

3 种植物对红壤中镉的富集特性研究

严明理, 刘丽莉, 王海华, 向言词, 冯 涛

(湖南科技大学生命科学学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 重金属超富集植物是重金属污染土壤植物修复的基础, 研究了 3 种重金属富集植物羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜对重金属 Cd 的吸收积累规律, 为植物修复 Cd 污染的农田和生态环境建设提供科学依据。采用盆栽方法, 在不同浓度(0、20、35、50、65、80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Cd 处理下, 分别测定 3 种植物地上部与根部 Cd 的含量, 计算了地上部 Cd 迁移量、根系耐性指数、富集系数, 研究了土壤中 Cd 添加量与植物富集 Cd 量的相关性。结果表明, 随着土壤中 Cd 离子浓度的升高, 3 种植物地上部和根系中的 Cd 含量也在增加, 相关系数都大于 0.99; 综合地上部与根部 Cd 含量, 地上部 Cd 迁移量, 根系耐性指数和富集系数, 3 种植物对 Cd 的富集能力的相对顺序为: 羽叶鬼针草>美洲商陆>紫叶芥菜。羽叶鬼针草、美洲商陆种植在 Cd 处理浓度为 65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中和紫叶芥菜种植在 Cd 处理浓度为 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中栽培时, 3 种植物地上部与根部的 Cd 含量均超过了 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 达到了 Cd 超富集量的标准。羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜对 Cd 有很强的耐受性和富集性, 可以作为先锋植物去修复被 Cd 污染的土壤。

关键词: 植物; 镉; 富集特性; 红壤

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)01-0072-06

Accumulation Characteristics of Cadmium for Three Plants in Red Soil

YAN Ming-li, LIU Li-li, WANG Hai-hua, XIANG Yan-ci, FENG Tao

(School of Life Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Hyperaccumulators are the basis of phytoremediation of soil. It is difficult to find ideal hyperaccumulators that can effectively remediate the soil contaminated with heavy metals. The phytoextraction of Cadmium(Cd)from contaminated soil is a hotspot of environmental protection. Pot experiments were carried out to identify tolerance and accumulation of plants to heavy metal Cd and to elucidate the characteristics of Cd uptake by three plant species(*Bidens maximowicziana*, *Phytolacca americana*, *Brassica juncea*)in red soil. Cd^{2+} at 20, 35, 50, 65 or 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ was applied in a pot. The concentrations of Cd in the roots and shoots were determined by atomic absorption spectrophotometer. Bioaccumulation coefficient, total translocation of Cd, root tolerance index and coefficient of correlation between Cd concentration in soil and plant bioaccumulation were calculated. In the three herbaceous plants, Cd content of above-ground parts and roots of *Bidens maximowicziana*, *Phytolacca americana* and *Brassica juncea* increased linearly with Cd concentration in the soil, with the correlation coefficient of over 0.99. From these calculated indices, *Bidens maximowicziana* had the highest Cd uptake while *Brassica juncea* the lowest. The plants accumulated 100Cd $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when *Bidens maximowicziana* and *Phytolacca Americana* were planted in the soil of over 65Cd $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ while *Brassica juncea* was grown in the soil of 80Cd $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which suggesting the three plants meet the criteria for Cd hyperaccumulator. These results confirmed that *Bidens maximowicziana*, *Phytolacca Americana* and *Brassica juncea* have the strong ability of tolerance and enrichment to Cd, and may be exploited in phytoremediation of a Cd-contaminated soil.

