑茅地下部和地上部之间重金属含量的关系
Table 4 Relationships among heavy metal concentrations in soil, roots and shoots of plants

x	y	回归方程	R ²	F	P
土壤	Cu 地上部	Cu y=7. 2148x-337. 3467	0. 90 *	25. 63	0. 02
	Zn	Zn y=-0. 1753x+534. 6176	0. 07	0. 24	0. 66
	Pb	Pb y=-0. 0442x+52. 19707	0. 15	0. 53	0. 52
	Cd	Cd y=-0. 1378x+2. 268577	0. 22	0. 83	0. 43
地下部	Cu 地上部	Cu y=-3. 9454x+886. 2553	0. 04	0. 14	0. 74
	Zn	Zn y=-0. 5939x+688. 8056	0. 08	0. 27	0. 64
	Pb	Pb y=-0. 2808x+68. 60116	0. 34	1. 54	0. 30
	Cd	Cd y=-0. 3542x+2. 26098	0. 08	0. 28	0. 64
富集系数	Cu 转运系数	Cu y=0. 0015x+5. 639227	0. 01	0. 02	0. 91
	Zn	Zn y=0. 0046x-0. 26719	0. 44	2. 37	0. 22
	Pb	Pb y=0. 1473x-6. 25376	0. 95 **	57. 35	0. 01
	Cd	Cd y=0. 0047x-0. 138	0. 95 **	55. 61	0. 01

** P<0. 01, * P<0. 05。

3 讨 论

大宝山矿区土壤重金属污染兼具有强酸性特征 (Zhou *et al.* ,2007) ,矿区附近的蔬菜与作物可将污染土壤中的有害重金属在其叶、根等部位积累,进而通过食物链对人体健康产生风险 (Zhuang *et al.* , 2009) ,若不加以土壤修复保护措施,土壤污染将有加重趋势 (Zhou *et al.* ,2007) 。综合不同土壤生境斑茅生长及分布特点,在大宝山矿区污染农耕废弃土壤和钨矿污染河滩沙质土上构成植物群落的优势种,在钨矿污染农耕废弃沙质土和无污染的农耕废弃土壤上生长演替为单一斑茅植物群落,说明斑茅对多重金属的耐受性外,人为耕作充当改良剂的作用,改善土壤理化性质同时提高了土壤 pH 值并释放出植物营养元素 (K、Ca 和 Mg 等) 是促进植株生长的主要原因 (邹晓锦等,2008b) 。综合铜铁矿、钨矿、铅锌矿和无矿场污染土壤上斑茅对 Pb、Zn、Cd 和 Cu 的富集和转运特点,总体呈现土壤强酸性高富集、无污染高富集和高污染低富集的特征,导致同一植物不同土壤生境下 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集和转运有差别,与土壤 pH、多金属污染程度及土壤性质有关,大宝山矿区土壤呈现强酸性导致斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集系数和转运系数均大于 1,与邹晓锦等 (2008b) 研究的土壤较低的 pH 值可导致碳酸盐和氢氧化物结合态重金属的溶解释放,进而促进植物对金属离子的吸收和利用的结果一致。下塘村河滩和旱地,污染背景相同人为耕作差别,河滩斑茅比旱地略有富集优势,说明人为耕作对斑茅的生长有影响对斑茅对重金属的富集功能影响不

大。简屋村和桐子坪村土壤 pH 相近重金属污染背景不同,简屋村土壤是 Cu、Zn、Pb 和 Cd 高污染,桐子坪村土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量符合国家二级标准的安全无污染,而斑茅对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 富集优势桐子坪村远高于简屋村,导致这种差别出现除了水源、土壤性质及人为耕作差别外斑茅是否还存在耐多重金属混合污染的回避机制 (邢丹和刘鸿雁, 2009) ,有待于后续的研究探讨。

大宝山污染弃耕农田上斑茅具备 Cu 超富集植物的特征,根据对斑茅根系土壤、斑茅地下部和地上部之间重金属含量关系进行一元回归相关性分析结果,斑茅根系土壤与斑茅地上部重金属只有 Cu-Cu 之间存在相关性,孙约兵等 (2008) 研究表明,铅锌尾矿区植物地上部重金属与土壤之间只有 Cu-Cu 显极相关性 ($P<0. 01$) ,与本研究结果相似,而本研究富集系数和转移系数 Pb-Pb 和 Cd-Cd 也有极显著相关性 ($P<0. 01$) ,说明斑茅不仅对 Cu 有富集优势,对 Pb 和 Cd 也有转运优势。这与大宝山土壤以 Cu 为主的多金属复合污染相关。

