

## 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量

刘月莉<sup>1</sup>, 伍 钧<sup>1,2,\*</sup>, 唐 亚<sup>2</sup>, 杨 刚<sup>1</sup>, 祝 亮<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学资源环境学院, 雅安 625014; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** 通过野外调查采样, 分析了四川凉山州甘洛县铅锌矿区土壤的重金属含量, 以及矿区生长的 13 种优势植物对 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 的吸收与富集能力及其富集特性。结果表明, 矿区土壤受 Pb、Zn、Cd 3 种重金属污染严重, 13 种植物体内的 Pb 含量均高于普通植物 10 倍以上, 具有修复矿区土壤铅污染的潜力, 其中植物 1 的转运系数和富集系数都大于 1, 满足 Pb 超富集植物的基本特征。Zn 在凤尾蕨、细风轮菜、大火草、蔗茅、小飞蓬和牛茄子中含量较高。小飞蓬和紫茎泽兰的 Cd 含量较一般植物高出 17 ~ 61 倍, 其中, 紫茎泽兰的转运系数与富集系数均大于 1, 其对 Cd 的吸收特性值得进一步研究。

**关键词:** 铅锌矿; 重金属; 超富集植物; 耐性植物; 植物修复

文章编号: 1000-0933(2009)04-2020-07 中图分类号: X173 文献标识码: A

## An investigation of heavy-metal concentration in cominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province

LIU Yue-Li<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1,2,\*</sup>, TANG Ya<sup>2</sup>, YANG Gang<sup>1</sup>, ZHU Liang<sup>1</sup>

1 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

2 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2020 ~ 2026.

**Abstract:** A study was conducted to investigate heavy metal contents in dominant plant species and their associated soils in a Zinc-Lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province. Contents of such heavy metals as Pb, Zn, Cd, Cr and Cu were determined in 13 plant species in order to assess their potentials in phytoremediation of heavy metal polluted areas. The study revealed that soils of the mining area were highly contaminated by Pb, Zn and Cd. The Pb concentration in the 13 plant species was over 10 times greater than that in other plant species, indicating their potentials in in-situ remediation of the heavy-metal contaminated soils. Among the studied plant species, both the highest transfer factor (TF) and the highest bioaccumulation factor (BF) of plant species 1 were greater than 1, and this species can be designated as hyperaccumulator. It can be used in phytoremediation of contaminated soil in mining areas. *Pteris cretia* Linn. var. *nervosa* (Thunb.) ching et S. H. Wu, *Clinopodium gracile* (Benth.) Matsum., *Anemone tomentosa* (Maxim.) P&E, *Erianthus rufipilus* (Steud.) Griseb., *Conyza canadensis* (L.) Cronq. and *Solanum surattense* Burm. can accumulate Zn. Cd concentrations in *C. canadensis* and *Eupatorium adenophorum* were 17 ~ 61 times higher than that in other plants. In addition, both TF and BF of *E. adenophorum* were over 1 for Cd and its absorption characteristic of Cd is worth further research.

**Key Words:** Zinc-Lead mining; heavy metal; hyperaccumulator; tolerant plant; phytoremediation

矿产资源的开发对国民经济的发展起到了重要的推动作用, 但同时也带来了严重的环境污染问题<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 四川省教育厅重点基金资助项目(2006017); 四川省学术和技术带头人培养基金资助项目; 四川农业大学引进人才科技资助项目(01402000)

收稿日期: 2007-12-30; 修订日期: 2008-11-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuj1962@163.com

在铅锌矿的开采中,采矿废水和选矿废液的直接排放,加上废石和尾矿等的堆放和淋滤,使矿区土壤积累大量的重金属<sup>[2]</sup>,不仅造成土壤质量下降,生态系统退化,农作物减产,还威胁到人体健康。由于重金属在环境中具有相对稳定性和难降解性,因此很难从环境中清除。重金属污染治理一直是国内外研究的热点和难点,国内外学者在此方面也做了大量的研究<sup>[3~10]</sup>。

