

野苘蒿对镉的富集及其镉耐性

李 云, 张世熔*, 张少卿, 邓良基, 李 婷, 徐小逊

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘 要:通过盆栽试验研究了不同镉(Cd)浓度(0、30、60、90、120、150、180 mg·kg⁻¹)胁迫下野苘蒿(*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore)的生长及其对 Cd 的富集特征。结果表明,随着 Cd 添加水平的增大,处理组野苘蒿的主根长、株高、叶绿素含量、根和地上部生物量均呈降低趋势,且主根长、株高、根和地上部生物量均显著低于对照植株;当 Cd 添加水平不断提高,处理组野苘蒿根和地上部 Cd 浓度呈显著增加趋势,而累积总量呈先增加后下降的趋势,但仍显著高于对照植株。处理 Cd 浓度为 180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿地上部 Cd 浓度最高,为 1 288.12 mg·kg⁻¹;处理 Cd 浓度为 60 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿地上部 Cd 累积量最高,为每盆 4.28 mg。当 Cd 浓度≤90 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿生长正常,未出现 Cd 中毒症状。野苘蒿地上部 Cd 富集系数和转移系数分别为 3.48~21.71 和 1.12~2.31。因此,野苘蒿对 Cd 具有较强的耐受性和转运能力以及其地上部对 Cd 的累积能力,适合于 Cd 污染土壤的植物修复。

关键词:野苘蒿;镉;耐性;富集

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1296-07

Cadmium Tolerance and Accumulation Characteristics of *Crassocephalum crepidioides*

LI Yun, ZHANG Shi-rong*, ZHANG Shao-qing, DENG Liang-ji, LI Ting, XU Xiao-xun

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Phytoremediation of soil heavy metals is generally considered as a clean and economical method of bioremediation. In this study, a pot experiment was used to investigate growth responses and Cd accumulation of *Crassocephalum crepidioides*, under treatments of Cd concentration gradient at 0~180 mg·kg⁻¹. With the increasing of Cd-spiked level, main root length, plant height, chlorophyll content and root-shoot biomass of *C. crepidioides* decreased, and compared to the control treatment, main root length, plant height and root & shoot biomass decreased significantly. When the Cd-spiked level increased, Cd concentration in the root and shoot of *C. crepidioides* increased remarkably, while the total amount of Cd accumulation in the root and shoot at first increased and then decreased, but still much higher than the control. In the shoot of *C. crepidioides*, Cd concentration was highest (1 288.12 mg·kg⁻¹) at the Cd-spiked level of 180 mg·kg⁻¹, and Cd accumulation reached the biggest amount (4.28 mg·pot⁻¹) when Cd was spiked at 60 mg·kg⁻¹. *C. crepidioides* could grow normally without visible symptoms of Cd toxicity under treatments of Cd-spiked concentrations ≤90 mg·kg⁻¹. The bioconcentration factor and translocation factor in the shoot were 3.48~21.71 and 1.12~2.31, respectively. These results indicated that *C. crepidioides* showed strong capability in tolerance, accumulation and transport of Cd, and it could be used for Cd-phytoremediation.

Keywords: *Crassocephalum crepidioides*; cadmium; tolerance; accumulation

Cd 是一种植物非必需的有害重金属, 在环境中具有化学活性强、移动性大、生物毒性强且持久等特点, 对植物和动物均有很高的毒性^[1], 通过食物链的富

集危及人类健康^[2-3]。目前, 土壤重金属 Cd 污染的主要来源是人类的开矿、冶炼、电镀、污水灌溉、过量使用化肥和杀虫剂^[4-6]等活动。四川西部矿产资源丰富, 近年来采矿业和冶金业发展迅速。富含重金属 Cd 的铅-锌矿、铜矿和镍矿的尾矿造成矿区附近耕地、林地和牧草地土壤 Cd 污染严重^[7-8]。因此, 治理该地区的镉污染土壤就显得尤为迫切和重要^[9]。