本研究表明,斑茅能在铜铁矿、钨矿、铅锌矿等多金属尾矿水污染土壤背景下生长,而且在株高 (1. 8 ~ 2. 9 m) 和分蘖 (8 ~ 24 株 · 丛⁻¹) 方面显示出生长优势成为优势种,耐酸碱区域广 (pH 3. 84 ~ 7. 24) ,此外还具备区域分布非常广泛,在我国的河南、陕西、浙江、江西、湖北、湖南、福建、台湾、广东、海南、广西、贵州、四川、云南等省区都有大量的野生分布 (鄢家俊,2009) ,容易人工进行分蘖无性繁殖 (李富生等,1998) ,后期回收多种用途 (编席、造纸及农村燃料) (鄢家俊等,2009) ,复耕容易 (斑茅根系属于须根,挖除容易) 等优点,在矿山污染土壤上人工种植斑茅具有多种优势,可以弥补已经报道的大多数超富集植物生长慢生物量小、区域性分布较强、难引种、富集重金属单一和引种有生物入侵风险的不足 (刘维涛和周启星,2010) 。因此,斑茅可作为大宝山矿区多种重金属污染土壤下植物修复的先锋植物种,可在该区域扩大栽植,加速矿区土壤污染的修复。

参考文献

黄穗虹,田 甜,邹晓锦,等. 2009. 大宝山矿周边污染土壤重金属生物有效性评估. 中山大学学报 (自然科学版), 48 (4) : 125-136.
黄红英,徐 剑,白 音,等. 2011. 大宝山污染弃耕农田不同植物对重金属的吸收与富集特征. 广东农业科学,

- 38(20): 142-144.
- 李 丽, 王富华, 王 旭, 等. 2010. 韶关土壤重金属污染状况. 农业环境与发展, (1): 74-76.
- 李富生, 杨清辉, 肖凤回, 等. 1998. 斑茅幼叶的组织培养. 植物资源与环境, 7(1): 63-64.
- 林初夏, 龙新宪, 童晓立, 等. 2003. 广东大宝山矿区生态环境退化现状及治理途径探讨. 生态科学, 22(3): 205-210.
- 刘维涛, 周启星. 2010. 重金属污染预防品种的筛选与培育. 生态环境学报, 19(6): 1452-145.
- 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 等. 2003. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践. 生态学报, 23(8): 1629-1639.
- 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 2001. 广东乐昌铅锌尾矿的酸化潜力. 环境科学, 22(3): 113-117.
- 孙庆业, 蓝崇钰, 黄铭洪, 等. 2001. 铅锌尾矿上自然定居植物. 生态学报, 21(9): 1457-1462.
- 孙约兵, 周启星, 任丽萍, 等. 2008. 青城子铅锌尾矿区植物对重金属的吸收和富集特征研究. 农业环境科学学报, 27(6): 2166-2171.
- 王凡路, 吴瑞琴, 杨 兵, 等. 2003. 凡口铅锌矿湿地系统沉积物中重金属的分布. 生态环境, 12(3): 292-295.
- 邢 丹, 刘鸿雁. 2009. 铅锌矿区重金属耐性植物与超富集植物筛选研究进展. 安徽农业科学, 37(7): 3208-3209, 3329.
- 鄢家俊, 白史旦, 梁绪振, 等. 2009. 生物质能源潜力植物——斑茅种质资源考察与收集. 草业与畜牧, 160(3): 29-31.
- 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣, 等. 2001. 凡口宽叶香蒲湿地植物群落恢复的研究. 植物生态学报, 26(1): 101-108.
- 杨清辉, 李富生, 肖凤回, 等. 1997. 斑茅染色体和植物学性状观察研究. 云南农业大学学报, 12(4): 253-256.
- 杨清伟, 束文圣, 蓝崇钰. 2007. 乐昌铅锌矿区蔬菜重金属含量与适种性评价. 金属矿山, (12): 126-127.
- 杨清伟, 束文圣, 林 周, 等. 2003. 铅锌矿废水重金属对土壤-水稻的复合污染及生态影响评价. 农业环境科学学报, 22(4): 385-390.
- 张木清, 洪艺均, 李奇伟, 等. 2004. 中国斑茅种质资源分子多态性分析. 植物资源与环境学报, 13(1): 1-6.
- 郑佳佳, 姜 晓, 张晓军. 2008. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价. 环境科学与技术, 31(11): 137-145.
- 周建民, 党 志, 司徒粤, 等. 2004. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究. 环境科学学报, 23(6): 1172-1176.
- 周耀辉. 1989. 斑茅分类地位的研究. 甘蔗糖业, (6): 4-6.
- 邹晓锦, 仇荣亮, 黄穗虹, 等. 2008. 广东大宝山复合污染土壤的改良及植物复垦. 中国环境科学, 28(9): 775-780.
- 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 2008. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究. 环境科学学报, 28(7): 1406-1412.
- Brooks RR. 1998. Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals. Wallingford: CBA International.
- McGrath SP, Zhao FJ. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 14: 277-282.
- Shu WS, Zhang ZQ, Huang LN, *et al.* 2000. Pb, Zn and Cu tolerance and accumulation in populations of *Paspalum distichum*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 39: 82-86.
- Zhou JM, Dang Zh, Cai MF, *et al.* 2007. Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan mine, Guangdong Province, China. *Pedosphere*, 17: 588-594.
- Zhuang P, McBride MB, Xia HP, *et al.* 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of the Total Environment*, 407: 1551-1561.
- Zhuang P, Zou B, Li NY, *et al.* 2008. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: Implication for human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 31: 707-715.

作者简介 黄红英,女,1967年生,研究方向为土壤生态学。

E-mail: ydswlhy@yahoo.com.cn

责任编辑 魏中青