近年来,对环境扰动少、修复成本低且能大面积推广应用的植物修复技术(植物萃取技术)应运而生,为治理重金属污染提供了新途径<sup>[11]</sup>。该技术应用的前提在于具备适宜的超富集植物。国内在超富集植物的筛选与矿区废弃地植被修复工作方面也进行了一定的研究,取得了一些成果<sup>[12~22]</sup>。

据此,本文调查了四川甘洛县赤普沟铅锌矿区的主要自然植被,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,初步筛选出具有超量积累重金属能力的植物品种,以期为矿区生态恢复提供依据。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 矿区概况

凉山州甘洛县地处四川西南部,位于东经  $102^{\circ}27'38'' \sim 103^{\circ}01'45''$ ;北纬  $28^{\circ}38'24'' \sim 29^{\circ}18'32''$ 。甘洛县矿产资源丰富,铅锌矿为优势矿种。铅锌矿净储量 150 万 t,年产铅锌矿居全省之首,占全国十分之一,是著名的铅锌之乡。

甘洛地处四川盆地西缘向青藏高原过渡的高山峡谷地带,属中亚热带气候,垂直变化明显,冬春干旱,夏秋多雨,气温年较差小,日较差大,年平均气温  $16.2^{\circ}\text{C}$ 。光照充足,降雨集中,四季分明,年平均日照 1661h,年平均降水量 880mm,全年无霜期 326d。境内山峦起伏、沟壑纵横,显现出典型的高山峡谷地貌特征,境内最高海拔 4288m,最低 570m,相对高差 3738m。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 野外调查与采样

根据矿区植被的生长情况,分别于 2006 年 4 月与 8 月调查了赤普沟矿区生态环境,了解了矿区内主要自然植被,并采集了 55 种植物及相应生长土壤(0~20cm),各植物种分别采集 3~6 株。

#### 1.2.2 植物及土壤样品制备与分析

植物样品分为地上部分与地下部分,先用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗, $80^{\circ}\text{C}$  恒温烘至恒重<sup>[23]</sup>后,玛瑙研磨粉碎制样;土壤样品自然风干、磨细、过筛。

植物样品与土壤样品均采用微波消解仪消解(USEPA Method 3050),AAS 法测定待测液中 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 矿区植被群落

赤普沟矿区内的植物主要以草本为主,还有灌木和亚灌木。通过初步测定,选择了其中 13 种优势植物(表 1)作进一步分析和讨论。表 1 结果表明甘洛赤普沟矿区以草本植物占优势,可能与草本植物相对较易形成植物的重金属耐受性有关<sup>[24]</sup>。

### 2.2 铅锌矿区优势植物体内重金属元素含量

对 13 种优势植物体内的 5 种重金属元素的含量分析结果表明(图 1),赤普沟矿区的优势植物对土壤重金属的吸收差异性比较显著。绝大部分植物的重金属 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 含量高于一般植物,特别是 Pb、Zn、Cd 的含量。与一般植物的正常含量<sup>①</sup>相比较(Pb  $0.1 \sim 41.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Zn  $1 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cd  $0.2 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cr  $0.2 \sim 8.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cu  $0.4 \sim 45.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),所有优势植物比一般植物的 Pb 含量大 10~269 倍,

① 曹鉴燎. 都市生态走廊[EB/OL]. <http://sd.thnet.gov.cn/star/3-shengtai/2-03.htm> 2005-06-23.

Zn 含量大 1.1 ~ 9 倍, Cd 含量大 1.4 ~ 61 倍; 植物样中除凤尾蕨与戟叶酸模的地上部分, 小飞蓬与打破碗花花的根部, 以及紫茎泽兰全株的 Cr 含量在正常范围之内, 其余均较正常含量大, 最高至 5 倍; 至于 Cu 含量, 只有接骨草与蔗茅的根部含量略大于正常含量, 其余均在正常范围之内。

通过分析测定, 凤尾蕨、植物 1、细风轮菜、大火草、蔗茅、小飞蓬和牛茄子 7 种植物体内的 Pb 含量均大于 1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超过了超富集植物的临界标准<sup>[25]</sup>。另外, 接骨草、戟叶酸模和紫茎泽兰的根部 Pb 含量与千里光、长穗兔儿风、打破碗花花的地上部 Pb 含量均高于 1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明这 13 种优势植物均具备对 Pb 元素生物修复的巨大潜力, 值得进一步的研究。

