

铜胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响

赵艳¹, 徐迎春², 柴翠翠², 周燕²

(1. 南京溧水县特殊教育学校, 江苏溧水 211200; 2. 南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要: 采用水培法, 研究不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响。结果表明: 狭叶香蒲叶宽、株高的增长量及整株干物质积累量在较低浓度 Cu^{2+} 处理时均未受影响, 此后随 Cu^{2+} 浓度升高显著下降。 Cu^{2+} 浓度为 $0\sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶绿素含量显著上升, 此后随 Cu^{2+} 浓度增加其含量显著下降。在 Cu^{2+} 浓度 $0\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内根系活力显著上升, 此后随 Cu^{2+} 浓度升高则大幅下降。根系和叶片 SOD、POD、CAT 活性随 Cu^{2+} 浓度增加均呈先显著升高后显著降低的趋势, 根系 SOD、POD 活性在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值, 叶片 SOD、POD 活性在 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值, 根系和叶片 CAT 活性均在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值; 同一 Cu^{2+} 浓度下, 根系 SOD、POD、CAT 活性明显高于叶片, 说明根系比叶片对 Cu^{2+} 胁迫反应更敏感。从根系和叶片 SOD/POD、SOD/CAT 的比值变化上看出, 在 Cu^{2+} 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时起主要保护作用的酶是 SOD、POD, 后来 CAT 起到主要作用。MDA 含量自 Cu^{2+} 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始持续上升。说明在 Cu^{2+} 为 $30\sim 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时狭叶香蒲表现为积极的生理响应。

关键词: 狭叶香蒲; Cu^{2+} 胁迫; 生长; 生理特性

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2010)03-0367-06

Effect of Cu^{2+} stress on the growth and physiological properties of *Typha angustifolia*

ZHAO Yan¹, XU Ying-Chun², CHAI Cui-Cui², ZHOU Yan²

(1. Lishui Special Education School, Lishui 211200, China; 2. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Effects of Cu^{2+} stress on physiological properties and growth of *Typha angustifolia* were studied by hydroponic culture method. The results showed that the leaf width, plant height and the dry weight accumulation were not obviously affected at the low Cu^{2+} concentration, but decreased with the increasing Cu^{2+} concentration. The content of chlorophyll increased among $0\sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$ and decreased obviously with the increasing of Cu^{2+} concentration. Root activity increased among $0\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$ and also decreased apparently afterwards with the increasing of Cu^{2+} concentration. The activities of SOD, POD and CAT increased with the increasing of Cu^{2+} concentration and decreased clearly afterwards. The highest value of SOD, POD of roots appeared at $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$, while the peak values of in leaves were at $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$. The activity of CAT reached to the highest at $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The activities of SOD, POD and CAT of root were higher than leaves apparently under the same Cu^{2+} concentration stress, it was suggested that sensitivity of roots to Cu^{2+} concentrations were higher than that of leaves. The activities of SOD, POD played the main role on protecting *T. angustifolia* under $1\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$ stress, while CAT played the main role afterwards. The content of MDA reached to the high point at $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cu}^{2+}$ and increased afterwards with the increasing of Cu^{2+} concentration. It was suggested that *T. angustifolia* had an active physiologi-

收稿日期: 2008-11-11 修回日期: 2009-02-24

基金项目: 山东农业大学作物生物学国家重点实验室资助项目 [Supposed by Biology of Crops of Country's Emphases Laboratory of Shandong Agricultural University]

作者简介: 赵艳(1983-), 女, 安徽亳州市人, 硕士研究生, 主要从事观赏植物生理生态学的研究, (E-mail)anna_83928@163.com.

* 通讯作者 (Author for correspondence, E-mail: xyc@njau.edu.cn 或 xu-ych@163.com)

cal response under 30–55 mg · L⁻¹ Cu²⁺ stress.