Keywords: plants; Cd; accumulation characteristics; red soil

重金属污染是严峻的环境污染问题之一, 镉(Cd)是一种有毒的重金属, 通过工业废物排放、农业

杀虫剂及含 Cd 肥料施用而进入农业生产系统^[1-2]。许多研究表明, 重金属元素进入土壤后, 会对植物产生明显的生物效应。高浓度的 Cd 不仅影响农作物的产量, 而且还严重影响其质量, 由于大量重金属被带入土壤, 使得农作物的重金属污染也日趋严重。重金属通过食物链形式影响到人和动物的健康, 能引起人类的许多疾病甚至导致死亡^[3-6]。自从 20 世纪 60 年代末

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2005AA219040)

作者简介: 严明理(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为污染土壤的植物修复与植物抗性生理学。E-mail: ymljack@126.com

通讯作者: 冯 涛 E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

日本发现“骨痛病”是由于当地居民食用含 Cd 废水污染的耕地生产的“镉米”所致,人们开始关注 Cd 污染的危害性^[7],并高度重视 Cd 污染的研究及其治理。Cd 污染的治理是目前国际上研究的难点和热点。植物提取修复技术(phytoextraction)是 20 世纪 90 年代发展起来的一种通过金属富集植物去除土壤或水体中有害金属的一种低成本、有效的绿色环境净化技术,因其具有治理效果的永久性、治理过程的原位性、治理成本的低廉性、环境美学的兼容性、后期处理的简易性等特点而迅速得到了公众和学术界的广泛认可和关注,并有望成为一项具有广阔应用前景的治理重金属污染土壤的全新技术^[8]。各国学者在寻找具有高生物产量和超积累重金属植物作了大量研究^[9]。有研究表明,羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)可以作为先锋植物去修复被铅污染的土壤^[10];商陆属(*Phytolaccaceae*)植物是 Mn 积累植物^[11-14];芥菜类植物(*Brassica juncea*)是 Cd、Cr 的富集植物^[15-17]。这些植物具备生长快、生物量大、抗逆性强和种子数量多,可以大规模繁殖等特点,在被污染的土壤上种植这些植物,既可以改良土壤理化性状,能快速修复重金属污染土地,又能美化环境,在水土保持、土壤改良和农业生态系统中生物多样性的维持等方面起着重要的作用。

有研究表明,重金属富集植物一般能富集多种重金属^[18]。本试验选用了 3 种对重金属有富集作用的植物,研究了不同浓度的 Cd 污染下,植物体内 Cd 含量的与分布,重金属 Cd 的迁移总量、根系的耐性指数,植物对 Cd 的吸收积累和耐性特点,为有效开展 Cd 污染土壤的植物修复提供依据,为修复 Cd 污染的土地提供了一条新的方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土壤采自湖南某矿旁边的红壤,测定其中含 Cd 量为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值(水:土=5:1)为 5.52。供试植物羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜的种子采集于湖南镉锌尾矿废弃地。

1.2 试验方法

采用土培盆栽试验,土壤样品采回后经自然风干、锤碎,过 2 mm 筛。土壤的 Cd 处理浓度以 Cd 离子计,土壤设 5 个投加 Cd 水平(分析纯 CdCl_2 , 广东汕头市西陇化工厂),分别为 20、35、50、65、80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (分别标记为处理 1、2、3、4、5),以土壤中未加 Cd 的为对照,标记为 0。每处理重复 3 次。按每 1 kg 土加氮

0.10 g 计算,以尿素为肥源,同相应量的 CdCl_2 配成溶液,与土壤反复混合均匀,每盆土壤为 5 kg,稳定 7 d 后播植物种子,生长过程中用以蒸馏水浇灌。待出苗 10 d 后,每盆保留 5 株,每个处理重复 3 次,结果取平均值。90 d 后,收获植物,测定根长、生物量(干重)和地上部与根部 Cd 含量。

植株样品中 Cd 含量的测定:将收获的植物用自来水洗净根部泥土,按以下标准方法对样品进行洗涤和处理:自来水→蒸馏水→去离子水,整个洗涤时间不超过 2 min,用不锈钢剪刀把清洗后的样品地上部和根部分开。按照微量元素采样和样品制备方法处理植株样,测定样品地上部干重,用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消化,然后用 SOLAAR M6 型原子吸收光谱仪(美国热电)测定各样品中 Cd 的含量。