表 1 赤普沟矿区的优势植物种类组成  
Table 1 The plant composition in Chipugou mineral area

| 编号<br>No. | 植物种类 Plant species                                                            | 科<br>Family        | 习性<br>Life forms    | 多度 <sup>#</sup><br>Abundance |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| 1         | 接骨草 <i>Sambucus chinensis</i> Lindl.                                          | 忍冬科 Caprifoliaceae | 多年生草本或亚灌木 Cr/sub-Ph | III                          |
| 2         | 凤尾蕨 <i>Pteris cretia</i> Linn. var. <i>nervosa</i> (Thunb.) ching et S. H. Wu | 凤尾蕨科 Pteridaceae   | 多年生草本 Cr            | I                            |
| 3         | 千里光 <i>Senecio scandens</i> Buch.-Ham. ex. D. Don                             | 菊科 Compositae      | 多年生草本 Cr            | I                            |
| 4         | 植物 1 Plant 1                                                                  | 柳叶菜科 Onagraceae    | 多年生草本 Cr            | II                           |
| 5         | 细风轮菜 <i>Clinopodium gracile</i> (Benth.) Matsum.                              | 唇形科 Labiatae       | 多年生草本 Cr            | II                           |
| 6         | 大火草 <i>Anemone tomentosa</i> (Maxim.) Péi                                     | 毛茛科 Ranunculaceae  | 多年生草本 Cr            | III                          |
| 7         | 长穗兔儿风 <i>Ainsliaea henryi</i> Diels                                           | 菊科 Compositae      | 多年生草本 Cr            | I                            |
| 8         | 蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> (Steud.) Griseb                                 | 禾本科 Gramineae      | 多年生草本 Cr            | I                            |
| 9         | 小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> Cronq.                                           | 菊科 Compositae      | 一年生草本 T             | II                           |
| 10        | 戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i> D. Don                                             | 蓼科 Polygonaceae    | 多年生草本 Cr            | III                          |
| 11        | 紫茎泽兰 <i>Eupatorium adenophorum</i> Spreng                                     | 菊科 Compositae      | 多年生草本或亚灌木 Cr/sub-Ph | II                           |
| 12        | 打破碗花花 <i>Anemone hupehensis</i> Lem.                                          | 毛茛科 Ranunculaceae  | 多年生草本 Cr            | I                            |
| 13        | 牛茄子 <i>Solanum surattense</i> Burm. F.                                        | 茄科 Solanaceae      | 多年生草本或亚灌木 Cr/sub-Ph | I                            |

\* : T; 一年生草本 therophytes; Cr; 多年生草本 cryptophytes; sub-Ph; 亚灌木 sub-phanerpphytes; #: I 优势 Dominant; II 丰富 Abundance; III 常见 Frequent