Key words: *Typha angustifolia*; copper stress; growth; physiological characters

随着人类活动和工业发展,采矿、冶炼以及对一些重金属尾矿处理不善所导致的水体重金属污染日趋严重,其中铜污染是常见的重金属污染之一(陈怀满,1996)。过量重金属在植物体内产生活性氧,能打破清除机制的动态平衡,造成过氧化伤害(Foyer 等,1994;Kabata-Pebdias 等,1992),而采用水生植物修复水体重金属污染是一种比较经济、方便和可行的方法,且会带来较高的环境生态效益,具广泛的发展前景(Qian 等,1995;Samecka-cymerman 等,1996)。近年来,Cu²⁺ 胁迫对水生植物生理反应的研究已成为热点,在浮萍(Zayed 等,1998)、紫背萍(涂俊芳等,2006)、黑藻(徐勤松等,2006)、黄菖蒲(张开明等,2006)、水花生(周长芳等,2001)等植物上已有报道。

狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)也称水烛,为香蒲属(*Thlaspi*)多年生挺水或沼生植物,株形挺拔,叶形优美,肉穗花序形状奇特,是湿地、水面造景不可缺少的观赏植物。近年来的研究(陈桂珠,1990;阳承胜等,2006;叶志鸿等,1992;王凡路等,2003;戴晶平等,2003)发现香蒲属植物在处理工矿废水方面(含 Cu、Pb、Zn、Cd)有独特的净化效果。吴晓丽等(2007,2008)在狭叶香蒲对污水中镉胁迫后生理及生态的影响方面开展了研究,但利用狭叶香蒲净化 Cu²⁺ 污染的水体还未见报道。本研究以狭叶香蒲为材料,研究不同浓度 Cu²⁺ 处理下狭叶香蒲的生长及生理反应,探讨狭叶香蒲对 Cu²⁺ 的耐性机制,为净化含 Cu²⁺ 污水提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为狭叶香蒲(*Typha angustifolia*),取自南京艺莲苑花卉有限公司。

1.2 试验方法

狭叶香蒲先放于塑料周转箱内用自来水驯化 1 周,先后用 1/4 和 1/2 剂量 Hongland 营养液各培养 10 d,再用全营养液培养 10 d,期间每 3 d 换 1 次营养液,用气泵每 1 d 通气 3 次,每天早晨(8:00),中午(12:00),晚上(18:00)进行通气,每次 1.5 h,选取生长一致的苗备用。

试验共设 6 个处理,Cu²⁺ 浓度分别设为 1,5,30,55,80,100 mg · L⁻¹,以不加 Cu²⁺ 为对照(CK),植株本身含 Cu²⁺ 量仅为 0.019 mg · L⁻¹,可忽略不计。用 CuSO₄ · 5H₂O 配制各处理液,采用单株小区,每处理 9 株。试验开始前每处理取 3 株,用直尺测量新生幼叶叶宽、株高。处理 15 d 后,再次测量各植株叶宽、株高,计算其叶宽的增加量、株高的增长量。将植株取出,用水冲洗干净,滤纸吸干,然后于 105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘干至恒重,称量整株干重。同时试验开始前选取生长一致的每处理 3 株 70 °C 烘干至恒重,称量整株干重,然后计算整株干物质累积量。各处理培养 15 d 后,取 3 株采集叶片和根的鲜样,分别测定以下指标:叶绿素含量采用丙酮浸提,分光光度法测定(郝建军等,2001);过氧化氢(CAT)活性、根系活力和 MDA 含量均参照李合生等(2000)的方法进行测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 光还原法进行测定(李合生等,2000);过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法进行测定(朱广廉等,1990)。

采用 SPSS16.0 软件对数据进行方差分析及多重比较。

2 结果和分 析

2.1 不同浓度 Cu²⁺ 胁迫对狭叶香蒲生长的影响

从表 1 看出,当 Cu²⁺ 浓度在 0~5 mg · L⁻¹ 范围时,叶宽增加量、株高增长量和整株干重的积累量均未受到显著影响;在 Cu²⁺ 浓度为 30 mg · L⁻¹ 时,叶宽的增加量开始出现显著下降,而株高增长量和整株干重积累量差异仍不显著;随 Cu²⁺ 浓度升高,叶宽增加量、株高增长量和整株干物质积累量均显著下降。

