

Pb 超富集植物金丝草 (*Pogonatherum crinitum*)、柳叶箬 (*Isache globosa*)

侯晓龙¹ 常青山² 刘国锋³ 刘爱琴^{1*} 蔡丽平¹

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 景德镇高等专科学校生化系, 景德镇 333000;
3. 江苏省农业科学院, 南京 210014)

摘要 重金属超富集植物是植物修复技术的核心和前提,但目前国内发现的Pb超富集植物较少,本研究通过野外调查和室内胁迫模拟实验相结合的方法,在国内首次发现并证实金丝草和柳叶箬为Pb的超富集植物。野外调查结果表明:金丝草地上部分Pb含量1 231.80 mg/kg,转运系数达到1.32,柳叶箬地上部分Pb含量1 818.40 mg/kg,转运系数6.5。室内模拟胁迫实验表明:在Pb胁迫浓度为5 000 mg/kg时金丝草和柳叶箬对Pb的转运系数均大于1,而且其地上部分Pb含量也超过1 000 mg/kg的水平。在Pb胁迫浓度为18 000 mg/kg时2种植物体内Pb含量达到最大值,金丝草地上部分和地下部分Pb含量分别达3 789.84 mg/kg和4 964.76 mg/kg,柳叶箬地上部分和地下部分Pb含量分别达3 411.56 mg/kg和1 523.02 mg/kg。

关键词 Pb 金丝草 柳叶箬 超富集植物 植物修复

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)03-0989-06

Two lead-hyperaccumulator: *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa*

Hou Xiaolong¹ Chang Qingshan² Liu Guofeng³ Liu Aiqin¹ Cai Liping¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002 China;
2. Department of Biology and Chemistry, Jingdezhen College, Jingdezhen 333000 China;
3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract It is key step for phytoremediation to find heavy metal hyperaccumulator, however, a few lead-hyperaccumulators have been found in China. The plants grew in Youxi and Liancheng mining areas of Fujian Province were investigated and heavy metal concentrations in different organs of each plant were measured. Two new potential lead-hyperaccumulator of *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa* were firstly found. The results showed that the Pb concentration in aboveground of *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa* were 1 231.80 mg/kg and 1 818.40 mg/kg, their Pb transport coefficients were 1.32 and 6.5, respectively. The Pb concentration and transport coefficients were exceeded the standard of lead-hyperaccumulator. The Pb simulated experiment in soil pot showed that the Pb concentration in aboveground of *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa* were exceeded 1 000 mg/kg which was the critical standard of lead-hyperaccumulator, and the Pb transport coefficient exceeded 1 under Pb press of 5 000 mg/kg. The maximum Pb concentration in aboveground and roots of *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa* were 3 789.84 mg/kg, 4 964.76 mg/kg, and 3 411.56 mg/kg, 1 523.02 mg/kg, respectively under Pb press of 18 000 mg/kg.

Key words Pb; *Pogonatherum crinitum*; *Isache globosa*; hyperaccumulator; phytoremediation

Pb 作为环境中危害最大的重金属之一,无论对植物或动物的代谢和生存都是一种非必需元素。虽然绝大多数生物体内均存在一定数量的Pb,但是人体内的Pb超过一定水平就会对健康造成危害,引发贫血、便秘、腹痛、呕吐和食欲降低,甚至中枢神经系统受损害,因此控制环境中的Pb污染对保护人类健康、减少其潜在危险性都具有重要意义^[1,2]。

近年来,由于Pb/Zn矿山的大量开采及其冶炼

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201111020-2);福建省科技厅重点项目(2008Y0004)

收稿日期:2010-09-17; 修订日期:2010-10-31

作者简介:侯晓龙(1981~),男,博士研究生,讲师,主要从事重金属污染防治方面的研究工作。E-mail:lxylx@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fjlq@126.com