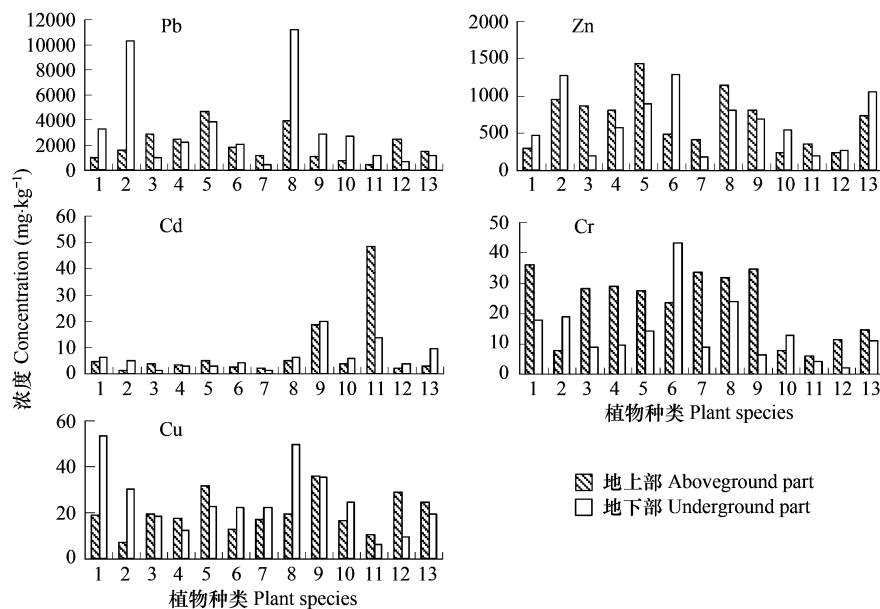


图 1 赤普沟矿区 13 种优势植物体内重金属的含量与分布

Fig. 1 The concentrations and distributions in dominant plant species in Chipugou mineral area

优势植物中 Zn 含量较高的分别为凤尾蕨、细风轮菜、大火草、蔗茅和牛茄子; Cd 含量较高的是小飞蓬和

紫茎泽兰;Cr 含量较高的是接骨草、千里光、植物 1、细风轮菜、大火草、长穗兔儿风、蔗茅和小飞蓬;Cu 含量较高的是接骨草、细风轮菜、蔗茅和小飞蓬。但均未达到超富集植物吸收重金属的要求。

2.3 矿区土壤重金属含量

矿区土壤类型主要为红色石灰性土,土壤中重金属含量结果见表 2。6 个采样点中土壤的 Pb 含量均超过了土壤环境质量二级标准  $350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,除采样点 3 以外,其余样点含量均远远超过了土壤环境质量三级标准  $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,可见该矿区铅污染非常严重,这跟采样点位于铅锌矿区采矿点与洗选场附近有关。Zn 含量除采样点 1 未超过土壤环境质量二级标准  $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,其余均超过了三级标准的警戒值  $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cd 含量全部超过了三级标准  $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cr 含量均未超过标准。Cu 含量只有采样点 4 超过了二级标准  $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分析结果表明,赤普沟矿区 Pb、Zn、Cd 污染严重,个别地点伴有 Cu 污染。

表 2 采样点土壤基本理化性质  
Table 2 Properties of soil samples from contaminated sites

| 编号<br>No. | 植物<br>Plant<br>species | pH   | 有机质<br>Organic<br>matter<br>(%) | Pb<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |                    | Zn<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |                    | Cd<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | Cr<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | Cu<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|-----------|------------------------|------|---------------------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|           |                        |      |                                 | 总量<br>Total                              | 有效态<br>Extractable | 总量<br>Total                              | 有效态<br>Extractable | 总量 Total                                 | 总量 Total                                 | 总量 Total                                 |
| 1         | 1                      | 7.69 | 3.6                             | 926                                      | 373                | 208                                      | 35                 | 2.5                                      | 54.3                                     | 33.3                                     |
| 2         | 5,6,8                  | 7.53 | 7.3                             | 8349                                     | 1759               | 2796                                     | 122                | 9.4                                      | 54.2                                     | 61.2                                     |
| 3         | 9                      | 8.11 | 2.5                             | 22724                                    | 2057               | 25459                                    | 895                | 66.5                                     | 55.3                                     | 193                                      |
| 4         | 7                      | 7.87 | 3.4                             | 2089                                     | 952                | 560                                      | 129                | 4.1                                      | 62.9                                     | 45.9                                     |
| 5         | 4                      | 8.92 | 0.4                             | 1784                                     | 495                | 2876                                     | 344                | 10.3                                     | 64.2                                     | 33.0                                     |
| 6         | 2,10,11,13             | 7.85 | 6.7                             | 13552                                    | 4628               | 5726                                     | 146                | 40.9                                     | 42.6                                     | 55.9                                     |

2.4 优势植物对土壤中重金属元素的转运与富集特征

植物体内的重金属含量与土壤的重金属含量有直接的相关性。通过对赤普沟矿区土样中重金属含量的测定分析,掌握了土壤的重金属污染状况,为了进一步反映植物对重金属的转运能力和富集能力,特计算了优势植物对重金属的转运系数与富集系数,若转运系数与富集系数越高,表明植物对该种重金属的转运和吸收能力越强,结果见图 2 ~ 图 6。通过对富集系数与转运系数的分析比较,表明长穗兔儿风和牛茄子可将 Pb 从土壤中大量提取并由根转运到地上部分,积累于组织器官