2.2 不同浓度 Cu²⁺ 胁迫对狭叶香蒲叶绿素含量的影响

Cu²⁺ 浓度为 1 mg · L⁻¹ 时,叶绿素含量稍增加,但差异不显著;但当 Cu²⁺ 浓度为 5 mg · L⁻¹ 时,狭叶香蒲的叶绿素含量开始显著上升;在 30 mg · L⁻¹ 时达到最大值,为对照的 1.20 倍;而后随着 Cu²⁺ 浓度的继续升高,叶绿素含量开始显著下降,在 100 mg · L⁻¹ 时降至最低值,仅为对照的 39.70%(图 1)。表明低浓度的 Cu²⁺ 利于叶绿素的合成,高浓度则抑制叶绿素的合成。

表 1 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲生长的影响
Table 1 Effects of different stress concentrations of Cu^{2+} on the growth of *Typha angustifolia*

Cu^{2+} 浓度 Concentrations ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	叶宽增加量 Increase of leaf width (cm)	株高增长量 Increase of plant height (cm)	整株干重积累量 Dry weight accumulation of the whole plant (g)
0	0.21aA \pm 0.0015	1.09aA \pm 0.0112	0.38aA \pm 0.0012
1	0.20aA \pm 0.0012	1.06aA \pm 0.0202	0.37aA \pm 0.0010
5	0.20aA \pm 0.0013	1.07aA \pm 0.0103	0.37aA \pm 0.0019
30	0.19bB \pm 0.0010	1.04aA \pm 0.0400	0.37aA \pm 0.0014
55	0.18cC \pm 0.0100	0.90bB \pm 0.1001	0.32bB \pm 0.0080
80	0.17cC \pm 0.0200	0.88bB \pm 0.0910	0.30cC \pm 0.0091
100	0.17cC \pm 0.0200	0.85bB \pm 0.0804	0.23dD \pm 0.0100

注:同一列数据后的大小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上的差异显著性。下同。

Note: Capital and lowercase letters indicate the significant difference at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

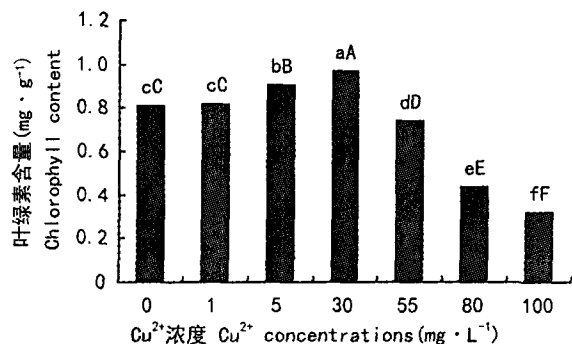


图 1 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲叶绿素含量的影响
Fig. 1 Effects of different stress concentrations of Cu^{2+} on chlorophyll content of *Typha angustifolia*

2.3 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲对根系活力的影响

根系活力与根系生命活动的强弱有直接的关系,它指示着根系生长和代谢的旺盛程度,尤其是细胞吸收和维持浓度梯度以保持营养离子的能力。图 2 显示,狭叶香蒲根系活力在 Cu^{2+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时稍有升高但影响不大,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著升高,为对照的 1.09 倍,说明 Cu^{2+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时狭叶香蒲根系有应激反应;然后随着 Cu^{2+} 浓度的升高,根系活力显著下降,在 Cu^{2+} 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时下降至最低值,可能根细胞结构被破坏,根系活力受到显著影响。

2.4 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲膜保护系统 SOD、POD、CAT 活性的影响

