

头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探

杨 艳, 吴宗萍, 张 敏, 李 政, 李 凌

(西南大学园艺园林学院, 重庆 400715)

摘 要:以野生地被植物头花蓼为试验材料,采用温室盆栽法,对重金属 Cd 在该植物体内的吸收、累积分布以及迁移特性进行了初步研究。结果表明,Cd 对头花蓼生长未造成显著影响,甚至低浓度($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Cd 具有一定的生长促进作用,表现为植物的生物量增加。当 Cd 处理浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,植物的生物量虽有所降低,但与对照相比并无显著差异。植株不同部位对 Cd 的积累具有分异特性,地下部根系的累积量最大,叶次之,茎最小,且随处理浓度的增加而增加,在 Cd 处理浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均达到最大值,分别为 182.69 、 $31.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。植株对 Cd 富集系数和转移系数分别为 $0.46 \sim 1.55$ 和 $0.14 \sim 0.67$,且地上部对 Cd 的最大迁移总量高达 $100.09 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。说明头花蓼对修复 Cd 污染土壤具有一定的潜力,是一种修复 Cd 污染较好的景观地被植物种质资源。

关键词:头花蓼;Cd 污染;吸收;富集

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2094-06

A Primary Research on *Polygonum capitatum*'s Absorption Property and Accumulation Rule to Heavy Metal Cd

YANG Yan, WU Zong-ping, ZHANG Min, LI Zheng, LI Ling

(College of Horticulture and Landscape, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: By using wild groundcover plant—*P. capitatum* as the experiment material and the pot-culture method, this paper studied the absorption, accumulation and transference properties of heavy metal Cd in the plant. The results showed that Cd had no remarkable impact on the growth of *P. capitatum*, and even low concentration of Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) could promote the growth, and increase the biomass. When the Cd concentration reached $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the biomass had somewhat decreased but there was no distinctive difference comparing with the control. The different parts of the plant had a quite different accumulation amounts of Cd and the sequence was root>leaf>stem. The accumulation amount would increase as the increase of treatment concentrations of Cd in soils, and reached a peak at the Cd concentration of $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the maximum quantity being $182.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in root, $31.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in leaf and $10.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in stem. The bioaccumulation coefficient of Cd was $0.46 \sim 1.55$, and the translocation coefficient was $0.14 \sim 0.67$ for Cd, and the largest total transference amount in shoot was up to $100.09 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$. These suggested that *P. capitatum* had the potential to remediate Cd polluted soil. Therefore, it is a preferable germplasm resources of landscape groundcover plant for phytoremediation of Cd polluted soil.

Keywords: *Polygonum capitatum* Ham ex D. Don; Cd pollution; absorption; accumulation

Cd 是生物毒性最强的重金属元素之一,在土壤中移动性强,易被植物吸收累积,对植物产生明显毒害。据统计,我国约有 1.3 万 hm^2 耕地受到 Cd 污染,每年仅生产受 Cd 污染的稻米就达 5 万 t 以上,严重

影响粮食生产和食品安全^[1]。因此,Cd 污染土壤的治理一直是倍受关注的热点研究课题^[2-3]。目前,国内外关于 Cd 对植物的毒害、生理特性以及生态效应等方面的研究已有大量报道^[4-8],但以花卉为供试材料的研究还很少。

头花蓼(*Polygonum capitatum* Buch. -Ham. ex D. Don)别名四季红、铜矿草、石辣蓼、石莽草等,属蓼科蓼属多年生草本植物,叶片彩色,花期长,匍匐成片生长形

收稿日期:2010-05-29

作者简介:杨 艳(1984—),女,四川广安人,硕士研究生,主要从事园林植物生物技术与遗传育种研究。E-mail:317383669@qq.com

通讯作者:李 凌 E-mail:hortlily@263.net

成良好景观效果,是一种理想的彩叶花卉植物^[9],具有较高的观赏价值,是作为边坡护理和地被等的良好材料^[9]。本文以头花蓼为试验材料,通过温室盆栽试验,初步研究其对重金属 Cd 的吸收、累积分布以及迁移特性,为筛选出适合重金属 Cd 污染土壤的景观地被植物提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料头花蓼(*Polygonum capitatum* Ham ex D. Don)采自重庆北碚缙云山,后种植于西南大学网室,为无性系扦插苗。