中,利用它们植物萃取的作用,收获地上部分可减少土壤中 Pb 元素的含量;接骨草、凤尾蕨、大火草、蔗茅、小飞蓬、戟叶酸模和紫茎泽兰则可利用它们植物稳定化(固定化)的作用吸收固定土壤中的 Pb,减少 Pb 在土壤中的移动和转移,防止经侵蚀、淋溶、径流或转化为难为生物利用的形态,造成更广域的污染。同时发现植物

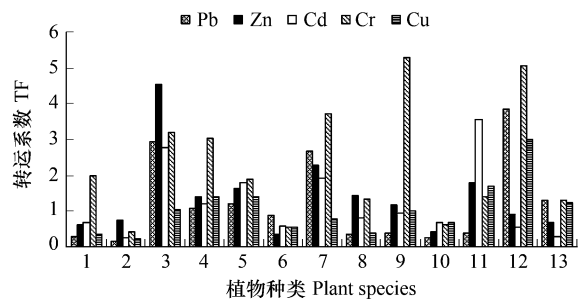


图 2 种优势植物的转运系数(TF)  
Fig. 2 The transfer factors of heavy metals in dominant plants

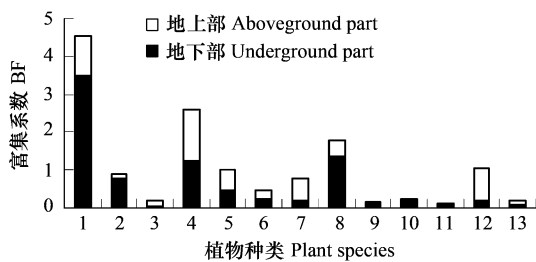


图 3 植物对 Pb 的富集系数(BF)  
Fig. 3 The bioaccumulation factors of Pb in dominant plants

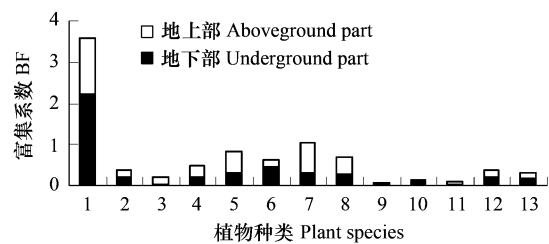


图 4 植物对 Zn 的富集系数(BF)  
Fig. 4 The bioaccumulation factors of Zn in dominant plants

1 对 Pb,紫茎泽兰对 Cd,均具有较强的转运能力和富集能力,因矿区土壤 Pb、Cd 污染严重,所以植物 1 与紫茎泽兰在生态修复方面可作进一步研究。

### 3 讨论

当重金属污染物在植物的组织器官中积累时,通常会对植物产生毒性作用,包括对植物细胞结构的直接破坏以及间接地替换其他的必需营养元素。能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(尤以菊科植物表现较为突出),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<sup>[26]</sup>,因而使大多数生长在金属积累土壤的富集型植物,同时具有金属耐性的特征。但是,植物对金属的积累性和耐性之间是否相关,仍有争议<sup>[27]</sup>。

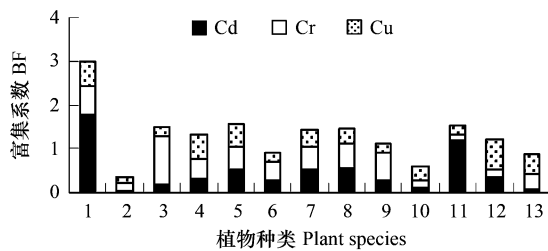


图5 植物地上部对 Cd、Cr 和 Cu 的富集系数(BF)

Fig.5 The bioaccumulation factors of Cd, Cr and Cu in aboveground parts of plants

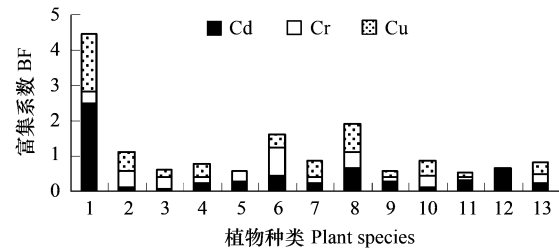


图6 植物地下部对 Cd、Cr 和 Cu 的富集系数(BF)

