

菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力

周守标¹, 王春景¹, 杨海军², 毕 德¹, 李金花¹, 王 影¹

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000 2. 东北师范大学草地研究所, 长春 130024)

摘要 通过盆栽实验研究了 Cu-Zn-Pb-Cd 复合污染条件下, 菰和菖蒲的生长状况、生理特性及吸收和富集重金属的能力。结果表明, 高浓度污染下菰和菖蒲不能存活, 低、中浓度中菖蒲的生长受到抑制, 菰各生长指标与对照相比差异不显著, 表明菰对低、中浓度重金属的耐性强于菖蒲。随着污染浓度的增加, 菰和菖蒲叶片叶绿素含量显著降低, 菰叶绿素 a/b 值略有降低, 菖蒲叶绿素 a/b 值显著降低, 菰和菖蒲叶片脯氨酸含量、相对电导率显著升高, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性在低浓度时升高, 中浓度时降低。菰体内重金属含量为 $Zn > Cu > Pb > Cd$, 菖蒲体内的含量为 $Cu > Zn > Pb > Cd$, 且二者体内的重金属含量都随着污染浓度的增加而升高。菰和菖蒲对 Cd 的富集系数较大, 地上部分 (茎与叶) 和地下部分 (根与根状茎) 均大于 1; 对 Pb 的富集系数较小, 地上部分和地下部分均小于 1。菰和菖蒲地下部分重金属含量均高于地上部分含量, 二者根系对 4 种重金属都有较强的滞留效应, 平均滞留率均大于 50%。各处理中菰对重金属的吸收量均高于菖蒲。综合分析菰和菖蒲的生长、生理及富集重金属的能力, 菰比菖蒲更适用于低、中浓度重金属污染水体的生态修复。

关键词 菰, 菖蒲, 生理指标, 植物修复, 重金属

文章编号: 1000-0933 (2007) 01-0281-07 中图分类号: Q142, Q948, X171 文献标识码: A

Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*

Zhou Shoubiao¹, Wang Chunjing¹, Yang Haijun², Bi De¹, Li Jinhua¹, Wang Ying¹

¹ College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

² Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (1): 0281 ~ 0287.

Abstract: Water contamination by trace metals is one of the main types of pollution in aquatic ecosystems. Aquatic plants can take up heavy metals from the environment. Their capability to absorb the elements differs both among species and their organs. Therefore, it is useful to identify various species and their organs which accumulate the greatest amounts of trace metals.

The stress responses and metal bioaccumulation in combined treatments of copper, zinc, lead and cadmium by the emergent wetland plants *Zizania latifolia* and *Acorus calamus* were studied in pot experiments. Growth parameters, physiological indices and metal uptake by the two species were investigated. Results indicated that neither *Z. latifolia* nor *A. calamus* could survive in the highest concentrations employed. Compared to controls, plant height, number of roots and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30370280); 深圳市水务局西沥水库生态河道试验基金资助项目 (143-130411); 安徽省重要生物资源保护与利用重点实验室专项基金资助项目

收稿日期: 2005-11-18; 修订日期: 2006-07-21

作者简介: 周守标 (1963 ~) 男, 安徽和县人, 博士, 教授, 主要从事植物生理生态学研究. E-mail: zhoushoubiao@vip.163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Science Foundation of China (No. 30370280); Ecological river constructing project of water source engineering management department in Shenzhen (Xili reservoir) (No. 143-130411); Project of Key Lab. of Biological Resources Conservation and Utilization of Anhui Province

Received date 2005-11-18; **Accepted date** 2006-07-21

Biography Zhou Shoubiao, Ph. D., Professor, mainly engaged in plant ecophysiology. E-mail: zhoushoubiao@vip.163.com