土壤为温室花房用土,pH 值 5.5,为砂质黄壤土,有机质 4.06%,全氮 $0.227 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $71.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $27.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $62.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤重金属背景值为:Pb $15.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

采用温室盆栽试验,温室温度控制为 $18 \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 75%~90%,日均光照强度约为 40.7 klx 。供试土壤经自然风干后,捣碎、剔除杂物后过 2 mm 的筛。准确称取烘干土壤 3.0 kg ,装入 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的塑料花盆中,分别向土壤中加入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液。土壤中的 Cd 处理浓度以纯 Cd 计,设 5 个水平,分别为 0.5 、 1.0 、 5.0 、 10.0 、 $50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (标记为 T1、T2、T3、T4、T5),以土壤中未加 Cd 的为对照,标记为 CK。每个处理重复 3 次。加入重金属后喷施清水充分混匀,平衡 1 个月。

选取生长势一致的头花蓼无性系扦插苗,长约 10 cm,移栽至经不同浓度 Cd 处理的土壤中,每盆 5 株,生长期间,根据土壤缺水状况,不定期浇蒸馏水,保持土壤含水量为田间持水量的 70%,定期观察并记录其生长状况。90 d 后收获植株,测定生物量(干重)和根系、茎、叶片中的 Cd 含量。

1.3 样品制备

将植株收获后,用自来水冲洗以除去表面的污物和泥沙,再用去离子水冲洗 2 遍。根部放入 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EDTA- Na_2 溶液中交换 15 min,以除去表面的重金属离子,再用去离子水冲洗 2 遍,分成根、茎、叶三部分,于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 30 min 后转至 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重并称重。将干样用植物微样粉碎机粉碎,过 2 mm 筛备用。

1.4 样品的测定方法

样品前处理采用干灰化法,样品中 Cd 的测定采

用原子吸收分光光度法^[10]。

1.5 数据处理与分析

本试验所有数据采用 SPSS13.0 分析软件进行 One-Way ANOVA 方差分析,并利用最小显著性差异检验(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 Cd 对头花蓼生物量的影响

通过定期观察发现,头花蓼 Cd 处理 90 d 后,植株生长正常,无萎焉、死亡植株出现。图 1、图 2 列出了头花蓼植株在不同浓度的 Cd 处理下的地上部、根部生物量。从图 1、图 2 可以看出,头花蓼的生物量随处理浓度升高呈现“低促高抑”的现象。地上部生物量在 T3 达到最高值,与对照相比增加了 7.4%,在 T5 降至最低,与对照相比降低了 4.5%。经 LSD 分析表明,地上部生物量在 T3 与对照和 T5 组间差异达到极显著水平($P < 0.01$),其余各处理组间差异均不显著($P > 0.05$);地下部生物量各处理间差异不显著。可见,头花蓼对 Cd 有极强的耐性,高浓度的 Cd 处理对头

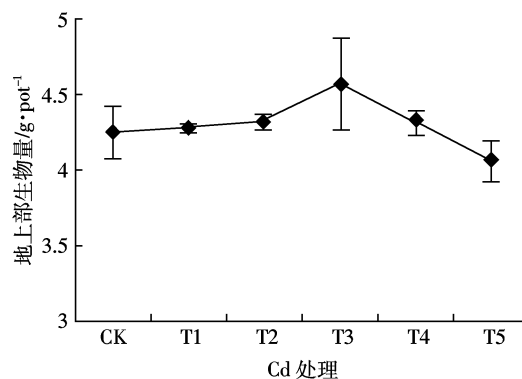


图1 Cd 对头花蓼的地上部生物量的影响

Figure 1 Effect of Cd above-ground dry biomass of *P. capitatum*

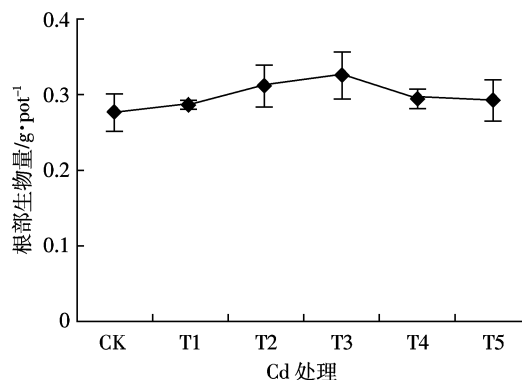


图2 Cd 对头花蓼的根部生物量的影响

Figure 2 Effect of Cd on root dry biomass of *P. capitatum*

花蓼生长有抑制作用。

2.2 Cd 在头花蓼体内的累积分布规律

重金属对植物的影响与植物体内的重金属累积量密切相关。头花蓼受不同浓度的 Cd 污染后,地下部根系的累积量最大,叶片次之,茎中的累积量最小,各部位的 Cd 累积顺序为:根>叶>茎(表 1)。