Fig.6 The bioaccumulation factors of Cd, Cr and Cu in underground parts of plants

综合分析优势植物体内的重金属含量,得出不同植物种类对重金属的吸收特性有明显差异。千里光、细风轮菜、长穗兔儿风、打破碗花花、牛茄子的 Pb 含量均高于一般植物 10 倍以上,转运系数 > 1,具有作为矿区土壤 Pb 污染修复物种的巨大潜力<sup>[28]</sup>,可对其铅富集能力作进一步研究。而其他优势植物则为 Pb 的耐性植物,尤其是凤尾蕨和蔗茅,根部含量高达万毫克每千克。

从植物体内重金属含量、转运系数和富集系数 3 个指标来看,植物 1 的 Pb 含量在地上部为  $2409 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,根部为  $2238 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是一般植物正常含量的 58 倍,并且其地上部含量大于根部含量即转运系数大于 1,其对土壤中 Pb 元素的富集系数也大于 1,具备了 Pb 超富集植物的基本特征。植物 1 是一种观赏花卉,将其作为植物修复物种的同时,还可产生一定的经济效益,因此,对植物 1 的富集能力与富集特性可作进一步的研究考证。紫茎泽兰的地上部与根部的 Cd 含量分别为  $48.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $13.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与一般植物 Cd 含量比较,竟高达 61 倍,其转运系数和地上部的富集系数均大于 1。说明紫茎泽兰对 Cd 的转运能力较强,但未达到 Cd 超富集植物的临界标准  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,可作为修复 Cd 污染环境的先锋植物,又由于紫茎泽兰属于生物入侵物种,所以必须在将其实际应用于植物修复之前进行全面的安全评价。这些先锋物种可用于铅锌矿废弃地生态恢复,能迅速提高植物的覆盖率,达到保持水土和减轻污染的作用。

### References:

- [ 1 ] Dudka S, Adriano D C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *Journal of Environment Quality*, 1997, 26:590—602.
- [ 2 ] Norland M R, Veith D L. Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal waste compost. *Journal of Hazardous materials*, 1995, 41:123—134.
- [ 3 ] Sarret G, Saumitou-Laprade P, Bert V, *et al.* Forms of zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Physiology*, 2002, 130(4):1815—1826.
- [ 4 ] Hiroshi K, Chisato T. *Arabis gemmifera* is a hyperaccumulator of Cd and Zn. *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5(3):197—201.
- [ 5 ] Nancy H. Roosens, Bernard C, Leplae R, *et al.* Evidence for copper homeostasis function of metallothionein (MT3) in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *FEBS Letters*, 2004, 577:9—16.