SOD、CAT 和 POD 共同组成植物体内一个有

效的活性氧清除系统,图 3:A,B,C 表示不同浓度的 Cu^{2+} 对狭叶香蒲体内的 SOD、CAT 和 POD 活性的影响。当 Cu^{2+} 浓度在 $0 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围时,根系 SOD 活性随着 Cu^{2+} 浓度的增加有显著上升趋势,在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 达到最大,为对照的 2.04 倍;随着 Cu^{2+} 浓度的继续增加,根系 SOD 活性呈显著下降趋势。当 Cu^{2+} 浓度在 $0 \sim 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围时,叶片 SOD 活性随着 Cu^{2+} 浓度的增加显著上升,在 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处达到最大值,为对照的 3.47 倍;之后随 Cu^{2+} 浓度的增加叶片 SOD 活性显著下降,但活性仍高于对照(图 3:A)。

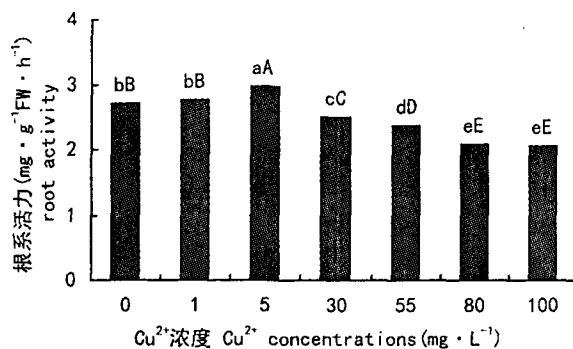


图 2 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对狭叶香蒲根系活力的影响
Fig. 2 Effects of different stress concentrations of Cu^{2+} on root activity of *Typha angustifolia*

与对照相比,从图 3:B 看出, Cu^{2+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根系中的 POD 活性稍有增加,但差异不显著; Cu^{2+} 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根系 POD 活性达到最大值,随着 Cu^{2+} 浓度的继续上升显著下降,而叶片 POD 活性在 Cu^{2+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时变化趋势和根系相似,随着 Cu^{2+} 浓度的继续增加 POD 活性显著上升,升高至 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶片 POD 活性达到最大值,然后活性显著下降,但根系和叶片 POD 活性均高于对照。说明在 Cu^{2+} 浓度为 $30 \sim 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 和 POD 反应最灵敏,对狭叶香蒲发挥了最大的保护膜系统作用,且根部对外界胁迫比叶片更敏感。

根系和叶片中 CAT 活性在 Cu^{2+} 浓度为 $0 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时随 Cu^{2+} 浓度的升高而显著升高,在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均达最大值,至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始大幅度下降,此时活性分别为对照的 92.27%,83.01%(图 3:C)。

2.5 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫对 SOD/POD、SOD/CAT 活性比值的影响

SOD 将 O_2 歧化为 H_2O_2 ,POD、CAT 则负责 H_2O_2 的清除。据文献报道(孙涌栋等,2008), Cu^{2+}

胁迫可以启动抗氧化酶系统,清除过量生成的 H₂O₂ 和 O₂,如果 SOD/CAT、SOD/POD 活性比值增加,那么 SOD 分解产生的 H₂O₂ 就不能及时被清

除,积累的 H₂O₂ 将与未被 SOD 分解的 O₂ 在 Cu²⁺ 等催化下通过 Fenton 反应形成 ·OH,加剧氧化胁迫。由表 2 看出,叶片中 SOD/POD 活性比值变化