过程对环境的污染,使得大量 Pb 进入土壤,传统的电动修复和土壤淋洗等 Pb 污染土壤修复技术存在成本太高、对土壤结构扰动性大、不能大面积推广应用等缺点^[3,4]。近年来,利用植物对重金属特殊的吸收富集能力,将植物收获后并进行妥善处理,将重金属移出土壤,达到重金属污染修复目的重金属污染植物修复技术应运而生^[5-7]。植物修复技术是一种较为廉价的绿色治理技术,安全经济,对环境扰动少,修复成本低,并能进行大面积治理^[8,9]。目前该技术已被越来越多的科学家所认可,具有广泛的应用前景。作为修复技术核心的重金属超富集植物被越来越多地发现,由于 Pb 具有较高的负电性,易与土壤中的有机质和铁锰氧化物等形成共价键,不易被植物吸收,因此,目前已见报道的 Pb 超富集植物并不多,限制了 Pb 污染土壤的修复规模^[10,11]。目前国外发现的 Pb 超富集植物有 16 种,主要分布在十字花科 (cruciferae)、石竹科 (caryophyllaceae)、禾本科 (poaceae) 和蓼科 (polygonaceae) 4 个科,国内发现的 Pb 超富集植物极少^[12,13],报道的只有密毛白莲蒿 (*Artemisia sacrorum* Ledeb. var. *Messerschmidiana* (Bess.) Y. R. Ling) 和白莲蒿 (*Artemisia sacrorum*. Ledeb.)^[14] 及 Pb/Zn/Cd/多金属超富集植物——圆锥南芥 (*Arabis paniculata* L.)^[15]。福建是

我国南方重要的重金属矿区,分布着大量优质 Pb/Zn 矿和 Mn 矿,在长期开采过程中废水排放与尾矿堆积等原因使得矿区周边土壤重金属污染严重,因此在矿区上生长的植物长期适应高浓度的重金属环境,极有可能存在重金属超富集植物。有鉴于此,本研究通过对福建重金属矿区生长植物的野外调查,分析福建尤溪 Pb/Zn 矿、连城 Pb/Zn 矿和连城 Mn 矿生长植物重金属含量,初步筛选重金属富集植物,在野外调查筛选基础上,通过室内胁迫实验进行验证,最终筛选出 Pb 的超富集植物,为南方矿区土壤重金属 Pb 污染的植物修复技术提供技术支持。

1 实验地概况

福建连城 Pb/Zn 矿和 Mn 矿始建于 1967 年,为福建主要的重金属矿,位于东经 116°32' ~ 111°09', 北纬 25°13' ~ 25°56', 年平均气温 18.9℃, 年平均雨量 1 679.8 mm; 福建尤溪 Pb/Zn 矿厂建于 1958 年, 位于东径 116°32' ~ 117°10', 北纬 25°14' ~ 25°51', 为中亚热带海洋性季风气候, 年均气温 18.9℃, 年均降雨量 1 599.6 mm, 土壤以红黄壤土为主。

调查地区 Pb 污染情况如表 1 所示。所调查地区的 Pb 含量超过土壤评价三级标准的几倍到几十倍, 最高达到了近 34 倍。

表 1 南方重金属矿区 Pb 的污染状况

Table 1 Pb contamination of soils in heavy metal mining areas

重金属矿区	连城 Pb 锌矿	连城锰矿	尤溪 Pb 锌矿	土壤评价标准(三级)
Pb 含量 (mg/kg)	13 803.20 ± 931.20	4 639.70 ± 325.40	17 496.00 ± 1 219.30	500
超标倍数	26.61	8.28	33.99	—

2 实验方法

2.1 重金属矿区生长植物的调查方法

选择福建省重金属矿区连城 Pb/Zn 矿、连城 Mn 矿和尤溪 Pb/Zn 矿为调查对象,选取重金属含量比较高的矿区附近及其尾矿库上生长旺盛、分布频率比较高的植物,分别采集这些植物的地上部分和地下部分及其表层土壤样品(深度 0 ~ 30 cm),带回室内进行重金属含量测定。在重金属矿区共采集了 48 种植物,将植物样品分地上部分与地下部分,分别测定重金属 Pb,每个样品 3 次重复。

2.2 室内 Pb 胁迫模拟实验方法

采用室内 Pb 胁迫模拟的土培实验方法,进行超

富集植物的验证研究,把黄心土和沙按 1:1 比例进行混合后装盆。供试盆栽容器直径 31 cm、高 22 cm,每盆装入 7 kg 过筛的混匀土待用。采用随机区组设计,设计不同 Pb 处理水平,Pb 处理水平分别为 5 000、10 000、12 000、15 000、18 000 和 20 000 mg/kg(以干土计),每个实验处理设 3 个重复。

