

会泽铅锌矿渣堆周边 7 种野生植物 重金属含量及累积特征研究

秦 丽, 祖艳群, 李 元*, 王吉秀, 李 博, 李建国, 金显存

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:调查了云南会泽铅锌矿冶炼矿渣堆周边野外植物, 采样分析了土壤和植物重金属含量, 研究了植物重金属累积特征。研究表明: 该矿渣堆周边土壤污染以 Cd 最为严重, 平均含量为 $101 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是云南土壤背景值的 462 倍; 其次是 Zn ($9065 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Pb ($3244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别是云南土壤背景值的 101 倍和 80 倍。采集到的 7 种植物中, 土荆芥 (*Chenopodium ambrosioides* L.)、芨芨草 (*Achnatherum splendens* Trin. Nevski) 和莎草 (*Cyperus microiria* Steud) 体内 Cd 含量较一般植物高出 105~112 倍。土荆芥的 Cd 转运系数为 2.5, 具有较高的 Cd 转运能力; 芨芨草和莎草的 Cd 富集系数均大于 1, 具有较强的 Cd 富集能力。这 3 种植物对 Cd 的吸收特性值得进一步研究。芨芨草和莎草体内 Pb 含量分别为 2045 、 $1623 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 达到 Pb 富集植物临界含量标准。野葵 (*Malva verticillata* L.) 的 Zn 转运系数高达 4.1, 具有很强的 Zn 转运能力。狗牙根 (*Cynodon dactylon* L. Pers.) 的 Pb、Zn、Cd 转运系数均大于 1。这 5 种植物对重金属具有很强的富集能力, 可作为 Pb、Zn 和 Cd 污染土壤植物修复的富集植物, 对铅锌矿废弃地及尾矿区重金属污染土壤的修复治理具有重要的意义。

关键词: 铅锌矿渣; 重金属; 超富集植物; 富集系数; 转运系数

中图分类号: X503.23 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)08-1558-06 doi:10.11654/jaes.2013.08.010

Heavy Metal Contents and Accumulation Characteristic of Seven Wild Plants from the Slagheap Surrounding of Huize Lead-zinc Tailings

QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan*, WANG Ji-xiu, LI Bo, LI Jian-guo, JIN Xian-cun

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: A field survey on wild plants growing in the slagheap surrounding of Huize lead-zinc tailings was carried out. The samples of plants and soils were collected. The contents of Cd, Pb and Zn in plants and soil were measured. The heavy metal accumulation characteristics of seven wild plants were studied. The results showed that the soil from the slagheap surrounding of lead-zinc mining tailings was contaminated by cadmium. The average content of Cd was $101 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was 462 times of the background level of soil in Yunnan Province. The average contents of Zn and Pb were $9065 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which were 101 times and 80 times of the background levels of soil in Yunnan Province. It was found that the seven wild plants had different abilities of uptake and accumulation of Pb, Zn, Cd. The contents of Cd in *Chenopodium ambrosioides* L., *Achnatherum splendens* Trin. Nevski and *Cyperus microiria* Steud were more than $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which were 105~112 times higher than that in normal plants ($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The transfer coefficient of Cd in *C. ambrosioides* was 2.5, indicating high transportation capacity of Cd. The bioconcentration coefficient of Cd in *A. splendens* and *C. microiria* were higher than 1, indicating high bioconcentration capacity of Cd. It suggests that the Cd absorption characteristics of these three plants need further researches. The contents of Pb in *A. splendens* and *C. microiria* were $2045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1623 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which exceeded the threshold value ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) as a Pb hyperaccumulator. The Zn transfer coefficient of *Malva verticillata* L. was up to 4.1, showing a strong transfer ability to Zn. The transfer coefficient of *Cynodon dactylon* L. Pers. to Pb, Zn and Cd were more than 1. In general, the results indicate that the five wild plants had strong bioconcentration capacity to heavy metal and could be useful as hyperaccumulator for phytoremediation of soil polluted by Pb, Zn and Cd.