biomass of *A. calamus* significantly decreased in low and medium metal concentration treatments. No significant differences in plant height , number of roots and biomass of *Z. latifolia* could be demonstrated between the control and low and medium metal treatments. These growth differences between the two species might reflect that the innate metal resistance of *Z. latifolia* is higher than that of *A. calamus*. With increasing heavy metal concentrations , the chlorophyll content of both species decreased significantly ,and the chlorophyll a/b rate decreased slightly in *Z. latifolia* and decreased significantly in *A. calamus*. SOD and POD activity increased in the low metal treatments and decreased in the mid-concentration treatment. Proline content and relative electrolyte leakage rate of the two species increased significantly. Copper , Zn , Pb and Cd concentrations in both species increased with increase of metals in soils , the rank order was Zn > Cu > Pb > Cd in *Z. latifolia* and Cu > Zn > Pb > Cd in *A. calamus*. The bio-concentration factor (BCF) for Cd in shoots (leaves and stems) and roots (rhizomes and roots) of the two species were both > 1 , whereas the BCFs of Pb in shoots and roots were < 1. In both cases , concentrations of Cu ,Zn ,Pb and Cd in roots were higher than in shoots suggesting that these two species are basically excluder plants ,translocating little metal from roots-shoot. There was a substantial retention function for roots of the two species to heavy metals ,and their average retention rates were all greater than 50% . Overall uptake of Cu ,Zn , Pb ,and Cd by *Z. latifolia* was greater than by *A. calamus* in all treatments. *Zizania latifolia* could be suitable for phytopurification and phytoremediation of wastewater with low-medium concentrations of Cu ,Zn ,Pb and Cd.

Key Words : *Zizania latifolia* ; *Acorus calamus* ; physiological indices ; phytoremediation ; heavy metal

随着重金属污染植物修复技术的兴起 ,对超富集植物和耐重金属植物的研究日益引起重视^[1,2]。研究表明 ,一些水生植物对水体中的重金属有吸收富集作用^[3~5]。为此 ,寻找富集重金属能力强水生植物应用于工矿废水处理和重金属污染水体的修复具有重要意义。

菰 (*Zizania latifolia* Turcz.)和菹蒲 (*Acorus calamus* L.)分别是禾本科和天南星科的多年生挺水植物 ,广泛分布于我国南北各省。有关它们对污染水体修复的研究主要集中于对水体中氮、磷等去除方面^[6,7] ,对重金属富集和耐受能力的研究未见报道。本文研究了菰和菹蒲在不同浓度 Cu-Zn-Pb-Cd 复合重金属污染条件下的生长状况、对重金属的富集能力及其生理指标的变化 ,旨在筛选水体重金属污染修复植物 ,探索重金属对植物毒害和植物对重金属耐性机理 ,以期为水体重金属污染植物修复技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物采自芜湖市郊区的池塘中 ,移栽前剪断其根状茎 ,去枯黄老叶 ,分成个体大小基本相同的单株苗体备用。供试土壤采自植物生长的池塘岸边 ,风干备用。

1.2 试验方法

采用盆栽实验 ,在通风透光的塑料网棚内进行。在塑料花盆内套聚乙烯塑料袋 ,装入风干的供试土壤 ,每盆 3.5kg ,其基本化学性状和重金属背景值见表 1。将分析纯的 Cu (NO₃)₂·3H₂O ,ZnCl₂ ,Pb (NO₃)₂ ,CdCl₂ · 2.5H₂O 按设计浓度混合投放到花盆中的土壤内混匀。实验设低、中、高 3 种浓度处理 ,以不投放重金属为对照 (表 2) ,每处理 3 个重复。2005 年 4 月 10 日 ,选择生长健壮、长势和个体大小一致的植株分别移栽至盆中 ,每盆 3 株 ,种后灌水 ,实验过程中保持水位距土面高约 5cm。持续生长 90d 后 ,测定植物生理指标 ,然后将植物体、泥土连同塑料袋一起取出花盆 ,小心用自来水洗掉根部泥土 ,测量植物生长指标 ,将植物地上部分 (茎、叶)和地下部分 (根、根状茎)分开 ,分别用蒸馏水和去离子水各洗 2 次 ,105℃ 杀青 30min ,85℃ 烘至恒重 ,称重 ,磨碎 ,测定 Cu、Zn、Pb、Cd 含量。

1.3 测定方法

土壤 pH 和有机质按常规分析方法测定^[8] ,土壤 Cu、Zn、Pb、Cd 含量用 HNO₃-HClO₄-HF 消化 ,原子吸收分光光度计测定。烘干磨碎的植物样品过 100 目筛 ,HNO₃- HClO₄消化 ,原子吸收分光光度计测定。