重金属地上部迁移总量=植株地上部重金属含量×植株地上部生物量

根系耐性指数=各处理根系长度/对照根系长度

富集系数=植株中重金属含量/土壤中重金属含量

用 SAS 6.12 分析地上部和根部 Cd 含量与土壤中 Cd 添加量的相关性。

2 结果与分析

2.1 Cd 在不同植物体内的含量与分布

植物对 Cd 元素的吸收和积累特性是不相同的。由表 1 可知随着土壤 Cd 离子浓度的增加,植物不同部分的增减幅度有显著不同,但 3 种植物的地上部分和根系中的含 Cd 量一直在增高,表明土壤中 Cd 浓度是决定植物对 Cd 的吸收量关键因素。当土壤中 Cd 含量很低时,植物吸收的 Cd 很少。羽叶鬼针草和美洲商陆在 Cd 处理为 $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部 Cd 含量超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,紫叶芥菜在 Cd 处理为 $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部 Cd 含量超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这 3 种植物对 Cd 的富集量达到了 Cd 超富集植物达到的临界含量标准^[19]。这 3 种植物可以认为是 Cd 超富集植物。羽叶鬼针草是铅的超富集植物,美洲商陆是锰的超富集植物,它们对 Cd 也有很强的吸收能力,可能其体内存在较强的金属吸收机制。在本试验条件下, Cd 在各植物种体内的含量顺序是:羽叶鬼针草>美洲商陆>紫叶芥菜。

各植物的茎叶和根系对 Cd 元素的吸收和分布积累特性也是不相同的。茎叶/根系能反映出重金属 Cd 在各植物体内的运输和分配情况^[20-22]。由表 1 可知,各种植物的茎叶/根系值均有不同程度的变化,羽

表1 Cd在不同植物体内的分布与含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 The distribution and content of Cd in the different plants($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

植物		0	1	2	3	4	5
羽叶鬼针草	S	0.25±0.02	34.21±3.03	67.12±5.05	89.20±3.34	117.63±5.21	152.20±6.66
<i>Bidens</i>	R	0.23±0.03	30.45±0.73	62.35±4.14	87.10±2.36	110.16±4.79	143.42±13.24
<i>maximowicziana</i>	S/R	1.09	1.12	1.08	1.02	1.07	1.06
美洲商陆	S	0.28±0.03	31.21±2.57	57.12±3.68	79.20±5.04	105.63±4.23	133.25±5.80
<i>Phytolacca</i>	R	0.23±0.02	30.45±1.38	52.35±3.32	78.10±1.83	103.16±4.51	123.42±5.38
<i>americana</i>	S/R	1.21	1.02	1.09	1.01	1.02	1.07
紫叶芥菜	S	0.22±0.03	22.16±1.79	48.12±2.68	73.20±2.81	89.63±2.86	112.25±4.57
<i>Brassica</i>	R	0.23±0.04	23.45±1.43	49.35±3.27	79.10±4.41	95.16±4.18	123.42±4.02
<i>juncea</i>	S/R	0.96	0.94	0.98	0.93	0.94	0.90

注:S为地上部的茎叶;R为根系;0为对照;1、2、3、4、5分别代表20、35、50、65、80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd处理。

Note: S: leaf and stem; R: root; 0: control; 1, 2, 3, 4, 5 stand for Cd treatments of 20, 35, 50, 65, 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively.