Keywords: lead-zinc tailings; heavy metal; hyperaccumulator; bioconcentration coefficient; transfer coefficient

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金-云南联合基金(U1202236); 国家自然科学基金(41261096)

作者简介: 秦 丽(1979—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复生态学研究。E-mail: qinli2975@ynau.edu.cn

* 通信作者: 李 元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

矿冶活动是重金属污染的主要来源之一^[1]。矿产资源开发过程中产生的采矿废水和选矿废液直接排放,以及矿山开发过程中的尾矿、废石、冶炼废渣堆等的堆放和淋滤,使矿区土壤积累了大量的重金属^[2]。会泽铅锌矿位于云南省东北部,是我国重要的铅锌矿产资源,300多年连续不断地开采,造成了大面积严重的重金属污染,导致了周围地区植被的破坏^[3-4],因此,尽快进行植被恢复和重建以减少矿区重金属对环境的污染,是矿区生态恢复的最佳策略^[5]。植物修复技术是利用自然生长植物或者遗传工程培育植物体系来吸收、挥发或稳定土壤环境污染物的技术,因其具有绿色、廉价和潜在经济效益等优点,近年来已成为国际环境修复学术界的研究热点^[6-7]。寻找合适的超富集植物是植物修复技术的基础和关键^[8]。

云南铅锌矿区筛选超富集植物是可能的。我们早期已经报道了续断菊^[9-10]对Cd具有很强的富集能力,以及Pb、Zn的超富集植物小花南芥^[11-12],筛选出的超富集植物已用于污染土壤的植物修复^[13]。铅锌矿山废弃地及矿渣堆周边土壤的污染属于多金属和高重金属浓度的复合污染,寻找和发现多金属富集植物与耐性植物,加强多金属复合污染土壤的植物提取与植物稳定修复尤为重要^[14-15]。

本文调查了云南会泽铅锌矿区某矿渣堆周边的主要自然植被,对优势植物和矿区土壤进行了采样和分析,探讨了优势植物的重金属含量及其与相关土壤重金属含量二者间的关系,并就优势植物的重金属富集特性进行了研究,初步筛选出具有积累重金属能力强的植物种类。这对利用植物修复技术治理重金属污染土壤,以及改善重金属污染区的生态环境具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 植物和土壤样品的采集

植物材料采自云南省会泽县者海镇废弃矿渣堆周边。该矿渣堆以铅锌矿渣和煤炭炉渣为基质,裸露的矿渣堆铅锌镉含量较高,周边植被稀疏,只有很少的草本植物。随机选择自然生长的优势植物种类,采集植物的地上部分和地下部,每个植物样采集3个重复。土壤样品为附着在植物根系上的表层土壤,采用抖土法现场取土、混合,四分法取约1 kg土样带回实验室进行分析。

采集到的植物样品有:狗牙根 *Cynodon dactylon* L. Pers.、莎草 *Cyperus microiria* steud、野葵 *Malva verti-*

cillata L.、龙葵 *Solanum nigrum* L.、白茅 *Imperata cylindrica* L. Beauv.、芨芨草 *Achnatherum splendens* Trin. Nevshi、土荆芥 *Chenopodium ambrosioides* L.。以上7种植物,隶属7属5科,共21个样品。

1.2 样品处理与分析

土壤样品先置于室内自然风干,过2 mm筛后研磨,过100目筛,备用。重金属全量采用王水-HClO₄(4:1 V/V)消煮,重金属有效态含量用DTPA提取(*m*:*m*=1:2),原子吸收分光光度法测定。

植物样品用自来水洗去尘土和夹杂物,再用去离子水冲洗干净,晾干后于105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重,用不锈钢植物粉碎机磨碎,备用。植物样品中重金属含量采用HNO₃-HClO₄(4:1 V/V)消煮,原子吸收分光光度法测定。

