

菖蒲幼苗对 Cd 胁迫的响应及其 Cd 富集能力分析

徐礼生^{1,2}, 周守标^{1,①}, 吴龙华², 谢传俊¹, 柳后起¹

(1. 安徽师范大学生命科学学院 安徽省重要生物资源保护与利用重点实验室, 安徽 芜湖 241000;

2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 江苏 南京 210008)

摘要: 研究了菖蒲(*Acorus calamus* L.) 幼苗对不同浓度 Cd 胁迫的响应及其 Cd 富集能力。结果表明, 随 Cd 浓度的提高(0~25 mg·L⁻¹), 菖蒲幼苗的株高、根长、干质量、叶绿素含量和对 Cd 的耐性指数均逐渐下降, 脯氨酸含量逐渐升高; 各处理组的 SOD 和 POD 活性均高于对照, 且以 15 mg·L⁻¹ Cd 处理组最高。随胁迫时间延长(1~10 d), 叶绿素含量持续下降, 而 SOD 和 POD 活性及脯氨酸含量则先升高后下降。菖蒲幼苗体内 Cd 含量随 Cd 浓度的提高而增加, 根系对 Cd 的富集能力高于地上部分。在 Cd 胁迫条件下, 菖蒲幼苗对 Cd 的转移系数小于 1, 根系对 Cd 的滞留率为 89.5%~93.9%, 表明菖蒲幼苗根系对 Cd 有较强的滞留作用和富集能力。

关键词: 菖蒲; 镉胁迫; 生长和生理响应; 富集能力

中图分类号: X503.233; Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0978(2008)02-0061-05

Analyses on responses of *Acorus calamus* seedling to Cd stress and Cd accumulation ability XU Li-sheng^{1,2}, ZHOU Shou-biao^{1,①}, WU Long-hua², XIE Chuan-jun¹, LIU Hou-qi¹ (1. Key Laboratory of Biological Resources Conservation and Utilization of Anhui Province, College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2008, 17(2): 61-65

Abstract: The responses of *Acorus calamus* L. seedling to Cd stress with different concentrations and the Cd accumulation ability were studied by the water culture method. The results showed that with the increasing of Cd concentration (0-25 mg·L⁻¹), gradually, plant height, root length, dry weight, chlorophyll content and the tolerance index to Cd of *A. calamus* seedling decreased, the proline content increased, and the activities of SOD and POD were all higher than that of the control and the highest was 15 mg·L⁻¹ Cd treatment group. With the Cd stress time prolonged (1-10 d), the chlorophyll content decreased and the proline content and the activities of SOD and POD increased firstly and then decreased. The Cd content in *A. calamus* seedling increased with the rising of Cd concentration, and the Cd accumulation ability of root was higher than that of the above-ground part. Under Cd stress condition, the biological transfer coefficient of *A. calamus* seedling to Cd was less than one and the Cd retention rate in root reached 89.5% - 93.9%, which indicated that the root of *A. calamus* seedling has stronger retention action and accumulation ability to Cd.

Key words: *Acorus calamus* L.; Cd stress; growth and physiological response; accumulation ability

随着工业和城市的发展, 含有各种污染物的工业废水、生活污水和矿业污水大量排入水体, 造成水体污染, 其中重金属污染对环境的影响尤为突出。Cd 是有害的重金属元素, 可造成严重的水体污染。由于骨痛病的致病因素是 Cd 污染, 因此 Cd 污染问题日益引起人们的关注^[1]。已有研究表明, 一些水生植物对水体中的重金属具有一定的吸收和富集作用^[2-3], 寻找对重金属 Cd 有较强富集能力的水生植

物用于 Cd 污染水体的修复具有重要的现实意义。

收稿日期: 2007-11-14

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点资助项目(2006kj060a); 安徽省重要生物资源保护与利用重点实验室及安徽省高校生物环境和生态安全重点实验室专项资金资助项目(2004sys003)

作者简介: 徐礼生(1980—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事污染生态学方面的研究工作。