叶鬼针草和美洲商陆各处理浓度下的茎叶/根系之值均大于1.00,说明它能把吸收的Cd较多地运输到地上部;紫叶芥菜各处理浓度下的茎叶/根系之值均在0.9以上,它也能把相当量的Cd运到地上部,从而便于收获和从污染基质中移走重金属。可见在尾矿条件下,自然生长的这3种植被种类有运输重金属Cd的能力,这些植物可以用来修复尾矿废弃地和改良被重金属Cd污染的土壤,加快废弃地的复垦进程。

2.2 重金属迁移总量

重金属迁移总量是用以评价植物修复重金属污染地潜力的一个非常重要的指标。表2可以看出,随着处理浓度的增加,3种植物地上部分的迁移总量增加。这3种植物生长3个月后,在Cd处理4($65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时平均每一株羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜地上部迁移总量分别为2.413 8、2.169 6和1.347 1 mg;在Cd处理5($80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时平均每一株羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜地上部迁移总量分别为3.010 5、2.534 4

和1.633 2 mg。说明这3种植物均有良好修复潜力,其中羽叶鬼针草的修复潜力最大。在本研究中的Cd处理下,3种植物地上部对Cd的迁移总量随处理浓度的上升而增加。由于这3种草本植物的生长迅速、地上部分生物量大(表2),如果大面积地种植,它们对Cd的迁移总量很大,能达到对Cd污染植物修复的要求。

2.3 植物对Cd的耐性

根系耐性指数是各处理的根系长度与对照的根系长度的比值,可以很好地反映植物对重金属的耐性情况^[22]。因为植物与重金属作用时,首先接触的是根系,敏感植物在中毒浓度下,都会有不同程度的损伤,抑制根系的生长,会导致植物营养不良、生长缓慢、生物量小,而耐性植物则没有影响或影响较小,因此根系耐性指数是反映植物体,对重金属耐性的一个非常重要的指标。从图1可以看出,在较低浓度处理下,3种植物的根系耐性指数均大于1.0,说明低浓度的Cd处理对这3种植物根系的生长有促进作用。随着Cd

表2 植物地上部分的生物量($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)和Cd的迁移总量($\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$)

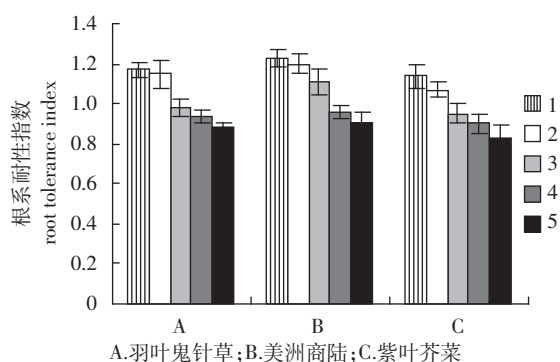
Table 2 Biomass and total Cd translocation of above-ground parts of different plants

植物		0	1	2	3	4	5
羽叶鬼针草	Bio	24.25±1.81	24.12±2.05	22.32±2.19	21.52±1.74	20.52±1.69	19.78±1.16
<i>Bidens maximowicziana</i>	TMT	0.000 6	0.825 1	1.498 1	1.919 6	2.413 8	3.010 5
美洲商陆	Bio	23.12±2.12	27.06±1.43	25.63±1.17	21.83±1.96	20.54±1.96	19.02±2.12
<i>Phytolacca Americana</i>	TMT	0.000 6	0.844 5	1.464 0	1.728 9	2.169 6	2.534 4
紫叶芥菜	Bio	15.87±1.56	17.57±1.55	17.52±1.88	16.75±0.94	15.03±1.80	14.55±1.33
<i>Brassica juncea</i>	TMT	0.000 3	0.389 4	0.830 1	1.201 9	1.347 1	1.633 2

注:0为对照;1、2、3、4、5分别代表20、35、50、65、80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd处理;Bio为地上部生物量;TMT为地上部重金属迁移总量。

Note: 0: control; 1, 2, 3, 4, 5 stand for Cd treatments of 20, 35, 50, 65, 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively; Bio: Biomass of above-ground parts ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$), TMT: Total heavy metal translocated to above-ground parts($\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$)