植物生理指标测定方法^[9] 叶绿素 a、b 含量 ,分光光度法 ;脯氨酸含量 ,酸性茚三酮比色法 ;SOD 活性 ,比色法 ;POD 活性 ,愈创木酚法 ;质膜透性 (相对电导率) ,电导率仪法^[10]。

1.4 数据分析统计

耐性指数^[11] TI (Tolerance index ,%) = 重金属处理中植物的生物量/对照中的生物量 $\times 100$
富集系数 BCF (Bioconcentration factor) = 地上或地下部分重金属含量/土壤中重金属含量
根系对重金属的滞留率^[12] (Retention rate ,%) = (地下部分重金属含量-地上部分重金属含量)/地下部分重金属含量 $\times 100$
试验数据用 SPSS 软件进行方差分析 (ANOVA)和 LSD 检验。

表 1 土壤化学性状和重金属背景值

Table 1 Chemical characteristics and heavy metal concentrations of the soil					
pH	有机质	重金属浓度 Heavy metal concentration (mg kg ⁻¹)			
	Organic matter (g kg ⁻¹)	Cu	Zn	Pb	Cd
6.42	40.28	18.62	59.45	19.86	0.13

2 结果

2.1 菰和菖蒲在不同处理中的生长状况

试验进行到第 5 天时种植于高浓度中的菰和菖蒲植株开始枯萎并分别于第 9 天和第 7 天死亡 ,低、中浓度中均能生长。在低、中浓度中 ,菰的株高、根数、生物量略低于对照 ,但差异不显著 ,菖蒲的生长受到了不同程度的抑制 ,株高、生物量均显著低于对照。中浓度菖蒲的地下与地上生物量比 (R:S)显著高于对照 ,低浓度与对照和中浓度间差异均不显著 ,菰的 R:S 处理与对照间差异不显著。低、中浓度重金属污染对菖蒲有一定的毒害作用 ,且随着污染物浓度的增加 ,毒害作用逐渐增强 ,耐性指数降低 ,菰没有受到明显的毒害 ,耐性指数较高 (表 3)。

表 2 污染物浓度设计

Table 2 The designed concentrations of heavy metals (mg kg ⁻¹)				
处理 Treatment	Cu	Zn	Pb	Cd
对照 CK	18.62	59.45	19.86	0.13
低浓度 Low concentration	78.62	169.45	139.86	0.83
中浓度 Medium concentration	198.62	389.45	379.86	2.23
高浓度 High concentration	558.62	1049.45	1099.86	6.43

上述浓度已将土壤背景值计算在内 The heavy metal contents in the soil were considered in the designed concentrations.

表 3 菰和菖蒲在不同处理中的生长状况

Table 3 Growth of <i>Z. latifolia</i> and <i>A. calamus</i> in different treatments						
物种 Species	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	根数 Number of roots	生物量 Biomass (g m ⁻² DW)	地下与地上生物量比 R:S	耐性指数 TI (%)
菰 <i>Z. latifolia</i>	对照 CK	101.9 \pm 4.4 ^a	29.7 \pm 3.5 ^a	208.8 \pm 13.8 ^a	0.34 \pm 0.06 ^a	—
	低浓度 Low	98.1 \pm 7.1 ^a	26.7 \pm 3.5 ^a	178.7 \pm 36.5 ^a	0.34 \pm 0.08 ^a	85
	中浓度 Medium	91.7 \pm 12.8 ^a	27.7 \pm 5.1 ^a	199.8 \pm 39.0 ^a	0.32 \pm 0.12 ^a	96
菖蒲 <i>A. calamus</i>	对照 CK	70.6 \pm 2.8 ^a	20.0 \pm 6.6 ^a	137.3 \pm 20.6 ^a	0.28 \pm 0.06 ^b	—
	低浓度 Low	60.7 \pm 4.2 ^b	15.7 \pm 1.5 ^{ab}	81.5 \pm 16.3 ^b	0.48 \pm 0.22 ^{ab}	59
	中浓度 Medium	35.6 \pm 5.9 ^c	10.3 \pm 1.5 ^b	50.6 \pm 6.7 ^b	0.61 \pm 0.11 ^a	37