1.3 数据处理

数据采用Excel进行常规分析,并利用Duncan氏新复极差法进行差异显著性测验。相关性分析采用SPSS软件分析。

$$\text{富集系数} = \frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{土壤中重金属含量}}$$

$$\text{转运系数} = \frac{\text{植物地上部重金属含量}}{\text{地下部重金属含量}}$$

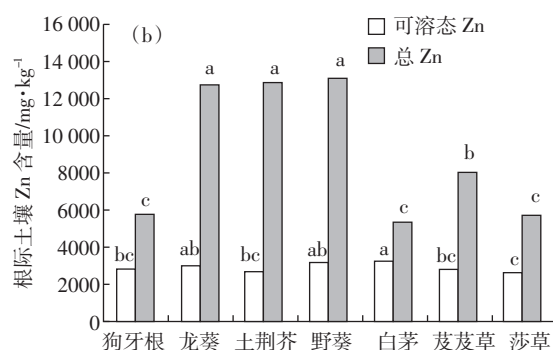
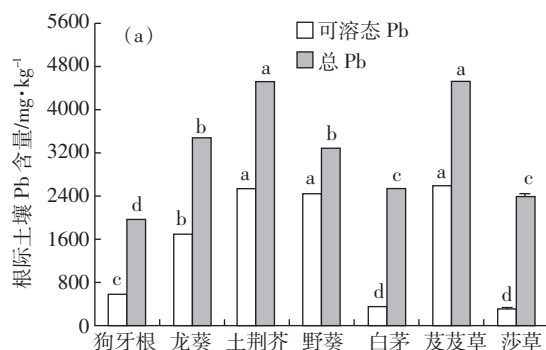
2 结果与分析

2.1 根际土壤重金属含量分析

7种植物根际土壤Pb、Zn和Cd的总量和可溶态含量差异较大(图1、图2)。7种植物根际土壤总Pb和可溶态Pb含量最高的是土荆芥,分别为4534、2551 mg·kg⁻¹;含量最低的是狗牙根和白茅,分别为1966、347 mg·kg⁻¹。根际土壤总Zn和可溶态Zn含量最高的是野葵,分别为13 086、3244 mg·kg⁻¹,含量最低的白茅和莎草,分别为5315、2651 mg·kg⁻¹。根际土壤总Cd含量最高的是土荆芥,分别为210、59.7 mg·kg⁻¹,含量最低的是白茅,分别为56.6、3.3 mg·kg⁻¹。3种重金属的平均含量分别为:9064、3244、102 mg·kg⁻¹,是云南土壤(A层)背景值^[16](Zn、Pb、Cd背景值分别为89.7、40.6、0.22 mg·kg⁻¹)的101、79.9倍和462倍,其污染以Cd最为严重。

2.2 植物体内重金属含量

矿渣堆周边采集到的7种植物对重金属Pb、Zn和Cd吸收存在较大的差异(图3、图4)。就Pb在植物体内积累量而言,芨芨草含量最高,为2045 mg·kg⁻¹,含量最低的是龙葵,为346 mg·kg⁻¹;植物体内Zn积累量最高的是莎草,达到5778 mg·kg⁻¹,含量最低的



图中不同字母表示品种间差异性显著($P<0.05$), 下同

Values with different letter indicate a significant difference($P<0.05$), The same below

图 1 7 种植物根际土壤总 Pb 与可溶态 Pb(a)、总 Zn 与可溶态 Zn(b) 含量

Figure 1 Concentrations of total Pb/soluble Pb(a) and total Zn/ soluble Zn(b) in rhizosphere soil of seven different plants

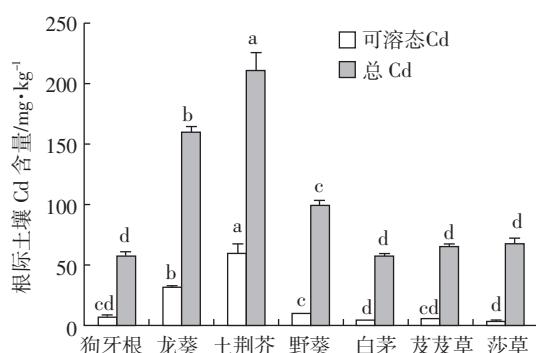


图 2 7 种植物根际土壤总 Cd 与可溶态 Cd 含量

Figure 2 Concentrations of total Cd and soluble Cd in rhizosphere soil of seven different plants