- [ 6 ] Kertulis-Tartar G M, Ma L Q, Tu C, *et al.* Phytoremediation of an arsenic-contaminated site using *Pteris vittata* L. : a two-year study. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8:311 — 322.
- [ 7 ] Ba uelos G S. Phyto-products may be essential for sustainability and implementation of phytoremediation. *Environmental Pollution*, 2006, 144:19 — 23.
- [ 8 ] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, *et al.* Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1):281 — 287.
- [ 9 ] Ma L Q, Komar K M, Tu C, *et al.* A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409:579.
- [10] Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, *et al.* Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 2006, 368:456 — 464.
- [11] Liao X Y, Chen T B, Yan X L, *et al.* Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Acta Scientiae Circumstaniae*, 2007, 27(6):881 — 893.
- [12] Liu W, Shu W S, Lan C Y. *Viola baoshanensis* — a new hyperaccumulator of Cd. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19):2046 — 2049.
- [13] Wei S H, Zhou Q X, Wang X, *et al.* *Solanum nigrum* L. — a new hyperaccumulator of Cd. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24):2568 — 2573.
- [14] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, *et al.* A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator-*Arabis Paniculata* L. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(4):135 — 136.
- [15] Sun J, Tie B Q, Qian Z, *et al.* Research on accumulative characteristics of heavy metals in some predominant plants species distributed in Hunan Chenzhou Pb-Zn mining area. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2006, 33(1):129 — 31, 42.
- [16] Nie F H. Cd hyper-accumulator *Phytolacca acinosa* Roxb and Cd-accumulative characteristics. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):303 — 306.
- [17] Liao X Y, Chen T B, Yan X L, *et al.* Heavy metals in plants growing on Ni/Cu mining areas in desert, northwest China and the adaptive pioneer species. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(3):486 — 495.
- [18] Wei Z Y, Chen T B, Huang Z C, *et al.* Cretan Brake (*Pteris cretica* L. ): an Arsenic-accumulating Plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5):777 — 778.
- [19] Zhang X H, Luo Y P, Huang H T, *et al.* *Leersia hexandra* Swartz: a newly discovered hygrophite with chromium hyperaccumulator properties. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):950 — 953.
- [20] Li Y S, Sun L N, Sun T H, *et al.* Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1386 — 1389.
- [21] Long X X, Ni W Z, Yang X E, *et al.* The characteristic of Zn uptake by the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):334 — 340.
- [22] An Z Z, Chen T B, Lei M, *et al.* Tolerance of *Pteris vittata* L. to Pb, Cu and Zn. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2594 — 2598.
- [23] Río-Celestino M D, Font R, Moreno-Rojas R, *et al.* Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils. *Industrial Crops and Products*, 2006, doi:10.1016/j.indcrop.2006.06.013.
- [24] Cao D J, Wang G Y, Wang Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in dominant plants growing on mineral areas in Anhui Tongling. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1079 — 1082.
- [25] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1:81 — 126.
- [26] Zhang Y X, Chai T H, Gerard B. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(5):453 — 457.
- [27] Sun R L, Zhou Q X. Heavy metal tolerance and hyperaccumulation of higher plants and their molecular mechanisms: a review. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3):497 — 504.
- [28] Cui S, Zhou Q X, Huang L. Absorption and accumulation of heavy metals by plants around a smelter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3):512 — 515.

#### 参考文献:

- [ 8 ] 周守标,王春景,杨海军,等. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1):281 ~ 287.

- [11] 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施. 环境科学学报,2007,27(6):881~893.
- [12] 刘威,束文圣,蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物. 科学通报,2003,48(19):2046~2049.
- [13] 魏树和,周启星,王新,等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.). 科学通报,2004,49(24):2568~2573.
- [14] 汤叶涛,仇荣亮,曾晓雯,等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.). 中山大学学报:自然科学版,2005,44(4):135~136.
- [15] 孙健,铁柏清,钱湛,等. 湖南郴州铅锌矿区周边优势植物物种重金属累积特性研究. 矿业安全与环保,2006,33(1):29~31,42.
- [16] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应. 生态环境,2006,15(2):303~306.
- [17] 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等. 金昌镍铜矿区植物的重金属含量特征与先锋植物筛选. 自然资源学报,2007,22(3):486~495.
- [18] 韦朝阳,陈同斌,黄泽春,等. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物. 生态学报,2002,22(5):777~778.
- [19] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等. 一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz). 生态学报,2006,26(3):950~953.
- [20] 李玉双,孙丽娜,孙铁珩,等. 超富集植物叶用红苋菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)及其对 Cd 的富集特征. 农业环境科学学报,2007,26(4):1386~1389.
- [21] 龙新宪,倪吾钟,杨肖娥,等. 超积累生态型东南景天吸收锌的特性. 生态学报,2006,26(2):334~340.
- [22] 安志装,陈同斌,雷梅,等. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究. 生态学报,2003,23(12):2594~2598.
- [24] 曹德菊,王光宇,汪琰,等. 安徽铜陵矿区优势植物的重金属富集特性研究. 农业环境科学学报,2005,24(6):1079~1082.
- [26] 张玉秀,柴团辉,Gerard BURKARD. 植物耐重金属机理研究进展. 植物学报,1999,41(5):453~457.
- [27] 孙瑞莲,周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究. 植物生态学报,2005,29(3):497~504.
- [28] 崔爽,周启星,晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用. 应用生态学报,2006,17(3):512~515.