表中数值为 3 个重复的平均值 \pm 标准差 The data represent mean \pm SD ($n=3$) ;对于同种植物 ,同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性 (LSD 检验 , $p=0.05$) Values with different letter in same species and same column indicate a significant difference at $p=0.05$ according to LSD test

2.2 不同处理对菰和菖蒲生理指标的影响

由图 1 可看出 ,随着污染物浓度的增加 ,菰和菖蒲叶片叶绿素含量和叶绿素 a/b 值均逐渐降低 ;低、中浓度中菰叶绿素含量均显著低于对照 ,叶绿素 a/b 值与对照差异不显著 ;中浓度中菖蒲叶绿素含量显著低于对照和低浓度 ,叶绿素 a/b 值显著低于对照。

菰和菖蒲叶片 SOD 活性和 POD 活性均表现为低浓度处理时升高 ,中浓度处理时下降。菰 SOD 活性中浓度处理显著低于低浓度和对照 ,菖蒲 SOD 活性在对照和低、中浓度间均差异显著 ,菰和菖蒲 POD 活性各处理

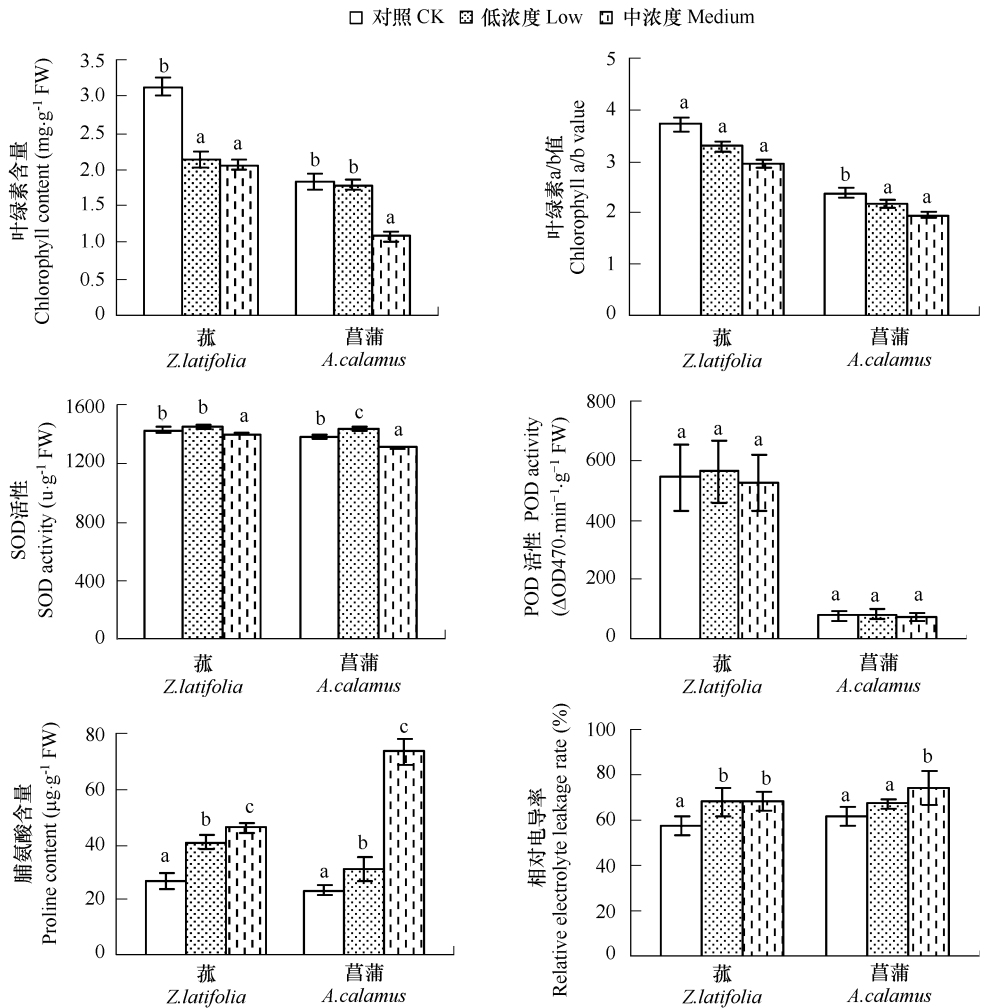


图1 不同处理菰和菖蒲叶片生理指标的变化

Fig. 1 Changes of physiological indices in *Z. latifolia* and *A. calamus* leaves from different treatments