植物修复是指通过植物系统及其根际圈微生物

收稿日期: 2012-02-06

基金项目: 科技部科技支撑计划(2008BAK51B01); 四川公益性科技攻关专项(2007NGY006); 博士专项(01470404)

作者简介: 李 云(1980—), 女, 陕西咸阳人, 博士, 讲师, 主要从事环境污染生态毒理学研究。E-mail: wya313@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 张世熔 E-mail: rsz01@163.com

体系的吸收、挥发和转化、降解等作用机制来降低土壤中重金属的毒性,以期达到清除污染,修复和治理土壤为目的的技术^[10-15]。污染土壤植物修复技术以其不破坏土壤物理结构,能够维持土壤原有基本化学形状,保持土壤生物学活性和无二次污染等优点而备受青睐^[16-19]。

野苘蒿是一年生草本植物,广泛分布于非洲、南美洲、日本、东南亚和中国南方。在四川省西部地区,野苘蒿是生长在包括大渡河和安宁河在内的干旱峡谷铅-锌矿区的主要杂草之一^[20]。有研究表明,野苘蒿对低Cd浓度($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)有一定的富集能力,试验采用日本的野苘蒿材料,并未揭示高Cd浓度下野苘蒿对Cd的耐性和富集特征^[21]。本研究采用盆栽试验,研究了Cd胁迫下野苘蒿对Cd吸收和累积的特性,旨在为野苘蒿是否可用于Cd污染土壤修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

采自四川省西部铅-锌矿区的野苘蒿经过扦插培育后使用。

1.2 试验处理设计

试验设置在四川省雅安市四川农业大学试验站,地理位置为 $102^{\circ}59' \text{ E}$ 、 $29^{\circ}59' \text{ N}$ 。采用盆栽土培,供试土壤类型为普通潮湿冲积新成土,粘粒含量 $198 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,粉砂粒含量 $384 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,砂粒含量 $418 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有机质含量 $22.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $120.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $14.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $171.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.37,Cd浓度 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

将供试土壤经风干、过2 mm筛后,与一定量的 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 充分混合后装入塑料盆(直径20 cm、高20 cm)中,每盆装土2.0 kg。试验共设7个处理,分别为0 (CK)、30、60、90、120、150和 $180 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土,每个处理重复3次。用清水充分混匀、平衡4周后,选择生长基本一致的野苘蒿幼苗(株高5~6 cm,4~5片叶子)分别移栽入各盆中,每盆3株苗,放置在四川省雅安市四川农业大学试验站玻璃温室中。试验过程中不施肥,土壤含水量保持在田间持水量的70%,定期观察并记录其生长状况。为防止Cd淋溶渗漏损失,在盆下放置塑料托盘并将渗漏液倒回盆中^[22]。移苗后70 d收获样品测定。

1.3 测定分析方法

1.3.1 株高、主根长测定

移苗后每10 d,每个处理(3次重复)用皮尺测量

一次株高,以9株植物的平均株高计。主根长在植株收获冲洗干净后用皮尺测量,与株高计量方法一致。

1.3.2 叶绿素含量测定

采集主茎干上的第五到第七对叶片,称其鲜重(Fresh weight,FW),然后用80%的丙酮提取,具体方法参照Hegedüs等^[23]的方法,结果以叶片鲜重计。

1.3.3 生物量测定

每个处理(3次重复)3株植物全部取样,用自来水充分冲洗以去除粘着于植株上的泥土和污物,再用去离子水冲洗,沥去水分,105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,分为根、茎、叶3部分,分别称干重、磨碎备用,通过计算获得每盆植株总重。

1.3.4 植物和土壤样品中镉含量测定

植物样品用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比为4:1)法消化,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定Cd含量。

植物收获后,每个处理(3个重复)分别采集土壤样品,风干,过2 mm尼龙筛,然后称取1.0 g土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{:HCl:HClO}_4$ (体积比为1:2:2)法消化,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定Cd含量。