离子浓度的增加,3种植物的耐性指数降低。在处理3中,羽叶鬼针草和紫叶芥菜就表现出不适应症状,根系长度小于对照,生长受阻。而美洲商陆在处理4中才有不适应表现,说明美洲商陆对Cd有很强的耐性。从植物生长状态看,处理5浓度下,这3种植物叶片均有些萎缩,植株矮化,叶边缘卷曲,说明此浓度能干扰这3种植物的生长,导致生物量下降,但没有导致植物的死亡。



1, 2, 3, 4, 5 分别代表 20、35、50、65、80 mg·kg⁻¹ Cd 处理

A. *Bidens maximowicziana*; B. *Phytolacca americana*; C. *Brassica juncea*

1, 2, 3, 4, 5 stand for Cd treatments of 20, 35, 50, 65, 80 mg·kg⁻¹, respectively.

图 1 不同 Cd 处理下植物根系耐性指数

Figure 1 The root tolerance index of different plants under various Cd treatments

2.4 植物对 Cd 的富集系数

富集系数是衡量植物对重金属积累能力大小的一个重要指标。富集系数越大,说明植物地上部对重金属吸收积累能力越强。为了能更明确地反映植物对土壤中重金属吸收转移能力的强弱,分别计算了3种植物对重金属Cd的富集系数。从表3可以看出,羽叶鬼针草和美洲商陆的根部Cd富集系数在各个处理下均小于地上部Cd富集系数,说明这2种植物重金属主要富集在地下部分。在不同处理浓度时,油菜的地上部Cd富集系数小于地下部Cd富集系数,可以认为油菜重金属主要富集在根部。从这个指标来看,3种草本植物的Cd富集能力大小顺序为:羽叶鬼针草>美洲商陆>紫叶芥菜。

2.5 土壤中 Cd 添加量与植物含 Cd 量的相关性

3种植物地上部和根部Cd含量与土壤中Cd添加量的相关分析结果表明(表4),3种植物地上部和根部的Cd含量都与土壤中Cd添加量呈显著的正相关,相关系数都大于0.99,说明随着外源Cd添加浓度的升高,植物体内的含Cd量也增加。羽叶鬼针草和美洲商陆对Cd的积累系数都是表现为地上部大于根部,

表 3 不同植物对重金属 Cd 的富集系数

Table 3 The bioaccumulation coefficient of Cd in different plants

植物		0	1	2	3	4	5
羽叶鬼针草	S	1.92	1.70	1.91	1.78	1.79	1.90
<i>Bidens maximowicziana</i>	R	1.76	1.50	1.77	1.74	1.69	1.79
美洲商陆	S	2.15	1.55	1.63	1.58	1.62	1.66
<i>Phytolacca Americana</i>	R	1.76	1.51	1.49	1.56	1.58	1.54
紫叶芥菜	S	1.69	1.10	1.37	1.46	1.37	1.40
<i>Brassica juncea</i>	R	1.76	1.16	1.40	1.58	1.55	1.54

注:S为地上部;R为根系;0为对照;1,2,3,4,5分别代表20,35,50,65,80 mg·kg⁻¹ Cd处理。

Note:S;leaf and stem;R;root;0;control;1,2,3,4,5 stand for Cd treatments of 20,35,50,65,80mg·kg⁻¹,respectively.

紫叶芥菜对Cd的积累系数都是表现为根部大于地上部,说明羽叶鬼针草和美洲商陆地上部分富集Cd的能力大于地下部分富集Cd的能力。综合根的积累系数和地上部积累系数可以看出,羽叶鬼针草根部和地上部对Cd的积累系数都是最大的,说明它对Cd的吸收积累能力是最强的,更容易把Cd从地下转移到地上。

表 4 植物吸收 Cd 含量(Y:mg·kg⁻¹)与土壤中 Cd 添加量(X:mg·kg⁻¹)之间的相关性

Table 4 Correlation of concentration of Cd in soil and the quantity of Cd Uptook by Plants