图中数值为3个重复的平均值±标准差 The data represent mean ± SD (n = 3) ; 对于同种植物 标有不同字母的表示差异具有显著性 (LSD 检验 p = 0.05) Values with different letter in same species indicate a significant difference at p = 0.05 according to LSD test

间差异不显著。

菰和菖蒲叶片脯氨酸含量均随着污染物浓度的增加而升高 ,对照和低、中浓度间差异显著。

菰叶片相对电导率为低、中浓度显著高于对照 ,菖蒲叶片相对电导率为中浓度处理显著高于低浓度和对照 ,低浓度和对照间差异不显著。

2.3 菰和菖蒲体内重金属含量

菰和菖蒲体内 Cu、Zn、Pb、Cd 含量都随着污染物浓度的增加而升高 ,地下部分含量均高于地上部分含量 (表 4) 。4 种元素在菰体内的含量为 Zn > Cu > Pb > Cd ,在菖蒲体内的含量为 Cu > Zn > Pb > Cd 。菰和菖蒲对 Cd 的富集系数地上和地下部分均大于 1 ,对 Pb 的富集系数均小于 1 。4 种元素在菰和菖蒲体内的含量与分布各处理间差异极显著 (p < 0.01) ,物种间除地上部分 Pb 含量外其他均差异显著 (p < 0.05) 。

菰和菖蒲根系对 Cu、Zn、Pb、Cd 均有较强的滞留效应 ,平均滞留率均大于 50% 。4 种元素在菰根系中的平均滞留率为 Cd > Cu > Pb > Zn ,在菖蒲根系中的平均滞留率为 Cd > Pb > Cu > Zn 。两物种间 4 种元素的平均滞留率差异不显著 (p > 0.05) 。

2.4 菰和菖蒲对重金属的吸收量

重金属在植物体内的浓度与其生物量的乘积即为该植物对重金属的吸收量。随着污染物浓度的增加 ,菰

和菖蒲对 4 种重金属的吸收量也增加,但低浓度处理时,菖蒲对 Cu 和 Cd 的吸收量较高。各处理中菰对重金属的吸收量均高于菖蒲(表 5)。

表 4 不同处理菰和菖蒲体内的 Cu、Zn、Pb、Cd 浓度
Table 4 Concentrations of Cu , Zn , Pb , Cd in *Z. latifolia* and *A. calamus* in different treatments