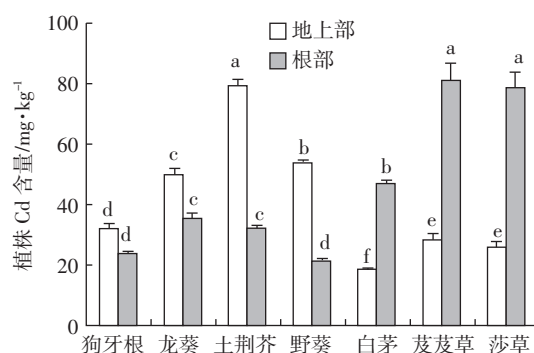


图 3 7 种植物体内 Cd 含量与分布

Figure 3 Concentrations and distributions of Cd in seven different plants

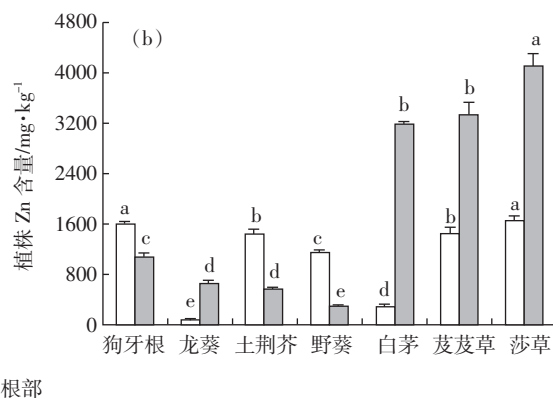
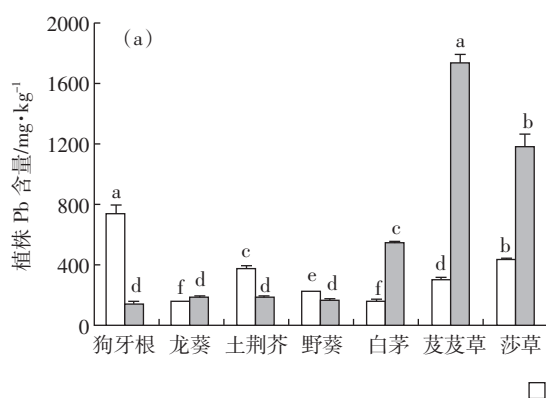


图 4 7 种植物体内 Pb(a)、Zn(b) 的含量与分布

Figure 4 Concentrations and distributions of Pb(a) and Zn(b) in seven different plants

是龙葵, 仅为 $708.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 在土荆芥体内积累量最多, 达到 $112 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在狗牙根中含量最低, 为 $56.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。7 种植物体内的 Pb、Zn 和 Cd 含量均高于一般植物。7 种植物体内金属的平均含量最高的为 Zn ($2972 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其次为 Pb ($940 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Cd ($87.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。比一般植物的 Pb 含量大 34 ~ 204

倍, Zn 含量大 14~116 倍, Cd 含量大 56~112 倍(一般植物的正常 Pb 含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 含量为 $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 含量为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [17])。7 种植物地上部和根部 Pb、Zn 及 Cd 之间均存在显著性差异($P<0.05$)。

2.3 植物对重金属的富集与转运特征

通过分析测试, 芡芡草和莎草体内 Pb 含量均大

于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 已超过超富集植物的临界标准, 但吸收的 Pb 主要富集在根部, 富集系数和转运系数都小于 1 (表 1)。7 种植物中 Zn 含量最高的是莎草, 达到 $5778 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且富集系数大于 1, 具备了对 Zn 元素生物修复的巨大潜力。土荆芥、芨芨草和莎草体内 Cd 含量均大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土荆芥的转运系数较大 (2.48), 芨芨草和莎草的富集系数都大于 1。