1.3.5 野苘蒿富集和耐性参数计算

根部和地上部镉生物富集系数(Bio-concentration factor,BCF)^[24]的计算公式如下:

$$\text{BCF} = \frac{\text{根或地上部镉平均浓度}}{\text{土壤中镉平均浓度}}$$

转移系数(Translocation factor,TF)^[25]的计算公式如下:

$$\text{TF} = \frac{\text{地上部镉平均浓度}}{\text{根部镉平均浓度}}$$

植株地上部耐性指数(Tolerance index,TI)^[26]的计算公式如下:

$$\text{TI} = \frac{\text{镉处理的植株地上部分平均干重}}{\text{无镉处理的植株地上部分平均干重}} \times 100$$

1.3.6 数据处理

试验数据用Microbial Excel 2003和SAS8.0软件进行方差分析(LSD检验),数值表示采用3次重复的平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 Cd处理对野苘蒿生长的影响

随着处理Cd浓度增加,野苘蒿主根长呈下降趋势(表1)。当处理Cd浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,与对照相比没有显著差异;但当Cd浓度为 $60\sim 180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,主根长显著短于对照植株的($P<0.05$);当处理Cd浓

表 1 不同浓度 Cd 处理对野苘蒿生长和生理特性的影响

Table 1 Effects of different Cd treatments on growth and physiological characteristics of *C. crepidioides*

处理/mg·kg ⁻¹	主根长/cm	株高/cm	叶绿素含量/mg·g ⁻¹ FW
0(CK)	18.83±2.72 a	61.67±3.86a	0.57±0.12 a
30	16.33±1.25 ab	37.67±7.88b	0.55±0.09 ab
60	15.00±2.45 b	26.33±0.85c	0.50±0.09 ab
90	13.25±1.43 bc	25.50±1.47c	0.46±0.11 abc
120	11.33±0.24 cd	21.33±1.84cd	0.39±0.09 abc
150	9.50±1.22 d	15.75±0.20de	0.37±0.04 bc
180	4.50±1.22 e	12.50±3.67e	0.29±0.12 c

注:同一列中不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。

Note: The different small letter within a column indicates the significant difference at 0.05 level ($P<0.05$).

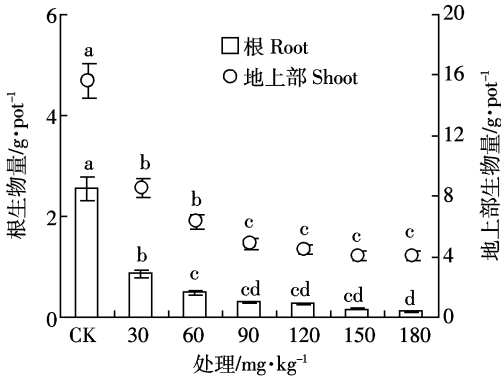
度为 180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿主根长比对照植株主根长减少了 76.1%,且显著短于其他 Cd 浓度处理的植株根长($P<0.05$)。

由图 1 可以看出,在植株移栽后 40 d 内,不同 Cd 处理的野苘蒿株高的差异逐渐增大。试验进行 60 d 以后,对照处理的株高显著高于 Cd 处理的 ($P<0.05$)。试验结束时,随着处理 Cd 浓度增加,野苘蒿株高呈显著降低趋势(表 1)。当处理 Cd 浓度为 180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿的株高在试验结束时比对照低 79.7%,且极显著低于其他 Cd 浓度处理的株高($P<0.01$)。

叶绿素含量是衡量植株衰老的一个常用指标。由表 1 可以看出,随着处理 Cd 浓度的增加,野苘蒿叶绿素含量呈降低趋势。当处理 Cd 浓度为 150~180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿叶绿素含量比对照下降了 35.1%~49.1%,且达显著水平($P<0.05$)。