物种 Species	元素 Element	处理 Treatment	浓度 Concentration (mg kg ⁻¹)		富集系数 BCF		滞留率 Retention rate (%)
			地上 Shoot	地下 Root	地上 Shoot	地下 Root	
菰 <i>Z. latifolia</i>	Cu	对照 CK	35.32 ± 1.48 ^b	59.26 ± 3.77 ^a	1.9	3.2	40.4
		低浓度 Low	27.45 ± 2.17 ^a	256.47 ± 11.85 ^b	0.3	3.3	89.3
		中浓度 Medium	54.12 ± 2.96 ^c	309.80 ± 8.96 ^c	0.3	1.6	82.5
	Zn	对照 CK	21.18 ± 1.80 ^a	80.06 ± 4.44 ^a	0.4	1.3	73.5
		低浓度 Low	97.87 ± 8.94 ^b	262.75 ± 13.37 ^b	0.6	1.6	62.8
		中浓度 Medium	163.14 ± 11.75 ^c	278.43 ± 14.63 ^b	0.4	0.7	41.4
	Pb	对照 CK	0.09 ± 0.04 ^a	0.11 ± 0.02 ^a	<0.1	<0.1	18.2
		低浓度 Low	0.42 ± 0.06 ^a	43.40 ± 4.27 ^b	<0.1	0.3	99.0
		中浓度 Medium	15.02 ± 3.46 ^b	155.25 ± 12.81 ^c	<0.1	0.4	90.3
	Cd	对照 CK	0.45 ± 0.07 ^a	2.64 ± 0.32 ^a	3.5	20.3	83.0
		低浓度 Low	4.05 ± 0.91 ^b	20.76 ± 2.66 ^b	4.9	25.0	80.5
		中浓度 Medium	16.60 ± 2.88 ^c	71.19 ± 5.23 ^c	7.4	31.9	76.7
菖蒲 <i>A. calamus</i>	Cu	对照 CK	13.35 ± 1.85 ^a	31.59 ± 5.56 ^a	0.7	1.7	57.7
		低浓度 Low	16.56 ± 3.08 ^a	356.18 ± 17.1 ^b	0.2	4.5	95.4
		中浓度 Medium	47.51 ± 3.73 ^b	372.66 ± 8.04 ^b	0.2	1.9	87.3
	Zn	对照 CK	14.58 ± 2.97 ^a	35.28 ± 3.66 ^a	0.2	0.6	58.7
		低浓度 Low	40.13 ± 3.91 ^b	223.42 ± 19.7 ^b	0.2	1.3	82.0
		中浓度 Medium	121.80 ± 10.11 ^c	290.19 ± 15.23 ^c	0.3	0.7	58.0
	Pb	对照 CK	0.13 ± 0.05 ^a	3.74 ± 1.17 ^a	<0.1	0.2	96.5
		低浓度 Low	1.24 ± 0.36 ^a	46.81 ± 4.20 ^b	<0.1	0.3	97.4
		中浓度 Medium	14.79 ± 3.33 ^b	170.82 ± 8.38 ^c	<0.1	0.4	91.3
	Cd	对照 CK	1.84 ± 0.31 ^a	6.88 ± 1.10 ^a	14.2	52.9	73.3
		低浓度 Low	2.10 ± 0.73 ^a	69.41 ± 6.79 ^c	2.5	83.6	97.0
		中浓度 Medium	4.13 ± 0.52 ^b	58.65 ± 4.53 ^b	1.9	26.3	93.0

表中数值为 3 个重复的平均值 ± 标准差 The data represent mean ± SD (n = 3) ,对于同种植物的同种元素 ,同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性 (LSD 检验 $p=0.05$) Values with different letter in same element of the same species and same column indicate a significant difference at $p=0.05$ according to LSD test

表 5 不同处理菰和菖蒲对重金属的吸收量
Table 5 Uptake amounts of heavy metals by *Z. latifolia* and *A. calamus* in different treatments (mg m⁻²)

物种 Species	处理 Treatment	Cu	Zn	Pb	Cd
菰 <i>Z. latifolia</i>	对照 CK	8.25	7.32	0.02	0.20
	低浓度 Low concentration	15.73	25.16	2.09	1.50
	中浓度 Medium concentration	22.96	37.58	9.87	5.91
菖蒲 <i>A. calamus</i>	对照 CK	2.39	2.55	0.14	0.41
	低浓度 Low concentration	9.84	7.64	1.24	1.84
	中浓度 Medium concentration	8.50	9.24	3.67	1.23

3 讨论

菰和菖蒲在高浓度 Cu-Zn-Pb-Cd 复合重金属污染条件下不能存活,表明此时重金属对它们的毒害已超过其耐受能力,具体机理有待进一步研究。菖蒲对低、中浓度污染有一定的耐性,但随着污染浓度的增加耐性逐渐降低,表现为生长受到抑制,耐性指数降低,与 Ali 等实验结果是一致的^[13]。低、中浓度污染对菰的生长没有明显的抑制作用,耐性指数均较高。地下与地上生物量比(R:S)是衡量植物受环境胁迫的一个较为有效的指标^[14],菰的 R:S 没有明显变化,表明菰对低、中浓度污染胁迫具有较强的耐性,菖蒲的 R:S 随着污染物浓度的增加而增加,与束文圣等研究结果是一致的^[15]。以上生长指标表明菰对低、中浓度污染的耐性强于