① 通讯作者 E-mail: zhoushoubiao@vip.163.com

菖蒲(*Acorus calamus* L.)为多年生挺水植物,分布于中国南北各省区。目前,有关菖蒲对污染水体修复的研究主要集中于对水体中氮和磷等的去除方面^[4],而有关Cd对菖蒲幼苗生长和生理指标影响及菖蒲对Cd富集能力的研究则鲜见报道。利用植物体过滤能快速去除水体中的重金属Cd^[5],因此,作者研究了菖蒲幼苗在不同浓度Cd胁迫条件下的生长状况和生理指标的变化,并分析了菖蒲幼苗对重金属Cd的富集量,旨在探讨菖蒲对Cd毒害的耐受性和富集能力,为Cd污染水体的植物修复提供一定的实验依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试菖蒲(*Acorus calamus* L.)幼苗采自安徽省芜湖市郊区的池塘中。将菖蒲移栽至Hoagland营养液中进行预培养,分别用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KOH或 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl溶液将营养液的pH值调节至pH 5.5,每3天更换1次Hoagland营养液。在室温(平均 $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、自然光照条件下培养15 d后,选取植株大小基本一致的幼苗进行实验。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 采用水培法进行实验,处理液为Hoagland营养液的2倍稀释液,共设置3个Cd胁迫处理组(以纯Cd计算),Cd浓度分别为5、15和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶液中的Cd以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (AR)形式加入,对照为不含Cd的Hoagland营养液的2倍稀释液。在2 L的PVC桶中分别加入1 L上述处理液,每桶移栽4株菖蒲幼苗,用聚苯乙烯泡沫塑料板作为漂浮栽培的定植板固定,每处理3次重复。处理液用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KOH或 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl溶液调节至pH 5.5,每3天更换1次处理液。分别在处理后第1、4、7和10天取样(植株地上部分)测定各项生理指标,并在处理后第10天测定菖蒲幼苗的各项生长指标和Cd含量。

1.2.2 测定方法

1.2.2.1 生长指标的测定 将菖蒲幼苗小心取出后,先用自来水漂洗,然后用去离子水洗涤3次,滤纸吸干表面水分后测量株高和根长;先于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,再置于 $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,精密称取菖蒲幼苗的干质量。根据处理组和对照组的根长计算菖

蒲幼苗对Cd的耐性指数。

1.2.2.2 生理指标的测定 参照文献[6]中的方法测定菖蒲幼苗鲜样的各项生理指标:SOD活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定;POD活性采用愈创木酚法测定;脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法测定;叶绿素含量采用分光光度法测定。

1.2.2.3 Cd含量的测定 将烘干的菖蒲幼苗粉碎后过100目筛,用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 法消化,并用Varian Spectra AA220型原子吸收分光光度计进行Cd含量的测定。该测试方法的精确度在95%的置信度范围内接近8%,Cd元素的标准物质回收率达96%~98%。根据Cd元素含量计算根系对Cd的滞留率和Cd的转移系数。

1.3 数据计算和分析方法

菖蒲幼苗对Cd胁迫的耐性指数(Tolerance index)计算公式为:耐性指数=(处理组植株根长/对照组植株根长) $\times 100\%$ ^[7]。菖蒲幼苗根系对Cd的滞留率(Retention rate)=[(根系Cd含量-地上部分Cd含量)/根系Cd含量] $\times 100\%$ ^[8]。Cd的转移系数(Biological transfer coefficient)=地上部分Cd含量/根系Cd含量^[9]。实验数据采用SPSS 11.0软件进行方差分析(ANOVA)和LSD检验。

2 结果和分析

2.1 Cd胁迫对菖蒲幼苗生长的影响

从Cd处理后第6天起,15和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理组的菖蒲幼苗出现了明显的毒害症状,其中 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理组部分菖蒲幼苗叶片由绿色转为黄绿色, $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理组的部分菖蒲幼苗叶片出现不同程度失绿现象,但在整个实验过程中各处理组均未出现菖蒲幼苗枯死的现象。

由表1可以看出,随着Cd浓度的增加,菖蒲幼苗的株高明显下降,其中15和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理组菖蒲幼苗的株高差异显著($P < 0.05$)。菖蒲幼苗的根长和干质量也随Cd处理浓度的提高而下降。由表1还可以看出,随Cd浓度的提高,Cd对菖蒲幼苗的毒害作用逐渐增强,菖蒲幼苗对Cd的耐性指数逐渐降低。