植物 plants	器官 organs	相关方程 correlation equation	相关系数 correlation coefficient
羽叶鬼针草 <i>Bidens maximowicziana</i>	地上部 above-ground parts	$Y=1.874\ 6X-1.340\ 0$	0.998 6 **
	根 root	$Y=1.779\ 0X-1.840\ 0$	0.998 5 **
美洲商陆 <i>Phytolacca americana</i>	地上部 above-ground parts	$Y=1.653\ 7X-1.098\ 6$	0.999 4 **
	根 root	$Y=1.562\ 5X-0.484\ 2$	0.995 0 **
紫叶芥菜 <i>Brassica juncea</i>	地上部 above-ground parts	$Y=1.429\ 4X-1.962\ 7$	0.999 7 **
	根 root	$Y=1.550\ 9X-3.253\ 5$	0.996 8 **

注:**为差异极显著, $P<0.01$ 。

Note:**:significant difference at $P<0.01$ level.

3 讨论

我国植物种质资源十分丰富,近年来重金属的超富集植物已有陆续报道,如东南景天对Zn、Cd的富集^[23],Pb的富集植物羽叶鬼针草、东方香蒲^[24],Mn超富集植物商陆等^[13]。超富集植物是一种珍贵资源,有研究表明超富集植物一般可以富集多种金属^[25]。结合已有的研究,可以认为羽叶鬼针草可以富集Pb和Cd;商陆可以富集Cd、Zn、Mn,同种植物富集不同种类金属的

生物机理是否一样,还需要进一步研究。羽叶鬼针草和美洲商陆在 Cd 处理浓度为 $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,紫叶芥菜在 Cd 处理浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中的富集量超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,都达到了 Cd 超富集量的标准,是否可以认定这 3 种植物为 Cd 超富集植物还需要进行野外试验。

植物对 Cd 的吸收、转运和累积受多种因素的影响,如土壤类型、土壤环境条件和土壤中的 Cd 浓度以及共存离子的种类和浓度等,但最主要的还是取决于植物的种类和环境中的 Cd 浓度^[26],本研究也获得了类似的结果。富集植物吸收的 Cd 在体内的分布有两种情况:一是大部分累积在根部,另一种是把根系吸收的 Cd 大部分运输到地上部。重金属在植株内的运输影响植物对重金属的吸收与耐性、在植物体内各部位的分布以及植物体内物质的结合形态等。植物对 Cd 的吸收与土壤中的 pH 值、离子种类和温度等有关^[27-28]。有报道认为 Cd 进入植物体后绝大部分累积在根部^[28],例如本试验中的紫叶芥菜根部 Cd 含量大于地上部分,运输到地上部的仅是一部分,在植物汁液中也有离子态和络合态 Cd,由于吸持、钝化或沉淀作用,植物根系所吸收的 Cd 向地上部运输困难^[29],但羽叶鬼针草和美洲商陆地上部的 Cd 含量大于地下部,这 2 种植物体内运输 Cd 的机制与油菜是否一致值得研究。

低浓度的 Cd 有刺激植物生长的作用^[30],但作为一种植物非必需元素, $50 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理对一般植物而言都有较强的植物毒性,可以显著地抑制植物的生长,甚至死亡^[31-32]。本试验中的 3 种植物在 Cd 污染条件下,即使吸收了大量的重金属 Cd,植株仍然保持较好的生长态势,这 3 种草本植物与其他植物相比更能忍耐 Cd 的毒害。这 3 种植物对土壤环境中的 Cd 具有较强的吸收特性。植物有在不同程度 Cd 污染土壤上和 Cd 尾矿废弃地具有良好的生长能力,这 3 种植物可以作为植物修复这些污染地的候选植物,但究竟哪种植物对污染土壤的修复潜力和效益最大,还需要田间试验证明。这 3 种植物在湖南的自然条件下生长旺盛,生物量大,可用于湖南的 Cd 污染区的修复,是否能够适用其他地区的气候、土壤等条件,用于其他地区 Cd 污染区的修复需要进一步研究。