在温室室内先将金丝草和柳叶箬在盆栽容器中缓苗 1 个月后,往栽培土中分 10 次喷洒不同浓度的 Pb 溶液,进行胁迫实验 3 个月,观察 2 种植物在不同 Pb 胁迫条件下的生态特征变化。实验的 Pb 溶液采用分析纯 Pb(NO₃)₂ 进行配制,为防治 Pb 浓度过高影响植物生长,实验过程中每隔 1 周分别喷洒不同特定浓度的 Pb 溶液,连续喷洒

10周,最后达到不同处理水平的Pb胁迫浓度要求。然后测定不同胁迫浓度下植物不同部位的Pb含量。

2.3 重金属的分析测定方法

植物样品首先用自来水冲洗,再用去离子水反复多次冲洗干净,然后烘干至恒重,经植物粉碎机粉碎处理后过0.5 mm尼龙筛备用。采用HNO₃-HCl-HClO₃湿灰化法进行植物样品消煮。土壤样品风干后过0.149 mm筛后,采用HNO₃-HF-HClO₄消煮法进行消煮。采用北京瑞利分析仪器公司的原子吸收分光光度计(WFX-136),对以上消煮好的植株、土壤待测液Pb含量进行分析测定。

3 结果与分析

3.1 重金属矿区植物对Pb的富集积累特性

3.1.1 重金属矿区植物种类

野外调查表明,在重金属含量比较高的矿区及其尾矿库上生长旺盛、分布频率比较高的植物共48种(表2),主要有禾本科(poaceae)植物14种,菊科(asteraceae)植物6种,莎草科(cyperaceae)植物4种,豆科(leguminosae sp.)植物3种,蓼科(polygonaceae)、唇形科(lamiaceae)、桑科(moraceae)各2种,山茶科(theaceae)、山矾科(symplocaceae)等其他15个科植物各1种。

表2 重金属矿区生长的植物种类

Table 2 Plant species in heavy metal mining areas

科名	植物名称	拉丁文名称
禾本科(poaceae)	香根草	<i>Vetiveria zizanioides</i>
	三叶鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>
	水蜈蚣	<i>Kyllinga brevifolia</i>
	鹅观草	<i>Roegneria kamoji</i>
	金丝草	<i>Pogonatherum crinitum</i>
	五节芒	<i>Miscanthus floridulus</i>
	柳叶箬	<i>Isache globosa</i>
	长蒴母草	<i>Lindernia anagallis</i>
	细毛鸭嘴草	<i>Ischaemum indicum</i>
	金色狗尾草	<i>Setaria glauca</i>
	斑茅	<i>Miscanthus sinensis anderss</i>
	芦苇	<i>Phragmites communis</i>
	类芦	<i>Neyraudia reynaudiana</i>
	细柄草	<i>Capillipedium parviflorum</i>
菊科(asteraceae)	豨莶	<i>Siegesbeckia orientalis</i>
	苏门白酒草	<i>Conyza sumatrensis</i>
	长圆叶艾纳香	<i>Blumea balsamifera</i>
	墨旱莲	<i>Herba ecliptae</i>
	野艾蒿	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>
莎草科(cyperaceae)	革命菜	<i>Gynura segetum</i>
	高秆珍珠茅	<i>Scleria terrestris</i>
	水蜈蚣	<i>Kyllinga brevifolia</i>
	毛轴莎草	<i>Cyperus pilosus</i>
豆科(leguminosae)	二歧飘拂草	<i>Gimbristylis dichotomya</i>
	藤黄檀	<i>Derbergia hance</i>
	鸡血藤	<i>Millettia reticulata</i>
桑科(moraceae)	截叶铁扫帚	<i>Lespedeza cuneata</i>
	小构树	<i>Broussonetia kazinoki</i>
唇形科(lamiaceae)	东南悬钩子	<i>Rubus tsangorum</i>
	白苏	<i>Perilla frutescens</i>
蓼科(polygonaceae)	石芥苳	<i>Mosla scabra</i>
	廊茵	<i>Polygonum senticosum</i>
山茶科(theaceae)	火炭母	<i>Polggonum chlnense</i>
	黄瑞木	<i>Adinandra millettii</i>
山矾科(symplocaceae)	白檀	<i>Symplocos paniculata</i>