菖蒲。

植物对重金属胁迫的反应不仅表现在形态特征上,还表现于生理特征上。菰和菖蒲叶片叶绿素含量和叶绿素 a/b 值均逐渐降低,Alberte^[16]认为,逆境胁迫下叶绿素含量下降的主要原因是叶绿体片层中捕光 Chlalb-Pro 复合体合成受到抑制。植物体内的重金属离子可能与叶绿素合成的几种酶(原叶绿素脂还原酶、 δ -氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的肽链富含 SH 的部分结合,抑制了酶活性从而阻碍了叶绿素的合成^[17]。叶绿素含量降低必然影响植物的光合作用,这也是菰和菖蒲生物量降低的原因之一。SOD、POD 是植物体内抗氧化系统中的主要保护酶,它们协同作用减少活性氧自由基对细胞膜系统的伤害^[18],菰和菖蒲的 SOD、POD 活性低浓度时有所升高,这是它们的保护性反应,能清除重金属胁迫产生的活性氧,在中浓度胁迫下,这两种酶活性又有所降低,可能是植株受害加重,超过了防御反应的阈值,酶的结构或合成受到影响。脯氨酸含量是反应植物受逆境胁迫的重要指标^[19],本实验中菰和菖蒲脯氨酸含量均随着污染物浓度的增加而升高,脯氨酸的积累对菰和菖蒲耐受重金属污染的机理有待进一步研究。植物叶片外渗液电导率的变化,在一定程度上反映了植物叶片受害后的生理变化,与植物的伤害程度和抗性强弱有密切关系^[20],本实验结果显示菰和菖蒲细胞膜系统均受到了一定程度的伤害。

植物体内重金属的积累量有随土壤中重金属浓度升高而升高的特点^[21],菰和菖蒲对重金属的积累也表现了此特点。Stoltz 等^[22]研究认为重金属在湿地植物体内的分布趋向于根部积累,本实验支持此观点,菰和菖蒲根系对重金属均有较强的滞留效应,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活性毒害的一种策略^[23],菰和菖蒲也可通过此策略增强对低、中浓度 Cu-Zn-Pb-Cd 毒害的耐性。各处理中菰对重金属的吸收量均高于菖蒲,且菰的耐性强于菖蒲,故菰作为低、中浓度重金属污染水体的修复植物优于菖蒲。

有研究认为湿地植物对重金属的耐性是其自身固有的特性,与其是否生活于重金属污染环境无关^[24,25],生活于重金属污染区和非重金属污染区的菰和菖蒲不同居群间对重金属的耐性是否有差异有待进一步研究,以便为重金属污染水体修复生态工程植物种类的选择提供更科学的依据。

References :

[1] Meagher R B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. Curr. Opin. Plant Biol. ,2000 ,3 :153 — 162.

[2] Ye Z H ,Baker A J M ,Wong M H ,et al. Zinc ,lead and cadmium accumulation and tolerance in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface. Aquat. Bot. ,1998 ,61 :55 — 67.

[3] Yang C S ,Lan C Y ,Shu W S. Accumulation and distribution of heavy metals in artificial wetland with *Typha latifolia*. Tech. Water Treat. ,2002 ,28 (2) :101 — 104.

[4] Baldantoni D ,Alfrani A ,Tommasi P D. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants. Environ. Pollut. ,2004 ,130 :149 — 156.

[5] Panich-pat T ,Pokethitiyook P ,Kruatrachue M ,et al. Removal of lead from contaminated soils by *Thypha angustifolia*. Water Air Soil Pollut. ,2004 ,155 :159 — 171.

[6] Zhang J Y ,Xia S L ,Qiu K M ,et al. Nitrogen removal by a subsurface flow constructed wetlands wastewater treatment system and Nitrogen transformation bacteria. Acta Sci. Circumst ,1999 ,19 (3) :323 — 327.

[7] Zhang R S ,Zhou Q ,Zhang J ,et al. Phosphorus removal of agriculture wastewater through subsurface constructed wetland. Environ. Sci. ,2003 ,24 (4) :105 — 108.

[8] Nanjing Agricultural University. Analysis on Soil and Agricultural Chemistry (Second Edition). Beijing :Agricultural Press ,1992.

[9] Zhang Z L ,Qu W J. The Experimental Guide for Plant Physiology (Third Edition). Beijing :Higher Education Press ,2003.