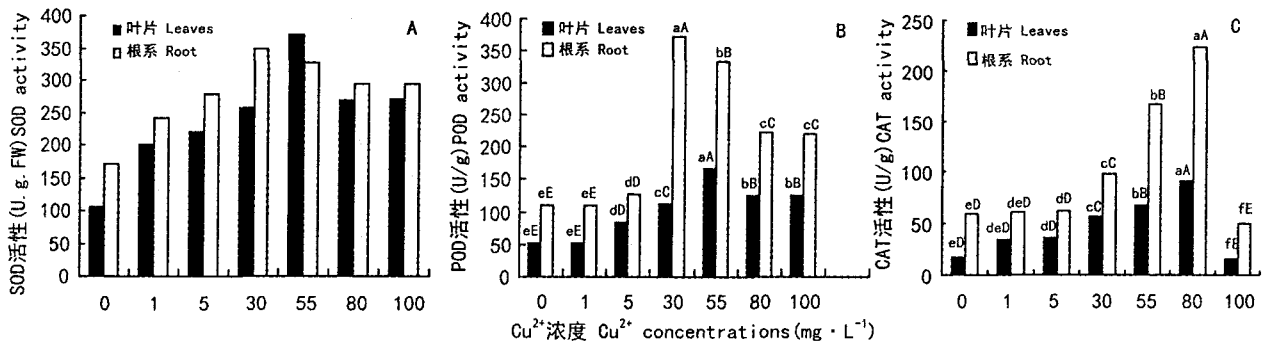


图 3 Cu²⁺ 对狭叶香蒲 SOD 活性(A),POD(B)和 CAT(C)的影响
Fig. 3 Effects of different stress concentrations of Cu²⁺ on SOD(A), POD(B)and CAT(C)activity of *Typha angustifolia*

表 2 不同 Cu²⁺ 浓度对狭叶香蒲 SOD/POD 和 SOD/CAT 活性比值的影响
Table 2 Effects of different stress concentrations of Cu²⁺ on the value of SOD/POD and SOD/CAT of *Typha angustifolia*

Cu ²⁺ 浓度 Concentrations (mg · L ⁻¹)	根系 Root		叶片 Leaf	
	SOD/POD	SOD/CAT	SOD/POD	SOD/CAT
0	1.59aA±0.1510	9.80bB±0.3210	2.09bB±0.1511	1.78eE±0.3500
1	2.05aA±0.1213	7.00bB±0.4190	3.13aA±0.2001	3.31cC±0.7630
5	2.10aA±0.2100	7.73bB±0.3901	2.56aA±0.2990	3.56bB±0.2319
30	0.94cC±0.3500	6.14cC±0.7212	2.25bB±0.1093	2.60dD±0.3201
55	0.98cC±0.3112	4.83dD±0.6510	2.22bB±0.1000	2.22dD±0.2903
80	1.33bB±0.4210	3.21eE±0.9010	2.14bB±0.0910	1.20eE±0.4531
100	1.47bB±0.4000	18.70aA±0.9501	2.40aA±0.2100	5.56aA±0.8731

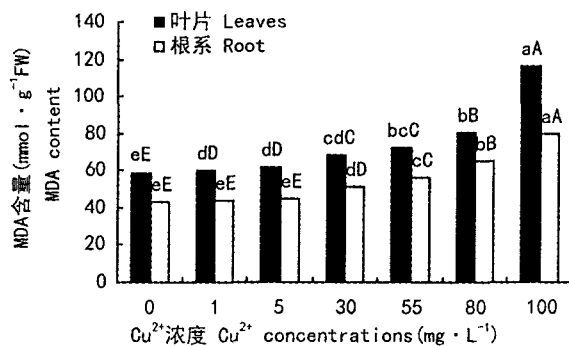


图 4 Cu²⁺ 对狭叶香蒲的 MDA 活性的影响
Fig. 4 Effects of different stress concentrations of Cu²⁺ on MDA content of *Typha angustifolia*

不大,SOD/CAT 活性比值随 Cu²⁺ 处理浓度升高先显著上升后显著下降;当 Cu²⁺ 浓度小于 5 mg · L⁻¹ 时,根系中 SOD/POD 活性比值随 Cu²⁺ 处理浓度的

增加显著增加,当 Cu²⁺ 浓度 > 30 mg · L⁻¹ 时,SOD/POD 活性比值随 Cu²⁺ 处理浓度的增加显著降低然后显著升高,SOD/CAT 活性比值随 Cu²⁺ 处理浓度的增加显著下降,当 Cu²⁺ 达到 100 mg · L⁻¹ 时,SOD/CAT 活性比值显著升高。