表 1 不同植物的富集系数和转运系数

Table 1 Bioconcentration coefficient and transfer coefficient of Pb, Zn and Cd in different plants

植物 名称	Pb		Zn		Cd	
	富集系数	转运系数	富集系数	转运系数	富集系数	转运系数
狗牙根	0.45	4.91	0.46	1.49	0.99	1.33
龙葵	0.10	0.82	0.06	0.10	0.54	1.40
土荆芥	0.13	1.95	0.15	2.57	0.53	2.48
野葵	0.12	1.30	0.11	4.12	0.78	2.50
白茅	0.28	0.29	0.65	0.09	1.16	0.40
芨芨草	0.45	0.18	0.60	0.43	1.71	0.36
莎草	0.68	0.37	1.02	0.40	1.58	0.34

2.4 植株和土壤重金属含量的相关性

植株地上部 Cd 含量和土壤全 Cd、可溶态 Cd 含量之间极显著正相关 ($P < 0.01$, 图 5), 相关系数分别为 0.897 和 0.919; 植株根部 Zn 含量和土壤全 Zn 含量之间显著负相关 ($P < 0.05$, 图 6), 土壤可溶态 Pb 含量和总 Pb 含量之间极显著正相关 ($P < 0.01$, 图 7), 相关系数为 0.897。

植株中 Pb 和 Zn、土壤中 Zn 和 Cd 含量之间有显著性差异 ($P < 0.05$); 富集系数中 Pb 和 Zn 之间有极显著性差异 ($P < 0.01$), Cd 和 Pb、Cd 和 Zn 之间有显著性差异 ($P < 0.05$)。

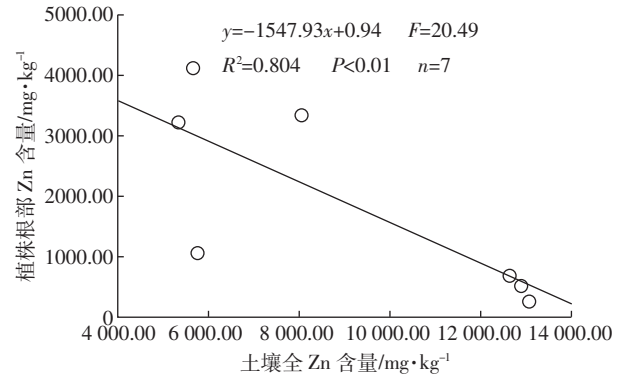
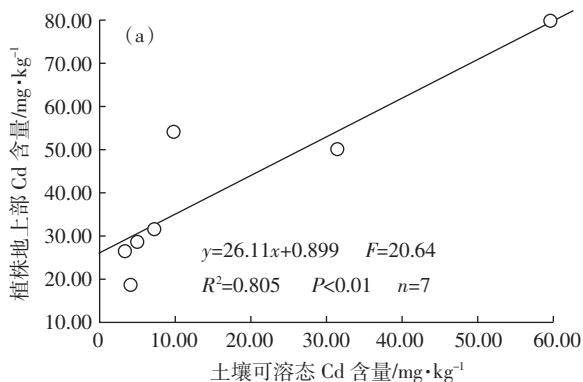


图 6 土壤全锌含量与植株根部锌含量的相关性

Figure 6 The correlation between the content of total Zn and root Zn contents in plants