[10] Chen J X ,Wang X F. Guide for Plant Physiology Experimentation. Guangzhou :South China Science and Engineering Press ,2002. 115 — 116.

[11] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. New Phytol. ,1978 ,80 :623 — 633.

[12] Xia H P ,Shu W S. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings. Acta Ecol. Sinica ,2001 ,21 (7) :1121 — 1129.

[13] 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. Aquat. Bot. ,2004 ,80 :163 — 176.

[14] Marschner H ,Kirkby E A ,Cakmak I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral

nutrients. J. Exp. Bot. ,1996 ,47 :1255 — 1263.

[15] Shu W S ,Lan C Y ,Zhang Z Q. Analysis of major constraints on plant colonization at Fankou Pb/Zn mine tailings. Chin. J. Appl. Ecol. ,1997 ,8 (3) 314 — 318.

[16] Alberte R S ,Thomber J P ,Fiscus E L. Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize. Plant Physiol. ,1977 ,59 :351 — 353.

[17] Somashekaraiah B V ,Padamajaes K ,Prasad R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germination seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgarize*) : Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation. Plant Physiol. ,1992 ,65 :85 — 89.

[18] Chowdhury S R ,Choudhuri M A. Hydrogen peroxide metabolism as an index of water stress tolerance in jute. Plant Physiol. ,1985 ,5 :503 — 507.

[19] Jiang X Y ,Zhao K F. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants. Chin. Appl. Environ. Biol. ,2001 ,7 (1) 92 — 99.

[20] Pang S Q. Plant Adversity Physiology Foundation. Haerbin :Northeast Forestry University Press ,1990. 103.

[21] Wei S H ,Zhou Q X ,Zhang K S ,*et al.* Roles and mechanisms of rhizosphere in the remediation of contaminated soils. Chin. J. Appl. Ecol. ,2003 ,14 (1) 143 — 147.

[22] Stoltz E ,Gregor M. Accumulation properties of As ,Cd ,Cu ,Pb and Zn by four wetland species growing in submerged mine tailings. Environ. Exp. Bot. ,2002 ,47 :271 — 280.

[23] Zurayk R ,Sukkariyah B ,Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel ,chromium and cadmium pollution. Water Air Soil Pollut. ,2001 ,127 :373 — 388.

[24] McCabe O M ,Baldwin J L ,Otte M L. Metal tolerance in wetland plants ?Minerva Biotech. ,2001 ,13 :141 — 149.

[25] Ye Z ,Baker A J M ,Wong M H ,*et al.* Comparison of biomass and metal uptake between two populations of *Phragmites australis* grown in flooded and dry conditions. Ann. Bot. ,1998 ,82 :83 — 87.

参考文献：

[3] 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. 水处理技术 ,2002 ,28 (2) :101 ~ 104.

[6] 张甲耀 ,夏盛林 ,邱克明 ,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究. 环境科学学报 ,1999 ,19 (3) :323 ~ 327.

[7] 张荣社 ,周琪 ,史云鹏 ,等. 潜流构造湿地去除农田排水水中磷的效果. 环境科学 ,2003 ,24 (4) :105 ~ 108.

[8] 南京农业大学主编. 土壤农化分析 (第 2 版). 北京 :农业出版社 ,1992.

[9] 张志良 ,瞿伟菁. 植物生理实验指导 (第 3 版). 北京 :高等教育出版社 ,2003.

[10] 陈建勋 ,王晓峰. 植物生理学实验指导. 广州 :华南理工大学出版社 ,2002. 115 ~ 116.

[12] 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. 生态学报 ,2001 ,21 (7) :1121 ~ 1129.

[15] 束文圣 ,蓝崇钰 ,张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析. 应用生态学报 ,1997 ,8 (3) :314 ~ 318.

[19] 江行玉 ,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理. 应用与环境生物学报 ,2001 ,7 (1) 92 ~ 99.

[20] 庞士铨. 植物逆境生理学基础. 哈尔滨 :东北林业大学出版社 ,1990. 103.

[21] 魏树和 ,周启星 ,张凯松 ,等. 根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析. 应用生态学报 ,2003 ,14 (1) :143 ~ 147.