此外,紫叶芥菜具有饲料、菜用、观赏等多种用途,但是其对 Cd 的超富集能力可能会引起相应的健康风险,因而应该严格限制其在 Cd 污染土壤中以食用为目的的栽培,防止其进入食物链而导致健康风险。

4 结论

在 Cd 处理浓度为 $0 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,羽叶鬼针草、美洲商陆和紫叶芥菜对 Cd 的富集量随着土壤中 Cd 含量的升高而增加,与 Cd 处理浓度呈显著正相关。通过对 3 种植物的 Cd 富集量研究,羽叶鬼针草和美洲商陆在 Cd 处理浓度为 $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,紫叶芥菜在 Cd 处理浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,植株地上部和根部的 Cd 含量均超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到了 Cd 超富集量的标准,可以作为植物修复 Cd 污染地的候选植物。

参考文献:

- [1] Brett H R, Tessa M M, Daniel P, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: implications for phytoremediation[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 301-306.
- [2] 王真辉, 林位夫. 农田土壤重金属污染及其生物修复技术[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2002(20): 386-393.
WANG Zhen-hui, LIN Wei-fu. Heavy metal pollution in farmland soil and the technology of its bioremediation[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2002(20): 386-393.
- [3] 安红敏, 郑伟, 高扬. 镉的健康危害及干预治疗研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2007(24): 739-742.
AN Hong-min, ZHENG Wei, GAO Yang. Research progress in cadmium toxicity[J]. *J Environ Health*, 2007(24): 739-742.
- [4] Pereira J G G, Molina S M G, Lea P J, et al. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria Juncea*[J]. *Plant and Soil*, 2002, 239: 123-132.
- [5] Zhang H Y, Jiang Y N, He Z Y, et al. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162: 977-984.
- [6] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 等. 铅、镉和铬在叶菜类蔬菜中的累积及对其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 51-55.
DU Ying-qiong, HE Jiang-hua, CHEN Jun-jian, et al. Effects of heavy metals of Pb, Cd and Cr on the growth of vegetables and their uptake[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(1): 51-55.
- [7] 崔玉静, 赵中秋, 刘文菊, 等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因子[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2133-2143.
CUI Yu-jing, ZHAO Zhong-qiu, LIU Wen-ju, et al. Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2133-2143.
- [8] 丁真真. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 19-20.
DING Zhen-zhen. Farmland soil heavy metal pollution in our country and plant repair research[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 19-20.
- [9] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1197-1203.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China