2.6 不同浓度 Cu²⁺ 胁迫对狭叶香蒲 MDA 含量的影响

当 Cu²⁺ 浓度为 0~5 mg · L⁻¹ 时,与对照相比,根系和叶片 MDA 含量的变化差异不显著;当 Cu²⁺ 浓度大于 5 mg · L⁻¹ 时,MDA 含量随 Cu²⁺ 浓度的提高显著升高(图 4);在 Cu²⁺ 浓度 100 mg · L⁻¹ 时,根系和叶片 MDA 含量分别是对照的 1.85 和 1.96 倍,可见 Cu²⁺ 胁迫导致膜脂过氧化,破坏了膜脂的完整性,Cu²⁺ 浓度越高膜脂过氧化程度越高,质膜破坏程度越严重,由图中可看出叶片受到的破坏程度大于根部。

3 讨论

表 1 结果显示,狭叶香蒲的生长在低浓度 Cu^{2+} 胁迫时未受到显著影响,直到 Cu^{2+} 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时才开始受到显著抑制(表 1)。张开明等(2006)研究发现低浓度 Cu^{2+} 对黄菖蒲幼苗的生长有促进作用,高浓度下对幼苗生长则有不同程度的抑制作用。本实验也得到了类似的结果,在低浓度 Cu^{2+} 胁迫时,对狭叶香蒲生长的影响不大,在中高浓度时,狭叶香蒲生长受到显著影响。

当 Cu^{2+} 浓度为 $1 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时利于叶绿素的合成,较高浓度的 Cu^{2+} 可显著降低狭叶香蒲叶片中叶绿素含量,且随浓度增加其含量逐渐减少(图 1),这与储玲(2004)、甄泉(2006)和 Branquiniho 等(1997)研究结果一致。在低浓度下,刺激叶绿素的合成,这是植物的一种保护适应现象,高浓度下降低叶绿素含量可能是在叶绿素合成时由于 Cu^{2+} 与相关酶作用,抑制叶绿素前体的合成,促进叶绿素分解或直接破坏叶绿体结构,从而降低叶绿素含量。由图 2 看出,狭叶香蒲根系活力对较低浓度 Cu^{2+} 有应激反应,在 Cu^{2+} 达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,和对照相比,表现为显著升高趋势;但高浓度 Cu^{2+} 胁迫对根系活力有抑制作用,浓度越高,表现的抑制作用越明显。

植物体内的抗氧化系统酶(SOD、CAT、POD)在清除 MDA,保护机体免受氧自由基的侵害过程中起着重要作用(Scandalios, 1993)。根和叶中 SOD、POD、CAT 活性随 Cu^{2+} 浓度增加均呈先显著升高后显著降低的趋势(图 3),根中 SOD、POD 活性在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值,叶中 SOD、POD 活性在 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值,根和叶 CAT 活性均在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现最大值;同一 Cu^{2+} 浓度下,根中 SOD、POD、CAT 活性明显高于叶中,说明狭叶香蒲根系比叶片对 Cu^{2+} 胁迫反应更敏感,这与杨兵等(2004)在鸭跖草根和叶中抗氧化酶对 Cu^{2+} 胁迫的反应研究结果一致,在不同浓度处理中,狭叶香蒲根系比叶片先做出反应。

叶中 SOD/POD 活性比值变化不大,SOD/CAT 活性随 Cu^{2+} 处理浓度先升高后降低(表 2),表明低浓度 Cu^{2+} 胁迫下,叶片中 SOD、POD 在起主要保护作用,随着 Cu^{2+} 浓度的升高,CAT 起主要保护作用。根中在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前后的变化不同,低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SOD/CAT 活性比值随 Cu^{2+} 处理浓度的增

加而降低,高于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比值随 Cu^{2+} 处理浓度的增加先降低后升高,说明在胁迫的早期($1, 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)起主要保护作用的酶是 SOD,随后启动 POD, CAT 酶系统;但随着 Cu^{2+} 浓度的增加, Cu^{2+} 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时酶系统遭到重金属离子严重的损坏,根和叶中 SOD、POD 和 CAT 防御能力下降,酶活性也受到了一定程度的抑制,狭叶香蒲对活性自由基和过氧化物的耐受能力减弱,这与 van Assche & Clijsters(1990)的结论相一致。