随着处理 Cd 浓度的增加,野苘蒿的根和地上部生物量均呈减少趋势(图 2)。当处理 Cd 浓度高于 30

mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿根和地上部生物量均显著低于对照处理($P<0.05$);当处理 Cd 浓度在 120~180 mg·kg⁻¹ 之间时,野苘蒿的根和地上部生物量比对照处理分别减少了 89.77%~94.32%和 81.97%~89.51%。试验表明,野苘蒿地上部分的耐性指数随着处理 Cd 浓度的增加而逐渐减小。当处理 Cd 浓度在 30~180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿地上部分的耐性指数为对照植株的 54.81%~13.02%。



同一植物部位生物量不同字母表示各处理间在 5%水平差异显著
Different letters in the biomass of the same plant part indicates significant difference at 0.05 level ($P<0.05$)

图 2 不同 Cd 浓度处理下野苘蒿的根系和地上部生物量
Figure 2 Biomass of *C. crepidioides* roots and shoots under different Cd treatments

研究表明,野苘蒿的根部生物量和地上部的耐性指数(TI)随着处理 Cd 浓度的增加呈对数减少趋势。这也表明了野苘蒿对 Cd 有很强的耐性。拟合的方程如下:

$$Y_{r_bio}=2.012-0.385\ln X \quad (R^2=0.992, P<0.01)$$

$$Y_{\pi}=79.817-13.547\ln X \quad (R^2=0.977, P<0.01)$$

式中: X 代表处理 Cd 浓度; Y_{r_bio} 代表根系生物量; Y_{π} 代表植株地上部耐性系数。

2.2 Cd 处理对野苘蒿镉累积的影响

由图 3 可以看出,随着处理 Cd 浓度的增加,野苘蒿根和地上部 Cd 浓度也呈增加趋势。处理 Cd 浓度高于 30 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿地上部的镉浓度显著高于对照($P<0.05$);处理 Cd 浓度高于 60 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿根部的镉浓度也显著高于对照($P<0.05$);处理 Cd 浓度为 180 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿根和地上部分的 Cd 浓度达最高,分别为 816.42、1304.78 mg·kg⁻¹,且显著高于其他 Cd 浓度处理的植株。研究表明,不同 Cd 浓度处理的野苘蒿地上部 Cd 浓度极显著高于根部($P<0.01$)。

研究还发现(见表 2),处理 Cd 浓度与野苘蒿根

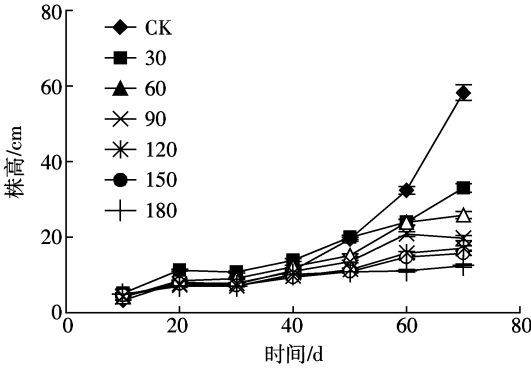
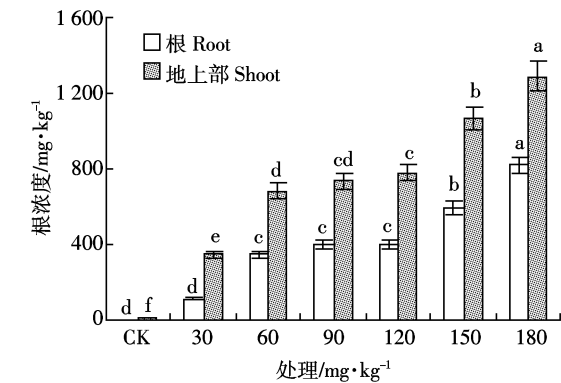


图 1 不同 Cd 浓度处理下野苘蒿的株高动态变化
Figure 1 Dynamic changes of *C. crepidioides* plant heights under different Cd treatments



同一植物部位生物量不同字母表示各处理间 5%水平
差异显著。下同
Different letters in the biomass of the same plant part indicates
significant difference at $P<0.05$. The same below