随土壤中 Cd 添加量的增加,头花蓼各部位 Cd 累积量均呈增加的趋势,各处理间差异达到显著或极显著水平。以根部为例,当土壤中重金属 Cd 添加浓度为 T1(0.5 mg·kg⁻¹)、T2(1.0 mg·kg⁻¹)、T3(5.0 mg·kg⁻¹)、T4(10.0 mg·kg⁻¹)、T5(50.0 mg·kg⁻¹)时,根系中 Cd 累积量分别是对照的 3.71 倍、5.06 倍、10.30 倍、20.63 倍、85.37 倍。为了进一步研究 Cd 在头花蓼中的累积分布规律,对头花蓼各部位的 Cd 累积量变化趋势进行了方程拟合及显著性检验。由表 2 可知,随着处理浓度的增加,根、茎、叶中的 Cd 累积量均呈线性增加, R^2 分别为 0.999、0.998、0.999, 达到极显著水平。可见,头花蓼具有能够累积更多重金属 Cd 的可能。

2.3 富集系数与转移系数

富集系数是衡量植物对重金属累积能力大小的一个重要指标^[1],其值越大,表明植物地上部对重金属的吸收累积能力越强,越有利于植物修复污染土壤。一般用植物中某种元素含量与土壤中该种元素含量的比值来表示。植物地上部富集系数大于1,意味着植株地上部的某种重金属含量大于所生长土壤中该种重金属含量,是超积累植物区别于普通植物对重金属积累的一个重要特征^[2]。从图 3 可以看出,在 Cd 处理浓度为 0.5 mg·kg⁻¹ 和 1.0 mg·kg⁻¹ 时,头花蓼地上部的 Cd 富集系数大于 1,分别为 1.55 和 1.27。且随着处理浓度的增加呈降低的趋势,当 Cd 处理浓度大于 5.0 mg·kg⁻¹,降低趋势渐缓,各处理间差异达到显著或极

表 2 不同浓度 Cd 处理下植株各部位的 Cd 含量的曲线拟合模型

Table 2 Accumulating models of Cd in *P. capitatum* under different

Cd concentrations		
器官	相关方程	R^2
根	$y=3.555x+5.477$	0.999**
茎	$y=0.202x+0.259$	0.998**
叶	$y=0.621x+0.257$	0.999**

注:y 代表头花蓼各部位的 Cd 含量,mg·kg⁻¹;x 表示 Cd 处理浓度,mg·kg⁻¹;F 检验 ** $P<0.01$,* $P<0.05$ 。

Note:y denotes the accumulation amount of Cd in different parts of *Poly-gonum capitatum*, x denotes the concentration of Cd; F test, ** $P<0.01$, * $P<0.05$.

显著水平。

转移系数(TF)是指植物地上部某种元素含量与地下部该种元素含量的比值,反映植物将重金属从地下部分转移到地上部分的能力。转移系数越大,植物向地上部分转移重金属的能力就越强^[13]。从图 3 可知,头花蓼的转移系数随 Cd 处理浓度的变化趋势不明显,变化范围为 0.10~0.14,根部的重金属含量远高

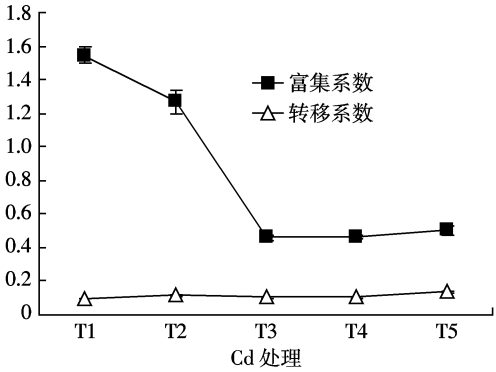


图 3 不同浓度处理下头花蓼的富集系数和转移系数
Figure 3 Bioaccumulation factor and translocation factor of Cd in *P. capitatum* under different Cd concentrations