2.2 Cd胁迫对菖蒲幼苗某些生理指标的影响

2.2.1 对叶绿素含量的影响 不同浓度Cd胁迫对菖蒲幼苗叶绿素含量的影响见表2。由表2可

表1 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗生长的影响¹⁾Table 1 Effect of Cd stress with different concentrations on growth of *Acorus calamus* L. seedling¹⁾

Cd 浓度/ mg · L ⁻¹ Cd conc.	株高/cm Height	根长/cm Root length	干质量/g Dry weight	耐性 指数/% Tolerance index
0(CK)	65.8 ± 2.4a	6.95 ± 0.46a	20.1 ± 3.1a	-
5	53.5 ± 5.1a	3.45 ± 0.24b	15.5 ± 2.6a	77.1
15	51.1 ± 4.2a	3.07 ± 0.42b	13.5 ± 1.4a	67.2
25	36.6 ± 4.6b	2.40 ± 0.35b	10.0 ± 2.3b	49.8

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

表2 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗叶绿素含量的影响¹⁾Table 2 Effect of Cd stress with different concentrations on chlorophyll content of *Acorus calamus* L. seedling¹⁾

Cd 浓度/ mg · L ⁻¹ Cd conc.	不同胁迫时间的叶绿素含量/ mg · g ⁻¹ Chlorophyll content at different stress times			
	1 d	4 d	7 d	10 d
0(CK)	25.3 ± 3.3a	23.1 ± 4.0a	21.1 ± 4.2a	20.9 ± 2.4a
5	25.8 ± 4.1a	23.2 ± 1.0a	20.6 ± 1.3a	12.8 ± 4.2b
15	22.5 ± 4.5a	21.5 ± 1.1a	20.1 ± 1.2a	12.3 ± 4.0b
25	23.0 ± 3.3a	19.1 ± 1.8b	15.6 ± 1.5b	11.2 ± 5.7b

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

知,与对照相比,随着 Cd 浓度的提高,菖蒲幼苗地上部分叶绿素含量基本上呈现逐渐下降的趋势,在胁迫至第 4、7 和 10 天时,25 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗的叶绿素含量与对照差异显著 ($P < 0.05$)。随着 Cd 胁迫时间的延长,菖蒲幼苗的叶绿素含量呈现出逐渐下降的趋势,胁迫至第 10 天,5、15 和 25 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗的叶绿素含量分别为对照的 61.2%、58.9% 和 53.6%。

2.2.2 对脯氨酸含量的影响 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分脯氨酸含量的影响见表 3。由表 3 可见,随实验时间的延长,对照组菖蒲幼苗地上

部分的脯氨酸含量呈缓慢增加的趋势,而不同浓度 Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的脯氨酸含量则呈先上升后下降的趋势。胁迫至第 4 天,各处理组菖蒲幼苗地上部分的脯氨酸含量明显增加,并显著高于对照组 ($P < 0.05$);胁迫至第 7 天,各处理组的脯氨酸含量均达到峰值,与对照组差异显著 ($P < 0.05$);胁迫处理至第 10 天,各处理组菖蒲幼苗地上部分的脯氨酸含量均下降并且与对照组差异不显著 ($P > 0.05$)。此外,随 Cd 浓度的提高,菖蒲幼苗地上部分的脯氨酸含量基本呈增加趋势,特别是在处理第 7 天,15 和 25 mg · L⁻¹ Cd 处理组的脯氨酸含量显著高于 5 mg · L⁻¹ Cd 处理组。

表3 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分脯氨酸含量的影响¹⁾
Table 3 Effect of Cd stress with different concentrations on proline content in above-ground part of *Acorus calamus* L. seedling¹⁾