图 3 不同 Cd 浓度处理下野苣荬各器官的 Cd 浓度
Figure 3 Concentration of Cd in *C. crepidioides* for
various Cd treatments

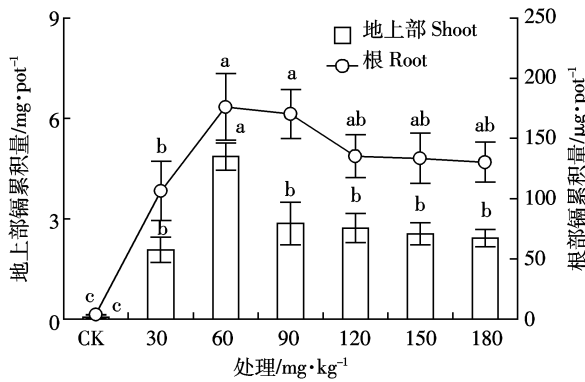


图 4 不同 Cd 浓度处理下野苣荬各器官的 Cd 累积量
Figure 4 Accumulation of Cd in *C. crepidioides* for
various Cd treatments

和地上部 Cd 浓度的相关性分别达极显著水平 ($P<0.01$)。

由图 4 可以看出,不同 Cd 浓度处理的野苣荬地上部 Cd 的累积量极显著高于根部($P<0.01$),且占整个植株 Cd 累积总量的 86.83%~96.09%。当处理 Cd 浓度高于 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,野苣荬根和地上部 Cd 的累积量均显著高于对照($P<0.05$),且野苣荬根和地上部 Cd 累积量在处理 Cd 浓度为 60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时均达到最高,分别为 174.12 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 和 4.28 $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$;处理 Cd 浓度在 90~180 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,野苣荬根和地上部 Cd 累积量有所降低,但未达显著水平。研究还发现(见表 2),处理 Cd 浓度与野苣荬根和地上部 Cd 累积量的相关性分别达极显著水平($P<0.01$)。

表 2 处理 Cd 浓度与植物各器官 Cd 浓度之间的关系
Table 2 Relationship between Cd concentrations($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DM, X)
on different treatments and Cd concentration($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DM, Y)
or accumulation(μg , Y) in plant tissues

植物器官	方程式	R^2	F 值	显著性
Cd 浓度				
根	$Y=4.612X^{1.067}$	0.975	740.98	<0.01
地上部	$Y=6.565X^{1.118}$	0.956	412.41	<0.01
Cd 累积量				
根	$Y=8.087X^{0.658}$	0.840	99.75	<0.01
地上部	$Y=76.344X^{0.799}$	0.830	93.03	<0.01

2.3 不同 Cd 浓度处理下野苣荬的富集系数和转移系数的变化

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^[15],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。其值越大,表明植物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。植物富集系数大于 1,意味着植株中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^[27]。由表 3 可以看出,在对照土壤中种植野苣荬根和地上部富集系数分别为 3.09 和 3.48,在 Cd 处理浓度在 30~180 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间时,野苣荬根和地上部富集系数均大于 1,且显著高于对照处理。随着 Cd 处理浓度的增加,野苣荬根和地上部富集系数呈缓慢降低趋势。

转移系数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转移到地上部的能力。转移系数越大,植物向地上部转移重金属的能力就越强^[28]。由表 3 可以看出,不同 Cd 处理的野苣荬的转移系数在 2.31~1.60 之间,均显著高于对照植株。当 Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,野苣荬的转移系数为 2.31,显著高于其他 Cd 处理。

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。植物能富集或超富集重金属来修复被重金属污染的土壤是基于其对重金属的抗性^[29-30]。超富集植物对重金属有很强的耐性,表现在植物能够在较高的重金属浓度土壤上正常生长,不出现明显的受害症状^[31]。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