科名	植物名称	拉丁文名称
败酱科 (valerianaceae)	白花败酱	<i>Patrinia villosa</i>
藜科 (chenopodiaceae)	土荆芥	<i>Chenopodium ambrosioides</i>
樟科 (lauraceae)	绒毛山胡椒	<i>Lindera nacusua</i>
大戟科 (euphorbiaceae)	山乌柏	<i>Sapium discolor</i>
马鞭草科 (verbenaceae)	杜虹花	<i>Callicarpa formosana</i>
柿树科 (ebenaceae)	野柿	<i>Diospyros kaki</i>
堇菜科 (violaceae)	柔毛堇菜	<i>Viola principis</i>
蝶形花科 (papilionaceae)	越南葛藤	<i>Pueraria montana</i>
金星蕨科 (thelypteridaceae)	渐尖毛蕨	<i>Cyclosorus acuminatus</i>
马钱科 (loganiaceae)	驳骨丹	<i>Grendarussa valgaris</i>
木贼科 (quisetaceae)	笔管草	<i>Hippochaete debilis</i>
木兰科 (magnoliaceae)	南五味子	<i>Kadsura longipedunculata</i>
拔契科 (smilacaceae)	拔契	<i>Smilax china</i>

3.1.2 重金属矿区植物对 Pb 的富集能力

根据对调查的 48 种植物地上和地下部分重金属含量的测定结果,剔除部分重金属含量比较低的植物,选择对重金属有较高耐性的 12 种植物列在表 3,由表 3 可知,12 种植物地上部分的 Pb 含量存在较大差异,在 17.9 ~ 1 818.4 mg/kg 之间,说明不同植物在吸收土壤 Pb 的能力存在种间差异。12 种植物中地上部分 Pb 含量超过 1 000 mg/kg 的植物有金丝草、毛轴莎草、柳叶箬和二歧飘拂草,符合 Pb 超富集植物地上部分大于 1 000 mg/kg 的临界标准,其中以柳叶箬为最高,达 1 818.4 mg/kg,其含量大小排序为:柳叶箬 > 毛轴莎草 > 金丝草,而其他植物地上部分 Pb 含量则较低。从地下部分 Pb 含量来看,渐尖毛蕨、笔管草和细毛鸭嘴草等植物根中有很高的 Pb 含量,其中毛轴莎草、长蒴母草、二歧飘拂草和斑茅中 Pb 含量超过 4 000 mg/kg。

从转运系数来看,转运系数大于 1 的植物有金丝草、柳叶箬和长圆叶艾纳香。其中以长圆叶艾纳香的转运系数为最高,达 16.61,其大小排序为:长

圆叶艾纳香 > 柳叶箬 > 金丝草。但只有金丝草、柳叶箬符合地上部分 Pb 含量大于 1 000 mg/kg,转运系数大于 1 的 Pb 超富集植物标准。虽然长圆叶艾纳香的转运系数达 16.61,但其地上部分 Pb 含量只有 58.84 mg/kg,修复潜力较小。因此本研究野外调查发现的金丝草、柳叶箬具备了 Pb 超富集植物的特征,而且达到 Pb 超富集植物标准,但仍需室内实验的验证。

3.2 Pb 胁迫条件下金丝草和柳叶箬对 Pb 的吸收积累特征

根据野外调查结果,选择金丝草和柳叶箬 2 种植物进行室内模拟胁迫实验,进一步验证其对 Pb 的超富集能力。

3.2.1 Pb 胁迫条件下金丝草和柳叶箬对 Pb 的耐性

金丝草和柳叶箬在 Pb 浓度小于 20 000 mg/kg 条件下生长良好,没有出现 Pb 中毒症状,但在 20 000 mg/kg 时,金丝草、柳叶箬表现出了一定的 Pb 毒害症状,表现为根梢末端和须根部分干枯,茎叶先端以及幼嫩组织出现失绿现象,叶片尖端开始发黄,生长受到抑制。