Cd 浓度/ mg · L ⁻¹ Cd conc.	不同胁迫时间的脯氨酸含量/ μg · g ⁻¹ Proline content at different stress times			
	1 d	4 d	7 d	10 d
0(CK)	1.18 ± 0.23a	1.64 ± 0.46b	2.43 ± 0.39c	2.42 ± 0.32a
5	1.07 ± 0.14a	2.69 ± 0.54ab	4.76 ± 0.32b	2.66 ± 1.18a
15	1.10 ± 0.45a	3.25 ± 0.15a	5.45 ± 0.45a	2.09 ± 0.56a
25	1.26 ± 0.59a	3.65 ± 0.17a	5.55 ± 0.68a	2.63 ± 0.56a

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

2.2.3 对 POD 活性的影响 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分 POD 活性的影响见表 4。由表 4 可知,随实验时间的延长,对照组菖蒲幼苗地上部分的 POD 活性呈缓慢增加的趋势,而不同浓度 Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的 POD 活性则呈先上升后下降的趋势。

在胁迫初期(第 1 天),Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分的 POD 活性无明显影响,各处理组的 POD 活性与对照组无显著差异 ($P > 0.05$);Cd 胁迫至第

表4 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分 POD 活性的影响¹⁾Table 4 Effect of Cd stress with different concentrations on POD activity in above-ground part of *Acorus calamus* L. seedling¹⁾

Cd 浓度/ mg · L ⁻¹ Cd conc.	不同胁迫时间的 POD 活性/ U · mg ⁻¹ · min ⁻¹ POD activity at different stress times			
	1 d	4 d	7 d	10 d
0(CK)	0.185 ± 0.021a	0.164 ± 0.034c	0.202 ± 0.007c	0.220 ± 0.02a
5	0.155 ± 0.017a	0.249 ± 0.021b	0.271 ± 0.016b	0.213 ± 0.051a
15	0.171 ± 0.018a	0.333 ± 0.010a	0.387 ± 0.012a	0.223 ± 0.015a
25	0.163 ± 0.007a	0.212 ± 0.014b	0.253 ± 0.007b	0.221 ± 0.017a

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

4 天,POD 活性明显提高,各处理组的 POD 活性均显著高于对照组($P < 0.05$);Cd 胁迫至第 7 天,各处理组 POD 活性均达到峰值且与对照组差异显著($P < 0.05$);Cd 胁迫至第 10 天,各处理组的 POD 活性降低并与对照差异不显著($P > 0.05$)。由实验结果还可以看出,15 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗的 POD 活性最高,尤其是在胁迫第 4 天和第 7 天,15 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的 POD 活性显著高于 5 和 25 mg · L⁻¹ Cd 处理组($P < 0.05$)。

2.2.4 对 SOD 活性的影响 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分 SOD 活性的影响见表 5。由表 5 可知,随实验时间的延长,对照组菖蒲幼苗地上部分的 SOD 活性呈缓慢增加的趋势,而不同浓度 Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的 SOD 活性则呈先急剧上升后缓慢下降的趋势。在胁迫初期,Cd 对菖蒲幼苗地上部分的 SOD 活性无明显影响,各处理组的 SOD 活性与对照组无显著差异($P > 0.05$);Cd 胁迫至第 4 天,SOD 活性明显提高并达到峰值,各处理组的 SOD 活性均显著高于对照组($P < 0.05$);Cd 胁迫至第 7 天,各处理组的 SOD 活性也显著高于对照组($P < 0.05$);Cd 胁迫至第 10 天,各处理组的 SOD 活性降低并与对照组差异不显著($P > 0.05$)。由实验结果还可看出,15 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的 SOD 活性最高,尤其是在胁迫第 4 天和第 7 天,15 mg · L⁻¹ Cd 处理组菖蒲幼苗的 SOD 活性显著高于 5 和 25 mg · L⁻¹ Cd 处理组($P < 0.05$)。

表 5 不同浓度 Cd 胁迫对菖蒲幼苗地上部分 SOD 活性的影响¹⁾
Table 5 Effect of Cd stress with different concentrations on SOD activity in above-ground part of *Acorus calamus* L. seedling¹⁾