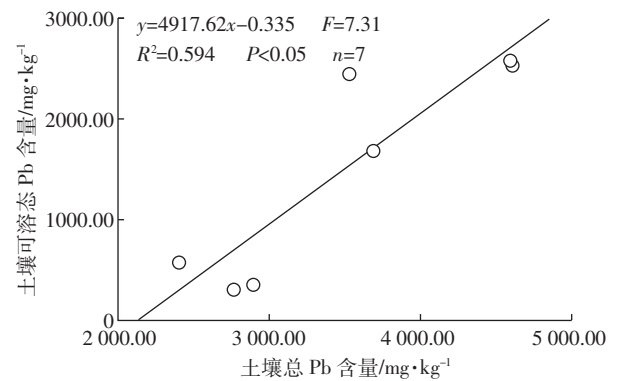


图 7 土壤总铅含量与可溶态铅含量的相关性

Figure 7 The correlation between the content of total Pb and soluble Pb contents in soil

3 讨论

铅锌矿区堆放的冶炼渣是一个普遍存在的环境污染源, 而矿区的基质条件极端恶劣, 重金属含量严重超标, 在其上生长的植物体能够生存繁衍并且在自然群落中占据优势, 表明植物体本身具备极强的适应环境能力, 且具有适应极端的基质条件的能力^[18]。能

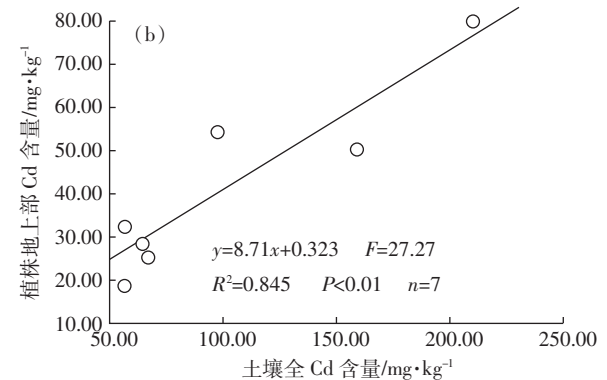


图 5 土壤可溶态镉含量(a)、全镉含量(b)与植株地上部镉含量的相关性

Figure 5 The correlation between the content of soluble Cd(a), total Cd(b) and shoot Cd contents in plants

在重金属污染的土壤中生长旺盛,定居并成为铅锌矿区的优势植物,却未表现出重金属所产生的毒害作用,可能与其长期生长在高含量重金属的环境中所形成的生理机制有关^[19]。植物体内的重金属含量与土壤的重金属含量及存在形态有一定的相关性^[20]。本次试验中,土壤有效 Zn 最高为 $3244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效 Cd 最高为 $59.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效 Pb 最高可达 $2589 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全 Cd、有效 Cd 均与植物地上部 Cd 含量极显著正相关。

超富集植物是指能超量吸收重金属并能将其不断转运到地上部的植物^[21]。目前关于筛选和确认超富集植物的标准包括3个特征:①是临界含量特征,体内重金属的临界含量定为:Zn 和 Mn 为 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb、Cu、Ni、Co 和 As 为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Al 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22],或者达到未受污染的普通植物的10~100倍^[23];②具有富集系数和转移系数特征,即富集系数和转移系数都大于1^[24];③具有一定的耐性能力^[25]。本次采集到的7种植物中,土荆芥、芨芨草和莎草体内 Cd 含量均达到 Cd 超富集植物临界含量标准。同时,这3种植物还表现出对重金属具有一定的耐性特征。如土荆芥、芨芨草和莎草体内 Cd 含量分别达到 112 、 110 、 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。超富集植物对重金属的耐性和吸收能力是污染土壤提取修复的两个基本特征^[22],当土壤中同时含有几种重金属复合污染时,植物体不仅表现一定的忍受耐性,同时还表现出很强的吸收能力。