表 3 不同 Cd 浓度处理下野苘蒿的富集系数和转移系数

Table 3 BCFs and TFs of <i>C. crepidioides</i> under different Cd treatments			
处理/mg·kg ⁻¹	根富集系数	地上部富集系数	转移系数
0(CK)	3.09±0.38c	3.48±0.53e	1.12±0.03d
30	9.48±1.75a	21.71±2.98a	2.31±0.12a
60	9.39±1.62a	18.22±2.29b	1.96±0.08b
90	6.59±1.14b	11.15±0.78c	1.73±0.21bc
120	5.06±0.40bc	8.37±0.10cd	1.67±0.15bc
150	4.95±0.71bc	8.32±0.54cd	1.70±0.17bc
180	4.98±0.33bc	7.90±0.57d	1.60±0.20c

注:同一列中不同小写字母表示在 5%水平差异显著。

Note: The different small letter within a column indicates the significant difference at $P<0.05$.

度的 Cd 对某些植物的生长有一定的促进作用^[32],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。生物量的下降程度可以用来表示植物耐性的大小^[33]。Sud-hakar 等提出以生物量减少 20%作为确定植物耐性临界值上限的指标。

本研究发现,野苘蒿能在 Cd 浓度低于 90 mg·kg⁻¹ 的土壤上正常生长,而在处理 Cd 浓度高于 120 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿表现出叶片卷曲、叶片有坏死斑点、叶柄部坏死等特点。这是由于 Cd 在植物体内达到一定程度时抑制细胞分裂产生毒害的症状^[34-35],但是野苘蒿在处理 Cd 浓度为 90 mg·kg⁻¹ 时根和地上部生物量与处理浓度为 120、150、180 mg·kg⁻¹ 时并没有达到显著性差异(图 2)。这说明在 Cd 浓度较高的土壤中仍可以种植野苘蒿来修复污染土壤。

本研究结果表明,野苘蒿的根部生物量和地上部的耐性指数(TI)随着处理 Cd 浓度的增加呈对数减少趋势。这也表明野苘蒿对 Cd 有很强的耐性。

叶绿素是植物光合作用的物质基础,其含量的高低决定了光合作用的水平。有研究表明,对于 Cd 耐性较差的植物,镉可以结合叶绿体中蛋白质上-SH 或取代其中的 Fe²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺等,从而破坏叶绿体结构和功能^[36],导致光合效率下降,影响植物的正常生长,最终表现为植物生物量降低。在本试验中,随着处理 Cd 浓度的增加,野苘蒿的叶绿素含量、主根长、株高、根和地上部分的生物量均呈下降趋势。所以,叶绿素含量可以反映植物对重金属的耐性^[37-38]。

植物对重金属具有很强的耐性并不一定就是超富集植物。植物对重金属的耐性机理可以分为两种情况:一种是对重金属具有排异性和指示性的植物;另

一种就是对重金属具有超富集能力的植物。根据超积累植物定义,Cd 超积累植物地上部的重金属含量达到 100 mg·kg⁻¹^[39],且富集系数要大于 1。超富集植物与其他植物的本质区别在于其体内,尤其是地上部能够积累大量的重金属。同时,重金属富集系数和转移系数均大于 1(表 3)。本试验中,野苘蒿根的 Cd 累积量仅占整个植株累积 Cd 的 3.91%~13.17%(图 4),也就是说,野苘蒿地上部 Cd 的累积量是根系累积量的 6.59~24.58 倍,表明野苘蒿地上部是 Cd 积累的主要器官。这符合超富集植物的基本特征^[40]。