表 1 不同浓度 Cd 处理下头花蓼植株 Cd 的累积与分布

Table 1 Accumulation and distribution of Cd ions in *P. capitatum* under different Cd concentrations

处理	根/mg·kg ⁻¹	茎/mg·kg ⁻¹	叶/mg·kg ⁻¹	地上部迁移总量/μg·plant ⁻¹	根部迁移总量/μg·plant ⁻¹
CK	2.14±0.21Ee	0.15±0.02Ef	0.24±0.01Ef	0.90±0.07Ff	0.59±0.07Dd
T1	7.94±0.09De	0.37±0.07Ee	0.96±0.01De	3.31±0.01Ee	2.27±0.07CDd
T2	10.84±0.07Dd	0.75±0.12Dd	1.52±0.04Dd	5.48±0.25Dd	3.38±0.28CDed
T3	22.04±1.31Cc	1.01±0.12Cc	2.98±0.02Cc	10.48±0.40Cc	7.17±0.49BCc
T4	44.15±3.05Bb	2.37±0.07Bb	5.76±0.08Bb	19.94±0.18Bb	13.04±1.42Bb
T5	182.69±9.53Aa	10.34±1.15Aa	31.47±0.57Aa	100.09±0.18Aa	53.63±6.20Aa

注:数据为平均值±标准差,不同大写字母 A、B、C 表示 $P<0.01$ 水平上差异极显著;不同小写字母 a、b、c 表示 $P<0.05$ 水平上差异显著。
Note: values are mean±SD, the values followed by different bigger letter are significantly different at $P<0.01$, the values followed by different smaller letter are significantly different at $P<0.05$.

于地上部,说明头花蓼对 Cd 的转运能力较低。

2.4 重金属迁移总量

重金属迁移总量(迁移总量=植物重金属含量×生物量)^[14]是评价植物修复重金属污染地潜力的一个非常重要的指标。以往发现的超富集植物大都生物量小,生长缓慢,重金属迁移总量相对不高^[15]。自然种群中存在着对重金属耐性较强的植物,虽然体内的重金属含量没有达到超积累植物的临界标准,但其生长快,生物量大,其重金属迁移总量还是很可观的,这类植物对土壤的修复能力亦不可忽视。从表 1 可以看出,头花蓼地上部的 Cd 迁移总量随处理浓度的增加而增加,各处理组间、各处理组与对照组间差异极显著($P<0.01$)。在 T5($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时达到峰值,为 $100.09\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ 。地下部的 Cd 迁移总量随处理浓度的增加而呈递增的趋势,低浓度(T1 和 T2)处理下与对照组间差异不显著($P>0.05$),在高浓度(T3、T4、T5)处理下组间与对照组间差异均极显著($P<0.01$)。说明头花蓼对 Cd 污染地的土壤有良好的修复效果。

3 讨论

Cd 是植物的非必需元素,在植物体内累积到一定程度,就会影响植物的正常生长和发育,最终表现为生物量下降,甚至死亡。植物对 Cd 的耐性因 Cd 污染浓度和植物种类不同而有所差异。有研究表明,低浓度的 Cd 对某些植物的生长发育有一定的促进作用^[16],较高浓度的 Cd 会降低植物的光合生产力,干扰体内营养物质的迁移和再分配,影响植物生长。本研究中头花蓼在低浓度 Cd 处理时表现出生长良好,在高浓度 Cd 处理时生长受到抑制,进一步证实了这种“低促高抑”现象,这与王业社等^[17]的观点一致。生物量的下降程度可以用来表示植物耐受性的大小^[18]。Sud-hakar 等提出以生物量减少 20%作指标来确定植物耐性临界值上限的标准。在本研究中,头花蓼在 Cd 处理浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,头花蓼地上部吸收了大量的 Cd,植株仍保持良好的生长势,生物量与对照相比降低了 4.49%,未达到植物耐性临界值上限标准。从生物量的变化情况来看,头花蓼对 Cd 具有较高的金属耐性,可作为污染地的候选植物。

重金属在植物体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的物质结合形态。一般而言,重金属在普通植物