富集系数和转移系数是衡量超富集植物的重要特征。本次采集到的7种植物中,土荆芥的 Cd 转运系数为2.5,具有较强的将 Cd 由根部转移到地上部的能力;芨芨草和莎草的 Cd 富集系数均>1,具有较强的富集能力,可作为修复 Cd 污染土壤的修复物种进一步研究;狗牙根的地上部与根部的 Cd 含量分别为 32.3 、 $24.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比一般植物 Cd 含量高56倍,其富集系数和转运系数均 ≥ 1 ,说明狗牙根对 Cd 的转运能力较强,可作为修复 Cd 污染土壤的富集植物。7种植物地上部和根部 Pb 含量均高于一般植物10倍以上,其中芨芨草和莎草可作为 Pb 的耐性植物。莎草具有较强的 Zn 富集能力,野葵的 Zn 转运系数高达4.1,具有很强的 Zn 转运能力。转运系数是表征植物将重金属由根部转移到地上部的能力,转运系数越大,说明植物忍耐重金属的能力越强,因此转运系数可间接衡量植物对重金属的耐性^[26]。本研究中,狗牙根、土荆芥和野葵的 Pb、Zn、Cd 转运系数均

大于1,具有作为铅锌矿区土壤修复物种的潜力,与吴双桃^[27]、束文圣^[28]等报道的一致,可对其富集能力进一步研究。本研究的7种植物对重金属 Pb、Zn 和 Cd 都有很强的吸收能力,比未受污染的普通植物高10~100倍,而且表现出一定的忍受耐性。这些在废弃矿山矿渣上自然形成的植物不仅耐瘠耐旱易于繁殖,而且具备了超富集植物的某些特征,进一步研究的价值较大,有可能从中筛选出一些重金属耐性植物、重金属超富集植物,这些植物在该地重金属污染土壤的修复中具有巨大的应用潜力。

4 结论

(1)本次采集到的7种优势植物对重金属 Pb、Zn 和 Cd 都有很强的吸收能力,比未受污染的普通植物高10~100倍,而且表现出一定的忍受耐性。

(2)芨芨草和莎草的 Cd 富集系数都大于1,莎草的 Zn 富集系数大于1,芨芨草和莎草对 Cd、Zn 有较强的吸收和富集能力,可作为富集植物。

(3)狗牙根、土荆芥和野葵对 Pb、Zn、Cd 有较高的转运能力,转运系数都大于1,吸收的 Pb、Zn 和 Cd 易向地上部转移,可作为 Pb、Zn 和 Cd 复合污染土壤植物修复的富集植物。

参考文献:

- [1] ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Jian-jun, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5):755-762.
- [2] 刘月莉,伍 钧,唐 亚,等.四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J]. *生态学报*, 2009, 29(4):2020-2026.
LIU Yue-li, WU Jun, TANG Ya, et al. An investigation of heavy-metal concentration in dominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2020-2026.
- [3] 李东伟,徐红梅,梅 涛,等.云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆场常见植物内生真菌多样性[J]. *生态学报*, 2012, 32(7):2288-2293.
LI Dong-wei, XU Hong-mei, MEI Tao, et al. Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7):2288-2293.
- [4] 缪福俊,熊 智,李素婷,等.会泽铅锌尾矿区豆科植物根瘤菌耐铅锌性及其生理生化特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10):1943-1947.
MIAO Fu-jun, XIONG Zhi, LI Su-ting, et al. Tolerance and physiological response to lead-zinc stress of rhizobia isolated from nodules of leguminous plants in lead-zinc mining tailing of Huize, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1943-1947.
- [5] 魏 远,顾红波,薛 亮,等.矿山废弃土地复垦与生态恢复研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2):107-114.
WEI Yuan, GU Hong-bo, XUE Liang, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine[J]. *Science*