Cd 浓度/mg · L ⁻¹ Cd conc.	不同胁迫时间的 SOD 活性/U · mg ⁻¹ SOD activity at different stress times			
	1 d	4 d	7 d	10 d
0 (CK)	1.28 ± 0.35a	2.20 ± 0.37a	2.42 ± 0.06a	2.44 ± 0.22a
5	1.27 ± 0.19a	4.66 ± 0.09b	3.37 ± 0.02b	2.33 ± 0.14a
15	1.27 ± 0.12a	5.15 ± 0.12c	4.19 ± 0.14c	2.40 ± 0.10a
25	1.29 ± 0.22a	4.72 ± 0.22b	3.62 ± 0.32b	2.43 ± 0.50a

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

2.3 Cd 胁迫对菖蒲幼苗 Cd 富集能力的影响

在不同浓度 Cd 胁迫条件下,菖蒲幼苗不同部位的 Cd 含量见表 6。由表 6 可见,受 Cd 胁迫后,菖蒲幼苗体内的 Cd 含量显著高于对照组,并随着 Cd 胁迫浓度的提高而显著增加,其中 5、15 和 25 mg · L⁻¹

Cd 处理组菖蒲幼苗地上部分的平均 Cd 含量分别约为对照组的 79、128 和 286 倍,根系的平均 Cd 含量分别约为对照组的 463、802 和 1 047 倍,而且根系中的 Cd 含量均明显高于地上部分。各处理组菖蒲幼苗体内 Cd 的转移系数均小于 1;菖蒲幼苗根系对 Cd 有较强的滞留作用,其中对照组对 Cd 的滞留率为 56.8%,各处理组幼苗对 Cd 的滞留率为 89.5% ~ 93.9%。差异显著性分析结果表明,各处理组菖蒲幼苗体内的 Cd 含量有显著差异($P < 0.05$)。

表 6 受不同浓度 Cd 胁迫后菖蒲幼苗体内的 Cd 含量分析¹⁾
Table 6 Analysis of Cd content in *Acorus calamus* L. seedling treated by different concentrations of Cd stress¹⁾

Cd 浓度/mg · L ⁻¹ Cd conc.	不同部位 Cd 含量/μg · g ⁻¹ Cd content in different parts		转移系数 Biological transfer coefficient	滞留率/% Retention rate
	地上部分 Above-ground part	根系 Root		
0 (CK)	0.07 ± 0.02a	0.18 ± 0.03a	0.38	56.8
5	5.53 ± 0.37b	84.65 ± 2.21b	0.07	93.5
15	8.96 ± 0.62c	146.72 ± 5.51c	0.06	93.9
25	20.08 ± 2.24d	191.51 ± 4.42d	0.10	89.5

¹⁾ 同列中不同的字母表示 LSD 检验差异显著($P < 0.05$) The different letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) with LSD test.

3 讨论和结论

在 0 ~ 25 mg · L⁻¹ Cd 胁迫条件下菖蒲均能生长,但随着 Cd 浓度的提高,菖蒲的生长受到一定的抑制,说明较高浓度的 Cd 胁迫可使细胞直径发生变化、细胞液泡化、细胞结构发生变化,从而使各细胞器受到不可逆转的致死性分离,造成细胞功能丧失或细胞死亡^[10]。Cd 胁迫条件下,菖蒲幼苗耐性指数降低,这与 Ali 等^[11]的实验结果较相似。

菖蒲幼苗叶绿素含量随 Cd 浓度的增加和胁迫时间的延长而逐渐降低,叶绿素含量的降低必然影响植物的光合作用,这也是菖蒲干质量降低的原因之一。脯氨酸含量是反映植物受逆境胁迫的重要指标之一^[12],菖蒲幼苗的脯氨酸含量在 Cd 胁迫 1 ~ 7 d 内随胁迫时间延长而升高,并随 Cd 浓度的提高而增加,而在胁迫第 10 天脯氨酸含量则降低,表明 Cd 胁迫条件下脯氨酸只能在菖蒲幼苗体内短时间积累。脯氨酸的这种积累现象可认为是菖蒲幼苗对 Cd 胁迫的适应性反应。