- and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1197-1203.
- [10] 王红旗, 李 华, 陆泗进. 羽叶鬼针草对 Pb 的吸收特性及修复潜力[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 143-147.
- WANG Hong-qi, LI Hua, LU Si-jin. *Bidens maximowicziana's* adsorption ability and remediation potential to lead in soils[J]. *Environment Science*, 2005, 26(6): 143-147.
- [11] Yuan M, Tie B Q, Tang M Z, et al. Accumulation and uptake of manganese in a hyperaccumulator *Phytolacca Americana*[J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(2): 188-190.
- [12] 铁柏清, 袁 敏, 唐美珍. 美洲商陆(*Phytolacca americana* L.): 一种新的 Mn 积累植物[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 340-343.
- TIE Bo-qing, YUAN Min, TANG Mei-zhen. *Phytolacca americana* L.: A new manganese accumulator plant, *Phytolacca Americana* L.: a new manganese accumulator plant[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2): 340-343.
- [13] 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 Sheng-guo, CHEN Ying-xu, LIN Qi, et al. *Phytolacca acinosa Roxb.* (*Phytolaccaceae*): a new manganese hyperaccumulator plant from Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 935-937.
- [14] Xue S G, Chen Y X, Bakera J M, et al. Manganese uptake and accumulation by two populations of *Phytolacca acinosa Roxb.* (*Phytolaccaceae*)[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 160: 3-14.
- [15] Haag-Kerwer A, Schafer H J, Heiss S, et al. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999(50): 1827-1835.
- [16] Bluskov S, Arocena J M, Omotoso O O, et al. Uptake, distribution and speciation of chromium in *Brassica juncea*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7(2): 153-165.
- [17] 苏德纯, 黄焕忠, 张福锁. 印度芥菜对土壤中难溶态镉、铅的吸收差异[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 125-128.
- SU De-chun, HUANG Huan-zhong, ZHANG Fu-suo. The difference between Cd and Pb uptake by indian mustard(*Brassica juncea*) grown in an artificial contaminated calcareous soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 125-128.
- [18] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓掇, 等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.)[J]. 中山大学学报, 2005, 44(4): 135-136.
- TANG Ye-tao, QIU Rong-liang, ZENG Xiao-wen, et al. New found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator—*Arabis panieulata* L.[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(4): 135-136.
- [19] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤. 超积累植物的富集特征及耐性机理[J]. 湖南农业大学学报, 2005, 31(6): 693-697.
- HUANG Yun-xiang, LIAO Bo-han, WANG Zhi-kun. The characteristics of bioaccumulation and tolerance mechanism of hyperaccumulator[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2005, 31(6): 693-697.
- [20] Monni S, Salemaa M, White C, et al. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 211-219.
- [21] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537.
- LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 533-537.
- [22] 石汝杰, 陆引罡. 4 种草本植物对酸性黄壤中铅的吸收特性研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 73-76.
- SHI Ru-jie, LU Yin-guan. Characteristics of Pb uptake by four herbaceous in acid Yellow Soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 73-76.
- [23] Ye H B, Yang X E, He B, et al. Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1030-1036.
- [24] 李永丽, 李 欣, 李 硕, 等. 东方香蒲(*Typha orientalis Presl*)对铅的富集特征及其 EDTA 效应分析[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 555-558.
- LI Yong-li, LI Xin, LI Shuo, et al. Characteristics of a lead accumulator plant, *Typhaorientalis Presl* [J]. *Ecology and Environment*. 2005, 14(4): 555-558.
- [25] Zhao F J, Jiang R F, Dunham S J, et al. Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri* [J]. *New Phytologist*, 2006, 172(4): 646-654.
- [26] Ouariti O, Gouia H, Ghorbal M H. Responses of bean and tomato plants to cadmium: growth, mineral nutrition, and nitrate reduction[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1997, 35: 347-354.
- [27] Green-Ruiz C, Rodriguez-Tirado V, Gomez-Gil B. Cadmium and zinc removal from aqueous solutions by *Bacillus jeotgali*: pH, salinity and temperature effects[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 3864-3870.
- [28] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苤菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)及其对 Cd 的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1386-1389.
- LI Yu-shuang, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1386-1389.
- [29] Liu J N, Zhou Q X, Sun T, et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151: 261-267.
- [30] 于方明, 仇荣亮, 汤叶涛, 等. Cd 对小白菜生长及氮素代谢的影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 506-511.
- YU Fang-ming, QIU Rong-liang, TANG Ye-tao. Effects of cadmium on the growth and nitrogen metabolism in *Brassica chinensis*[J]. *Environment Science*, 2008, 29(2): 506-511.
- [31] 罗玉明, 保曙琳, 丁秉中, 等. 稀土元素铈缓解镉对菱叶的毒害效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 808-813.
- LUO Yu-ming, BAO Shu-lin, DING Bing-zhong, et al. Moderating effect of cerium on cadmium toxication of *Trapa bispinosa* leaves[J]. *Acta Pedologica Science*, 2006, 43(5): 808-813.
- [32] Zhou W B, Qiu B S. Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedumalfredii Hance* (*Crassulaceae*)[J]. *Plant Science*, 2005, 169(4): 737-745.

致谢: 湖南农业大学刘忠松教授对本文的摘要进行了修改和完善, 在此表示衷心感谢。