表 3 重金属矿区植物对 Pb 富集能力

Table 3 Pb enrichment ability of different plants in heavy metal mining areas

植物种类	茎叶	根	转运系数	植物种类	茎叶	根	转运系数
金丝草	1231.8 ± 171.5	934.11 ± 15.98	1.32	毛轴莎草	1424.7 ± 70.54	5823.0 ± 476.3	0.24
渐尖毛蕨	290.82 ± 50.11	1448.5 ± 46.62	0.20	斑茅	244.27 ± 15.93	5250.6 ± 33.03	0.05
笔管草	150.41 ± 8.95	2249.8 ± 158.8	0.07	柳叶箬	1818.4 ± 97.81	279.86 ± 183	6.50
驳骨丹	73.19 ± 1.74	84.37 ± 9.15	0.87	二歧飘拂草	1061.9 ± 104.7	5755.6 ± 1214	0.18
长圆叶艾纳香	58.84 ± 5.76	3.54 ± 0.68	16.61	细毛鸭嘴草	411.86 ± 65.99	2979.7 ± 116.7	0.14
五节芒	37.04 ± 2.03	164.92 ± 6.84	0.22	长蒴母草	17.90 ± 5.18	4105.8 ± 175.8	0.00

3.2.2 Pb胁迫条件下金丝草和柳叶箬对Pb的吸收积累特征

由表4可知,随Pb浓度的增加,2种植物Pb含量呈先增加后减少的趋势。在不同Pb处理条件下,柳叶箬和金丝草地上部分Pb含量均超过1 000 mg/kg,并在18 000 mg/kg处理水平时达最大值,金丝草地上和地下部分Pb含量分别达3 789.84 mg/kg和4 964.76 mg/kg,柳叶箬地上和地下部分Pb含量分别达3 411.56 mg/kg和1 523.02 mg/kg。

从转运系数来看,不同Pb处理柳叶箬对Pb的转运系数均大于1,最高达2.35,而且其地上部分Pb含量超过1 000 mg/kg的水平,达到Pb超富集植物标准,因此认为柳叶箬为Pb超富集植物,可利用该植物进行Pb污染土壤上的修复。金丝草只在处理浓度为5 000 mg/kg时转运系数大于1,而且地上部分Pb浓度也超过1 000 mg/kg,达到Pb超富集植物标准,其他处理浓度下均小于1,大部分接近1,但地上部分Pb含量均超过了1 000 mg/kg的标准。

表4 不同Pb处理条件下植物的Pb富集能力

Table 4 Pb enrichment ability of different plants under Pb stress

Pb处理浓度 (mg/kg)	柳叶箬			金丝草		
	地上部分 (mg/kg)	地下部分 (mg/kg)	转运系数	地上部分 (mg/kg)	地下部分 (mg/kg)	转运系数
5 000	1 470.90 ± 629.28	625.92 ± 27.19	2.35	1 436.61 ± 92.20	1 306.01 ± 356.15	1.10
10 000	1 090.40 ± 255.86	484.62 ± 159.51	2.25	2 574.34 ± 500.25	2 626.88 ± 181.21	0.98
12 000	2 000.114 ± 465.30	909.14 ± 58.05	2.20	3 231.06 ± 1 167.75	3 401.11 ± 206.96	0.95
15 000	2 933.00 ± 212.53	1 297.79 ± 328.27	2.26	3 768.95 ± 267.99	3 392.05 ± 1016.30	0.90
18 000	3 411.56 ± 577.22	1 523.02 ± 126.416	2.24	3 789.84 ± 736.37	4 964.76 ± 434.68	0.76
20 000	2 149.37 ± 185.145	959.54 ± 380.45	2.24	3 716.35 ± 421.54	3 953.56 ± 294.62	0.94

4 结 论

(1)在重金属矿区生长的金丝草和柳叶箬地上部分Pb含量分别达1 231.8和1 818.4 mg/kg,转运系数分别为1.32和6.50,表明金丝草和柳叶箬具有Pb超富集植物的基本特征。

(2)在Pb处理浓度小于20 000 mg/kg时,金丝草和柳叶箬生长基本没有受到影响,说明这2种植物具有较好的耐Pb特征。

(3)金丝草和柳叶箬体内Pb含量在18 000 mg/kg处理时达最大值,金丝草地上和地下部分Pb含量分别达3 789.84 mg/kg和4 964.76 mg/kg,柳叶箬地上部分和地下部分Pb含量分别达3 411.56 mg/kg和1 523.02 mg/kg。

(4)不同Pb处理浓度下柳叶箬对Pb的转运系数均大于1,而且其地上部分Pb含量超过1 000 mg/kg,可确定为Pb超富集植物。在Pb处理浓度为5 000 mg/kg时,金丝草地上部分Pb的含量超过1 000 mg/kg,对Pb的转运系数大于1,达到Pb超富集植物的标准。