不良环境能在植物代谢过程中诱发自由基产

生,从而对植物细胞膜造成伤害,但植物体自身的保护酶系统(如 SOD 和 POD)能清除自由基^[13],其中 SOD 可将 O_2^- 和 H_2O_2 转化成 H_2O 和 O_2 ,抑止高活性·OH 等的形成;POD 可催化 H_2O_2 形成 H_2O ,从而有效阻止 O_2^- 和 H_2O_2 的积累,限制这些自由基对植物细胞膜脂过氧化的启动^[14-16]。本实验结果显示,Cd 胁迫条件下菖蒲幼苗的 SOD 和 POD 活性均随胁迫时间延长呈先升后降的趋势,且在低浓度 Cd 胁迫条件下活性较高、高浓度 Cd 胁迫条件下活性较低,这是菖蒲幼苗对 Cd 胁迫的应激反应,符合植物对胁迫反应的典型特征。当 Cd 胁迫浓度超过菖蒲幼苗的耐受极限时,植物体就会受到严重损伤,其保护酶系统受到相应损害,从而导致 SOD 和 POD 活性降低。这与相关研究^[17-18]的研究结果相符。

Stoltz 等^[19]认为,在湿地植物体内重金属趋向于在根部积累,将有害离子积累于根部是植物阻止其对光合作用及新陈代谢过程产生毒害作用的策略之一^[20],本研究结果支持此观点,即菖蒲幼苗根系对 Cd 的积累能力最强。在研究过程中还发现,菖蒲幼苗根系对 Cd 有较强的滞留效应,平均滞留率大于 50%,表明菖蒲幼苗根系对 Cd 毒害有一定的自我保护作用。在 $5 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫条件下,菖蒲幼苗地上部分的 Cd 含量由 $5.53 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加至 $20.08 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,根系的 Cd 含量由 $84.65 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加至 $191.51 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,菖蒲幼苗根系的 Cd 含量均高于地上部分,且转移系数均小于 1,表明菖蒲幼苗对重金属 Cd 有一定的富集能力并且是 Cd 的耐性植物。菖蒲是多年生挺水植物,生物量大、根系发达,可作为 Cd 污染水体修复的耐性植物,具有较可观的开发与应用前景。

参考文献:

- [1] 徐勤松,施国新,杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统和亚显微结构的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 30-34.
- [2] 阳承胜,蓝崇钰,束文圣. 重金属在宽叶香蒲人工湿地系统中的分布与积累[J]. 水处理技术, 2002, 28(2): 101-104.
- [3] Baldantoni D, Alfrani A, Tommasi P D, et al. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants[J]. Environmental Pollution, 2004, 130: 149-156.
- [4] 王春景,杨海军,刘国经,等. 菖蒲对富营养化水体净化效率的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 40-44.
- [5] 奉若涛,渠荣遴,李德森,等. 水体重金属污染的植物修复研究Ⅲ——种苗过滤去除水中重金属镉[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 28-30.
- [6] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [7] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. New Phytologist, 1978, 80: 623-633.
- [8] 夏汉平,束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1121-1129.
- [9] 罗亚平,李明顺,张学洪,等. 广西荔浦锰矿区优势植物重金属累积特征[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2005, 23(4): 89-93.
- [10] 彭鸣,王煥校,吴玉树. 镉、铅诱导的玉米(*Zea mays* L.)幼苗细胞超微结构的变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6): 426-431.
- [11] Ali A N, Bernal M P, Ater M. Tolerance and bioaccumulation of cadmium by *Phragmites australis* grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc [J]. Aquatic Botany, 2004, 80: 163-176.
- [12] 江行玉,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [13] Fridovich I. The superoxide radical is an agent of oxygen toxicity; superoxide dismutases provide an important defence[J]. Science, 1978, 201: 875-880.
- [14] Pauls K P, Thompson J E. Evidence for the accumulation of peroxidized lipids in membranes of senescing cotyledons [J]. Plant Physiology, 1984, 75: 1152-1157.
- [15] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology, 1993, 101: 7-12.
- [16] 严重玲,洪业汤,付舜珍,等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-492.
- [17] 吴晓丽,罗玉明,徐迎春,等. 镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 74-76.
- [18] 仇硕,黄苏珍,王鸿燕. Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗 4 种抗氧化酶活性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(1): 28-32.
- [19] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 47: 271-280.
- [20] Zurayk R, Sukkariyah B, Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel, chromium and cadmium pollution [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, 127: 373-388.