脂质的过氧化会导致膜结构和功能的破坏(Luna 等,1994),MDA 是脂质过氧化产物之一,通常作为过氧化程度的测定指标。有研究证明(谢明吉等,2005;Peter 等,1999),过量的铜可引起植物体内 MDA 含量上升,且中毒程度与 MDA 含量成正比。在本实验中也得到类似的结果(图 4),当 Cu^{2+} 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量显著高于对照,且随着 Cu^{2+} 浓度的提高显著上升, Cu^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片和根细胞膜脂过氧化加剧,破坏了膜脂的完整性。

综上所述,当狭叶香蒲在 Cu^{2+} 浓度为 $30 \sim 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其生长及生理特性均表现为积极的响应,说明其对 Cu^{2+} 有一定的耐性,在净化含 Cu^{2+} 污水方面有良好的应用前景。

参考文献:

- 朱广廉,钟海文,张爱琴. 1990. 植物生理学实验[M]. 北京:北京大学出版社:245-248
- 李合生,孙群,赵世杰. 2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社:164-165,167-169
- 陈怀满. 1996. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社:53-55
- Kabata-Pendias A, Pendias H. 1992. Trace Elements in Soils and Plants[M]. Boca Raton: CRC Press
- Branquiniho C, Brown DH, Catrino E. 1997. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence[J]. *Environ Exp Bot*, **38**: 165-179
- Chen GZ(陈桂珠), Ma MJ(马曼杰), Lan CY(蓝崇钰). 1990. Investigation on cattail plant purification pond ecosystem(香蒲植物净化塘生态系统调查研究)[J]. *J Ecol(生态学杂志)*, **11**(4): 11-15
- Chu L(储玲), Liu DY(刘登义), Wang YB(王友保). 2004. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pratense*(铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究)[J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **15**(1): 119-122
- Dai JP(戴晶平), Hu YH(胡岳华). 2003. Physiological characteristics of *Typha Latifolia* and its environmental effect on tail-