体内主要累积在根部,向地上部位转移相对较少。本研究中头花蓼对 Cd 的吸收表现为根>叶>茎的分布格局,与刘恩玲等^[19]对番茄的研究结果相符。但刘周莉等^[20]对金银花的研究结果表明,Cd 在植株内的分布为根>茎>叶,与本研究结果有所不同。这可能是因为大部分的 Cd 在根部与细胞壁中的果胶酸盐和根内的蛋白质、多糖类、核酸类等结合形成稳定的大分子物或不溶性的有机分子而沉积^[7],这在一定程度上减轻了重金属对植物的毒害,提高了植株对重金属的耐性,而转移到地上部分的 Cd,在茎、叶中的分配因植物种类的不同也有差异。头花蓼在茎内的富集量低于叶,说明 Cd 在茎内的储存和结合较少,但能通过木质部导管运输到叶细胞,表现出叶内富集量增高,其分子机理和装载机制有待进一步的研究。

根据超积累植物定义,Cd 超积累植物地上部的重金属含量要达到 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21],且富集系数要大于 1。以往发现的 Cd 超富集植物,大都存在生物量小、生长缓慢、地域性强等缺陷^[22]。本研究中,头花蓼的地上部 Cd 含量虽未达到 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准,但具备了耐 Cd 植物抵御 Cd 毒害的某些特征和能力^[23]。地上部对 Cd 的迁移总量分别占全株总迁移量的 59.27%~65.11%,其最大迁移总量为 $100.09\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$,远远超过刘鑫等^[24]对紫苏的研究结果($66.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)和孙约兵等^[25]对三叶鬼针草的研究结果($17.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)。据资料记载,头花蓼根系发达,节节生根,生物量大,适应性强,产量约为 $2\text{ }000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[26],且兼具一定的景观价值,若大面积种植,修复效果还是很可观的。另一方面,头花蓼是一种药用植物,其根、茎和叶均可入药,《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中规定 Cd 元素的含量应小于 $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验条件下,头花蓼茎的 Cd 最低含量为 $0.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过了安全标准。因此,用于绿化修复的头花蓼收获后应集中焚烧处理,回收重金属,防止其混入药品市场,污染药材。

4 结论

(1)低浓度的 Cd 处理能促进头花蓼生长,超过一定浓度则抑制生长,在本试验浓度处理最大 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,头花蓼生长正常,顺利完成生命周期,生物量与对照相比只降低了 4.49%,差异不显著,表现出对 Cd 的强耐受性。