前人研究发现,超富集植物之所以能够大量吸收和积累 Cd,是因为液泡的区室化作用和一些有机物(如 MTs、GSH、PCs 和有机酸等)对 Cd 的螯合作用。孙瑞莲等^[41]研究表明,苗期的龙葵叶中酒石酸含量与 Cd 含量呈极显著相关关系,成熟期乙酸和柠檬酸与叶片中 Cd 含量呈极显著相关。这些物质一方面降低了 Cd 对植物的毒害,另一方面促进了 Cd 在植物体内的吸收和积累。刘威等^[42]在矿区发现宝山堇菜地上部 Cd 的平均含量为 1 168 mg·kg⁻¹,转移系数和富集系数分别为 1.32 和 2.38。三叶鬼针草^[30]地上部和东南景天叶^[43]中 Cd 含量最高分别可达 119.1 mg·kg⁻¹ 和 9 000 mg·kg⁻¹,富集系数和转移系数均大于 1.0。本研究表明,当处理 Cd 浓度在 30~180 mg·kg⁻¹ 之间时,野苘蒿地上部 Cd 浓度在 246.67~1 288.12 mg·kg⁻¹,超过了 Cd-超富集植物的临界浓度 100 mg·kg⁻¹^[14,44]。这也符合超富集植物的基本特征。

因此,在本研究中,从野苘蒿对 Cd 的吸收、转移和积累特点来看,完全符合 Cd-超富集植物临界含量特征、富集系数和转移系数特征,是一种修复 Cd 污染土壤理想的植物。

4 结论

(1)Cd 浓度对野苘蒿主根长、株高、生物量等生长响应指标和叶绿素含量生理指标的影响均表现为差异显著($P<0.05$),随着 Cd 处理浓度的增加,主根长、株高、生物量和叶绿素含量显著降低。

(2)研究表明,野苘蒿能在 Cd 处理为 0~180 mg·kg⁻¹ 的土壤上正常生长,当处理 Cd 含量超过 120 mg·kg⁻¹ 时,野苘蒿表现出叶片卷曲、叶片有坏死斑点、叶柄部坏死等特点,表明野苘蒿对 Cd 有高的耐受性。

(3)野苘蒿地上部和根中 Cd 含量随 Cd 浓度增加而增加,且其地上部 Cd 含量超过临界指标(100 mg·kg⁻¹),在 6 种浓度的 Cd 胁迫下,野苘蒿对 Cd 的生物

富集系数均大于1,说明野苘蒿是Cd超富集植物。

参考文献:

- [1] Vassilev A, Tsonev T, Yordanov I. Physiological response of barley plants(*Hordeum vulgare*) to cadmium contamination in soil during ontogenesis[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 103:287-293.
- [2] Gupta U C, Gupta S C. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health[J]. *In plications for management Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29: 1491-1522.
- [3] Sanita di Toppil L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105-130.
- [4] Baker A J M, Proctor J. The influence of cadmium, copper, lead, and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in the British Isles[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 1999, 173:91-108.
- [5] Cunningham S D, Berti W R, Huang J W. Phytoremediation of contaminated soils[J]. *Trends in Biotechnology*, 1995, 13:393-397.
- [6] Wu S C, Cheung K C, Luo Y M, Wong M H. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140:124-135.
- [7] 钟康惠,寇林林,陈思,等.四川省有色金属矿产资源可持续利用对策研究[J].四川有色金属,2006(4):6-14.
- ZHONG Kang-hui, KOU Lin-lin, CHEN Si, et al. Study on sustainable utilization countermeasures of nonferrous metals mineral resources, Sichuan, China[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2006(4):6-14.
- [8] 毛竹,张世榕,李婷,等.铅锌矿区土壤重金属空间变异及其污染风险评价:以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J].农业环境科学学报,2007,26(2):617-621.
- MAO Zhu, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Spatial variability and environmental pollution assessment of soil heavy metal in the vicinity of a lead/zinc mine: A case study from Fuquan lead/zinc mine in Hanyuan county[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):617-621.
- [9] Belimov A A, Hontzeas N, Safronova V I, et al. Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 241-250.
- [10] 周启星,宋玉芳.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社,2004.
- ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. The principles and methods of remediation in contaminated soils[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] 孙铁珩,李培军,周启星.土壤污染形成机理与修复技术[M].北京:科学出版社,2005.
- SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing. Formation mechanism of soil pollution and remediation[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [12] 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,2006.
- ZHOU Qi-xing, WEI Shu-he, ZHANG Qian-ru. Ecological remediation[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [13] Barcelo J, Poschenrieder C. Phytoremediation: principles and perspectives[J]. *Contributions to Science*, 2003, 2(3):333-344.
- [14] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1:81-126.
- [15] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Nature Biotechnology*, 1995, 13:468-474.
- [16] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49(5):643-668.
- [17] Li Y M, Chaney R, Brewer E, et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: Economic and technical considerations[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 107-115.
- [18] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2003, 50:775-780.
- [19] Zhu Y Q, Li Y, Chen J J. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China [J]. *Environmental International*, 2004, 30:567-576.
- [20] 李永强,王亚男,何杨艳,等.干旱胁迫对外来杂草野苘蒿抗氧化系统的影响[J].四川师范大学学报(自然科学版),2008,31(5):607-609.
- LI Yong-qiang, WANG Ya-nan, HE Yang-yan, et al. Effect of drought stress on antioxidant system of invasive plant *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Nature SCI.)*, 2008, 31(5):607-609.
- [21] Yamato M, Yoshida S, Iwase K. Cadmium accumulation in *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore (Compositae) in heavy-metal polluted soils and Cd-added conditions in hydroponic and pot cultures[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54, 738-743.
- [22] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:1103-1110.
- [23] Hegedüs A, Erdei S, Horváth G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Science*, 2001, 160:1085-1093.
- [24] Zayed A, Gowthaman S, Terry N. Phytoaccumulation of trace elements by wetlands I. Duckweed [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 715-721.
- [25] Massimo Z, Fabrizio P, Giuseppe SM, et al. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 197:23-34.
- [26] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytologist*, 1978, 80:623-633.
- [27] Fayiga A O, Mal Q, Cao X D, 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.
- [28] 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.
- [29] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188:

- 153–159.
- [30] Lefèvre I, Corréal E, Lutts S. Cadmium tolerance and accumulation in the noxious weed *Zygophyllum fabago*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2005, 83:1655–1662.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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. Effects 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.
- [34] Pereira G J 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.
- [35] Dong J, Wu F B, Zhang G P. Effects of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2005, 6:974–980.
- [36] 孙赛初, 王焕校, 李启任. 水生维管植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探[J]. 植物生理学报, 1985, 11(2):113–121.
SUN Sai-chu, WANG Huan-xiao, LI Qi-ren. Preliminary studies on physiological changes and injury mechanism in aquatic vascular plants treated with cadmium[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1985, 11(2):113–121.
- [37] 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 *Bilosa* L. seedlings[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(10):3028–3035.
- [38] 孙瑞莲. 镉超积累植物的生态特征及污染耐性机理分析[D]. 沈阳: 沈阳应用生态研究所, 2006.
SUN Rui-lian. Ecological characteristics of cadmium-hyperaccumulators and their mechanism analysis of pollution endurance[D]. Shenyang: Institute of applied ecology of Chinese academy of Science, 2006.
- [39] Willam S, John B. Phytoremediation in wetland ecosystems; Progress, problems, and potential[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, 21(6):607–635.
- [40] Zhao F J, Hamon R E, Lombi E, et al. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53:535–543.
- [41] 孙瑞莲, 周启星, 王 新. 镉超积累植物龙葵叶片中镉的积累与有机酸含量的关系[J]. 环境科学, 2006, 27(4):765–769.
SUN Rui-lian, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Relationships between cadmium accumulation and organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a cadmium-hyperaccumulator[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4):765–769.
- [42] 刘 威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)—一种新的镉超富集植物[J]. 科学通报, 2003, 48(19):2046–2049.
LIU Wei, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. *Viola baoshanensis*: A new Cd hyperaccumulator[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19):2046–2049.
- [43] Yang X E, Long X X, Ye H B, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species(*Sedum alfredii* Hance)[J]. *Plant and Soil*, 2004, 159:181–189.
- [44] Baker A J M. Accumulators and excluder—strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3:643–654.