- ing disposa(香蒲植物生理特性及其对矿山尾矿的环保作用)[J]. *Ming and Metallurgical Engineering* (矿冶工程), **23**(6):17-24
- Foyer CH, Lelandodais M, Kunert KJ. 1994. Photooxidative stress in plant[J]. *Physiologia Plantarum*, **92**:8-12
- Luna CM, Gouzalex CA, Tripp VS. 1994. Oxidative damage caused by excess of copper in oat leaves[J]. *Plant Cell Physiol*, **35**:11-15
- Peter MA, Karl L, Ruth P. 1999. Modification of the lipid-protein interaction in human low-density lipoprotein destabilizes ApoB-100 and decreases oxidizability[J]. *Biochemistry*, **38**:3 401-3 408
- Qian JH, Zayed A, Zhu ML, et al. 1999. Hytoaccumulation of trace elements by wetland plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plants species[J]. *J Environ Qual*, **28**(5):1 448-1 456
- Samecka-cymerman RB, Kempers AJ. 1996. Bioaccumulation of heavy metals by aquatic macrophytes around Wroclaw Poland [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, **35**:242-247
- Scandalios JG. 1993. Oxygen stress and oxygen toxicity[J]. *Plant physiol*, **101**(1):7-12
- Shah K, Kumar RG, Verma S, et al. 2001. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Sci*, **161**:1 135-1 144
- Tu JF(涂俊芳), Liu DY(刘登义), Wang XM(王兴明). 2006. Effect of copper stress on growth and scavenging system of activated oxygen of *Spirodela polyrrhiza* (Cu胁迫对紫背萍的生长及活性氧清除系统的影响)[J]. *J Biol* (生物学杂志), **23**(3):30-35
- Van Assche F, Clijsters H. 1990. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Environ*, **13**:195-206
- Wang FL(王凡路), Wu RQ(吴瑞琴), Yang B(杨兵). 2003. Distribution of heavy metals in sediment of Fankou Pb/Zn wetland (凡口铅锌矿湿地系统沉积物中重金属的分布)[J]. *Ecol Environ* (生态环境), **12**(3):292-295
- Wu XL(吴晓丽), Luo YM(罗玉明), Xu YC(徐迎春). 2007. Effects of cadmium stress on some physiological indexes of *Typha angustifol*(镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标的影响)[J]. *J Plant Res Environ* (植物资源与环境学报), **16**(1):74-76
- Wu XL(吴晓丽), Luo YM(罗玉明), Xu YC(徐迎春). 2008. The kinetics characteristics of Cd^{2+} absorption of *Typha angustifol*(狭叶香蒲吸收 Cd^{2+} 的动力学特征)[J]. *Guihaia* (广西植物), **28**(4):511-514
- Xie MJ(谢明吉), Ke WS(柯文山), Wang WX(王万贤). 2005. MDA accumulation and antioxidation capacity of two *Elsholtzia splendens* populations under copper stress(铜胁迫下两种海州香薷的膜脂过氧化水平及抗氧化能力比较)[J]. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **24**(8):935-938
- Xu QS(徐勤松), Shi GX(施国新), Wang X(王学). 2006. Generation of active oxygen and change of antioxidant enzyme activity in *Hydrilla verticillatu* under Cd, Cu and Zn stress(镉、铜和锌胁迫下黑藻活性氧的产生及抗氧化酶活性的变化研究)[J]. *Acta Hydrobiologica Sin* (水生植物学报), **30**(1):26-31
- Yang B(杨兵), Liao B(廖斌), Deng DM(邓冬梅). 2004. Effects on Cu^{2+} accumulation and antioxidative enzymes of two ecotypes of *Commelina communis* (Cu^{2+} 对两种生态型鸭跖草Cu积累和抗氧化酶的影响)[J]. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), **24**(10):9-13
- Yang CC(阳承胜), Lan CY(蓝崇钰), Shu WS(束文胜). 2004. Accumulation and distribution of heavy metals in artificial wetland with *Typha latifolia* (重金属在宽叶香蒲人工湿地系统中的分布与积累)[J]. *Tech Water Treat* (水处理技术), **28**(2):101-104
- Yang CC(阳承胜), Zhang G(张干), Lan CY(蓝崇钰). 2006. The characteristics of PF unit protozoan communities in amann-made wetland system for treating waste water from a Pb/Zn mine(铅锌尾矿人工湿地中PFU原生动植物群落特性)[J]. *J ShenZhen Univ; Sci Engin* (深圳大学学报·理工版), **23**(1):55-57
- Ye ZH(叶志鸿), Chen GZ(陈桂珠), Lan CY(蓝崇钰). 1992. Effect of treating Pb/Zn mine wastewater with *Typha latifolia* purification pond system(宽叶香蒲净化塘系统净化铅锌矿废水效应研究)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **3**(2):190-194
- Zayed A, Growthaman S, Terry N. 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed[J]. *J Environ Qual*, **27**(3):715-721
- Zhou CF(周长芳), Wu GR(吴国荣), Shi GX(施国新). 2001. The role of antioxidant systems in Cu^{2+} stress resistance *Alternanthera philoxeroides* (水花生抗氧化系统在抵御 Cu^{2+} 胁迫中的作用)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), **43**(4):389-394
- Zhang KM(张开明), Huang SZ(黄苏珍), Yuan HY(原海燕). 2006. A study on Cu^{2+} stress resistance of *Iris pseudacorus* (水生花卉黄菖蒲 Cu^{2+} 胁迫抗(耐)性研究)[J]. *Agric Sci Jiangsu Province* (江苏农业科学), (6):36-40
- Zhen Q(甄泉), Yan M(严密), Yang HF(杨红飞). 2006. Effect of copper pollution on the stress and hurt of growth and development of *Artemisia lavandulaefolia* (铜污染对野艾蒿生长发育的胁迫及伤害)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **17**(8):1 505-1 510