(2)头花蓼各部位对 Cd 的吸收具有分异特性,地

下部根系的累积量最大,叶次之,茎最小,且各部位的 Cd 累积量随处理浓度的增加均呈极显著线性增加,在 Cd 处理浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均达到最大值,分别为 182.69 、 $31.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3)头花蓼的 Cd 富集系数为 $0.46 \sim 1.55$, Cd 转移系数为 $0.14 \sim 0.67$, 对 Cd 的最大迁移总量为 $100.09 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。说明头花蓼对修复 Cd 污染土壤具有一定潜力,是一种修复污染较好的景观地被植物种质资源。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Baker AJM, S P, McGrath R D, Reeves, et al. Metal hyperaccumulator plants A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal-polluted soil [C]//Terry N, Bañuelos G, Vangronsveld J. Phytoremediation of contaminated soil and water. Florida lewis publishers, Boca Raton, 2000:85-1071.
- [3] 魏树和, 周启星, 王 新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3):167-171.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3):167-171.
- [4] Grytsuk N, Arap is G, Perepelyatnikova L, et al. Heavy metals effects on forage crop s yields and estimation of elements accumulation in plants as affected by soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 354(223):224-231.
- [5] Pentari D, Typou J, Goodarzi F, et al. Comparison of elements of environmental concern in regular and reclaimed soils, near abandoned coal mines Ptolemais Amynteon, northern Greece: Impact on wheat crop s[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 65(122):51-58.
- [6] 朱光旭, 黄道友, 朱奇宏, 等. 苧麻镉耐受性及其修复镉污染土壤潜力研究[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6):752-755.
ZHU Guang-xu, HUANG Dao-you, ZHU Qi-hong, et al. Tolerance and phytoremediation potential of Ramie for cadmium contaminated soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(6):752-755.
- [7] 张金彪, 黄维南, 柯玉琴. 草莓对镉的吸收积累特性及调控研究[J]. 园艺学报, 2003, 30(5):514-518.
ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan, KE Yu-qin. Cadmium absorption characteristics of Strawberry and regulative measures[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(5):514-518.
- [8] 曹 莹, 刘 洋, 王国骄, 等. 铅-镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、镉的差异[J]. 玉米科学, 2009, 17(1):80-85.
CAO Ying, LIU Yang, WANG Guo-jiao, et al. Differences in lead and cadmium concentrations among plant tissues of 25 maize cultivars under the combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Science*, 2009, 17(1):80-85.
- [9] 韦美玉, 赵 洪. 头花蓼: 一种有潜力的野生花卉[J]. 中国花卉盆景, 2005(3):8.
- [10] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
YANG Jian-hong, WANG Cheng-lin, DAI Heng-lin. Soil analysis and environmental monitoring of agricultural[M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [11] Salt ED, Blaylock M, Kumar PBAN, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995(13):468-474.
- [12] FAYIGA A O, MAL Q, CAO XD, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Peris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2):289-296.
- [13] Mattina M, Lannucci, Berger W, Musante C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124:375-378.
- [14] Reeves RD. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants[C]//Intercept L. Baker Vegetation of Ultramafic (serpentine) Soil. Andover UK: Hampshire, 1992:253-277.
- [15] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报, 2001, 21(2):326-327.
WANG Qing-ren, CUI Yan-shan, DONG Yi-ting. Phytoremediation: An effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):326-327.
- [16] Greger M, Lindberg S. Effect of Cd^{2+} and EDTA on young sugar beets (*Beta vulgaris*) I: Cd^{2+} uptake and sugar accumulation[J]. *Plant Physiology*, 1986, 66:69-74.
- [17] 王业社, 刘可慧. 美人蕉(*Canna indica* Linn)镉胁迫的抗氧化机理[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2710-2715.
WANG Ye-she, LIU Ke-hui. Stress responses and resistance mechanism of *Canna indica* Linn to cadmium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5):2710-2715.
- [18] 任安芝, 高玉葆, 刘 爽. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2):112-116.
REN An-zhi, GAO Yu-bao, LIU Shuang. Effect of Cr, Cd and Pb on free proline content etc in leaves of *Brassica Chinensis* L.[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2000, 6(2):112-116.
- [19] 刘恩玲, 王 亮, 孙 继, 等. 土壤-番茄体系中 Cd、Pb 的累积特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(1):189-193.
LIU En-ling, WANG Liang, SUN Ji, et al. Uptake and accumulation of Cd and Pb in different organs of Tomato[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1):189-193.
- [20] 刘周莉, 何兴元, 陈 玮, 等. 镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8):1579-1583.
LIU Zhou-li, HE Xing-yuan, CHEN Wei, et al. Growth responses and cadmium accumulation of *Lonicera japonica* under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8):1579-1583.
- [21] Willam S, John B. Phytoremediation in wetland ecosystems: Progress, problems, and potential[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, 21(6):607-635.

- [22] 屈 冉, 孟 伟, 李俊生, 等. 土壤重金属污染的植物修复[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 626–631.
QU Ran, MENG Wei, LI Jun-sheng, et al. Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 626–631.
- [23] 徐正浩, 沈国军, 诸常青, 等. 植物镉忍耐的分子机理[J]. 应用生态学报, 2006, 117(6): 1112–1116.
XU Zheng-hao, SHEN Guo-jun, ZHU Chang-qing, et al. Molecular mechanisms of plant resistance to cadmium toxicity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 117(6): 1112–1116.
- [24] 刘 鑫, 张世熔, 朱 荣, 等. 镉铜胁迫下紫苏的生长响应和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2264–2269.
LIU Xin, ZHANG Shi-rong, ZHU Rong, et al. Effect of cadmium and copper stress on the growth response and accumulation characteristics of *Perilla frutescens* (L.) Britt[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2264–2269.
- [25] 孙约兵, 周启星, 王 林, 等. 三叶鬼针草幼苗对镉污染的耐性及其吸收积累特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 3028–3035.
SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, WANG Lin, et al. Characteristics of cadmium tolerance and bioaccumulation of *Bidens pilosa* L. seedlings[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(10): 3028–3035.
- [26] 孙长生, 韩见宇, 魏升华, 等. 不同肥料及施用量对头花蓼产量的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2005, 19(2): 20–22.
SUN Chang-sheng, HAN Jian-yu, WEI Sheng-hua, et al. Effects on the output of *Polygonum capitatum* Buch.-Ham. ex D. Don with different fertilizers and applying amount [J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2005, 19(2): 20–22.

致谢:感谢李凌教授对本研究的全力支持以及赵辛老师对文中英文摘要的斧正。