- of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 107-114.
- [6] Bahareh Lorestani, Mehrdad Cheraghi, Nafiseh Yousefi. The potential of phytoremediation using hyperaccumulator plants: A case study at a lead-zinc mine site[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(8): 786-795.
- [7] Ahmadpour P, Ahmadpour F, Mahmud T M M, et al. Phytoremediation of heavy metals: A green technology[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(76): 14036-14043.
- [8] 孙约兵, 周启星, 任丽萍, 等. 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]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2166-2171. SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, REN Li-ping, et al. The identification of hyperaccumulative plants in tailing dumps of the Qingchengzi lead-zinc mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2166-2171.
- [9] 李元, 方其仙, 祖艳群. 两种生态型续断菊对镉累积特征研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(6): 1150-1154. LI Yuan, FANG Qi-xian, ZU Yan-qun. Accumulation characteristics of two ecotypes *Sonchus asper* (L.) Hill. to Cd[J]. *Acta Bot Boreali Occident Sin*, 2008, 28(6): 1150-1154.
- [10] 秦丽, 李元, 祖艳群, 等. 镉胁迫对续断菊 *Sonchus asper* L. Hill. 根系分泌物的影响[J]. 生态环境学报, 2012(3): 540-544. QIN Li, LI Yuan, ZU Yan-qun, et al. Effects of Cd contamination on the root exudates of *Sonchus asper* L. Hill.[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012(3): 540-544.
- [11] 方其仙, 祖艳群, 湛方栋, 等. 小花南芥(*Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch)对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 433-437. FANG Qi-xian, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Accumulation characteristic of *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch to Pb and Zn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 433-437.
- [12] 王吉秀, 太光聪, 祖艳群, 等. 硫营养对小花南芥(*Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch)累积铅锌的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1064-1069. WANG Ji-xiu, TAI Guang-cong, ZU Yan-qun, et al. Effects of sulfur application on growth and lead and zinc accumulation contents in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1064-1069.
- [13] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 471-477. QIN Li, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 471-477.
- [14] 仇荣亮, 仇浩, 雷梅, 等. 矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1085-1091. QIU Rong-liang, QIU Hao, LEI Mei, et al. Advances in research on remediation of multi-metal contaminated soil in mine and surrounding area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1085-1091.
- [15] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 591-597. BI De, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Dominant plants and their heavy metal contents in six abandoned lead-zinc mine areas in Zhejiang Province[J]. *Soil*, 2006, 38(5): 591-597.
- [16] 缪福俊, 孙浩, 陈玲, 等. 兰坪铅锌尾矿区土壤与自然发生的5种植物的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 189-194. MIAO Fu-jun, SUN Hao, CHEN Ling, et al. Study on lead-zinc tailings soil and five plants occurring naturally in lead-zinc mining tailings in Lanping[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(1): 189-194.
- [17] 房辉, 曹敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1277-1283. FANG Hui, CAO Min. Assessment of heavy metals pollution in abandoned lead-zinc mine tailing in Huize of Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1277-1283.
- [18] 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 Hong-yan, XING Dan, XIAO Jiu-jun, 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.
- [19] 杨肖娥, 龙新究, 倪吾钟. 超累积植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15. YANG Xiao-e, LONG Xin-xian, NI Wu-zhong. Physiological and molecular mechanisms of heavy metal uptake by hyperaccumulating plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 8-15.
- [20] 邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 796-804. XING Dan, LIU Hong-yan, YU Ping-ping, et al. The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 796-804.
- [21] Brooks R R, Lee J, Reeves R D. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants[J]. *Journal Geochemical Exploration*, 1997, 7: 49-77.
- [22] Baker A J M, Walker P L. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plant[M]//Shaw A J. Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects. Boca Raton: CRC press Inc., 1989: 155-178.
- [23] Zu Y Q, Li Y, Schwartz C, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area[J]. *China Environment International*, 2004, 30: 567-576.
- [24] 周启星, 魏树和, 张倩茹. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. ZHOU Qi-xing, WEI Shu-he, ZHANG Qian-ru. Ecological remediation[M]. Beijing: Chinese Environmental Press, 2004.
- [25] SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, DIAO Chun-yan. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 1103-1110.
- [26] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 等. 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 108-112. WANG Xue-li, CHANG Qing-shan, HOU Xiao-long, et al. Heavy metal enrichment of plants at lead-zinc mines in South China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 108-112.
- [27] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 156-157, 160. WU Shuang-tao, WU Xiao-fu, HU Yue-li, et al. Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 156-157, 160.
- [28] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639. SHU Wen-sheng, YE Zhi-hong, ZHANG Zhi-quan, et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1629-1639.