参 考 文 献

- [1] 唐文浩,岳平,陈恒宇.海南岛砖红壤中Pb、镉的化学形态与转化.中国生态农业学报,2009,17(1):145-149
Tang Wenhao, Yue Ping, Chen Hengyu. Chemical forms and transformations of Pb and Cd in granitic latosol of Hainan Island. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1):145-149(in Chinese)
- [2] Tanhan P., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed (*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson). Chemosphere, 2007, 68(2): 323-329
- [3] 肖青青,王宏镛,王海娟,等.滇白前(*Silene viscidula*)对Pb、锌、镉的共超富集特征.生态环境学报,2009,18(4):1299-1306
Xiao Qingqing, Wang Hongbin, Wang Haijuan, et al. Co-hyperaccumulative characteristics of lead, zinc and cadmium by *Silene viscidula* Franch. Ecology and Environment, 2009, 18(4):1299-1306 (in Chinese)
- [4] Chrysafopoulou E., Kadukova J., Kalogerakis N., et al. A whole plant mathematical model for the phytoextraction of lead by maize. Environment International, 2005, 31(2):

255-262

- [5] Romeh A. A. Phytoremediation of water and soil contaminated with Imidacloprid Pesticide by *plantago major*. International Journal of Phytoremediation, **2010**, 12(2): 188-199
- [6] 汤叶涛, 吴好都, 仇荣亮, 等. 滇苦菜 (*Picris divaricata* Vant.) 对锌的吸收和富集特性. 生态学报, **2009**, 29(4): 1823-1831
Tang Yetao, Wu Yudu, Qiu Rongliang, et al. Zinc uptake and accumulation in *Picris divaricata* Vant. Acta Ecologica Sinica, **2009**, 29(4): 1823-1831 (in Chinese)
- [7] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对神超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响. 环境科学, **2008**, 29(10): 2906-2911
Liao Xiaoyong, Chen Tongbin, Yan Xiulan, et al. Effects of different forms of P fertilizers on phytoremediation for As-contaminated soils using As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. Environmental Science, **2008**, 29(10): 2906-2911 (in Chinese)
- [8] Insook L., Kyunghwa B., Hyunhee K., et al. Phytoremediation of soil co-contaminated with heavy metals and TNT using four plant species. Journal of Environmental Science and Health, **2007**, 42(3): 2039-2045
- [9] Agely A. A., Sylvia D. M., Ma L. Q. Mycorrhizae increase arsenic uptake by the hyperaccumulator *Pteris vittata*. Journal of Environment Quality, **2005**, 34: 2181-2186
- [10] Cho Y. S., Bolick J. A., Butcher D. J. Phytoremediation of lead with green onions (*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns (*Pteris cretica cv Mayii*). Microchemical Journal, **2009**, 91(1): 6-8
- [11] 陈红琳, 张世榕, 李婷, 等. 汉源 Pb 锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究. 农业环境科学学报, **2007**, 26(2): 505-509
Chen Honglin, Zhang Shirong, Li Ting, et al. Heavy-metal accumulation and tolerance of plants at zinc-lead mine tailings in Hanyuan. Journal of Agro-Environment Science, **2007**, 26(2): 505-509 (in Chinese)
- [12] 王学礼, 马祥庆. 重金属污染植物修复技术的研究进展. 亚热带农业研究, **2008**, 4(1): 44-49
Wang Xueli, Ma Xiangqing. Advances in the research of phytoremediation in heavy metal contaminated soils. Sub-tropical Agriculture Research, **2008**, 4(1): 44-49 (in Chinese)
- [13] Estrella G. N., Mendoza C. D., Moreno S. R., et al. The Pb-hyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, responds to Pb(2+) by increasing phytochelatin synthesis via changes in SmPCS expression and in phytochelatin synthase activity. Aquat Toxicol, **2009**, 91(4): 320-328
- [14] 赵磊. 白音诺尔 Pb 锌矿 Pb 超富集植物筛选及其耐性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, **2009**
Zhao Lei. Screening of hyperaccumulators and tolerance research in Baiyinuor lead-zinc mine. Hohhot: Master Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, **2009** (in Chinese)
- [15] 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
Tang Yetao, Qiu Rongliang, Zeng Xiaowen, et al. A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator—*Arabis paniculata* L. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, **2005**, 44(4): 135-136 (in Chinese)