

铜胁迫对弯囊苔草(*Carex dispalata*)生长和生理特性的影响

王晓兰,周守标,杨集辉,郑和权,张 栋

(安徽师范大学生命科学院,安徽重要生物资源保护与利用研究重点实验室,安徽 芜湖 241000)

摘要:用水培方法研究了弯囊苔草在不同 Cu^{2+} 浓度(1、5、25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫下的生长特性和部分生理生化指标的变化。结果表明 不同 Cu^{2+} 浓度胁迫下,弯囊苔草正常生长,但其生长特性表现出高浓度抑制的相关性,高浓度下没有新生根。弯囊苔草叶片 3 种抗氧化酶活性都随胁迫时间的延长呈先上升再下降趋势。SOD 在处理的第 4 d 达到峰值,且活性一直显著高于对照($P<0.05$)。3 种 Cu^{2+} 浓度处理下的峰值大小顺序为 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}>25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。POD 和 CAT 活性在处理第 7 d 达到峰值,POD 活性峰值大小顺序为 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}>25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,CAT 活性峰值大小顺序为 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。丙二醛(MDA)和可溶性糖含量都是随着胁迫时间的延长而上升,处理结束时的丙二醛(MDA)($r=0.988\ 0$)和可溶性糖含量($r=0.951\ 2$)与 Cu^{2+} 浓度表现出正相关性。脯氨酸(Pro)含量随胁迫时间的延长也呈先上升后下降趋势,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 浓度处理下脯氨酸(Pro)含量在处理第 4 d 达到最大值,25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高浓度处理下脯氨酸(Pro)含量在处理第 7 d 达到最大值。叶绿素在 5、25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 浓度处理下随胁迫时间的延长呈先上升后下降的趋势,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下的叶绿素含量不断上升,实验结束时各处理下叶片的叶绿素含量与处理浓度呈负相关。结果表明弯囊苔草能通过调节体内抗氧化酶活性来增强其抗氧化胁迫能力,这为其作为铜污染水体的修复植物提供了可能。

关键词: Cu^{2+} 胁迫;弯囊苔草;抗氧化酶;丙二醛;脯氨酸;叶绿素

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0264-06

Copper Stress on the Growth and Some Physiological Parameters of *Carex dispalata*

WANG Xiao-lan, ZHOU Shou-biao, YANG Ji-hui, ZHENG He-quan, ZHANG Dong

(Key Lab of Biological Resources Conservation and Utilization, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Effects of Cu^{2+} stress on the growth, activities of antioxidant enzymes, chlorophyll contents, membrane lipid peroxidation, soluble sugar and proline contents in the leaves of *Carex dispalata* were investigated experimentally with water culture method. The results showed that although *Carex dispalata* grew normally, the growth characteristics were correlated negatively with increasing Cu^{2+} concentrations, and roots did not regenerate under high Cu^{2+} concentrations. The activities of antioxidant enzymes increased in the beginning and then decreased with increasing stressing time. SOD activities of three treatments(1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) reached peak value in the 4th day and remained significantly higher than the control treatment($P<0.05$) throughout the experiment, and the activities were the highest at 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, followed by 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Both POD and CAT activities reached peaks in the 7th day. The peak value was highest at 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, followed by 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, for POD activities, whereas that of CAT was the highest at 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, followed by 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. MDA and soluble sugar contents increased with increasing stressing time and both were positively correlated with increasing Cu^{2+} concentrations when the experiment ended $r=0.988\ 0$ and $0.951\ 2$ for MDA and soluble sugar, respectively. Proline contents also increased in the beginning and then decreased with increasing stressing time. Under 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} concentrations, proline contents reached peak value after four-day treatment, while under 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ the peak value reached after seven-day treatment. Similarly, chlorophyll contents increased in the beginning and then decreased with increasing stressing time under 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} concentrations as well, whereas that under 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} concentration increased continuously. The chlorophyll contents were all

收稿日期 2009-06-25

基金项目 安徽省高校自然科学基金重点项目(2006kj060a),安徽省高校生物环境和生态安全重点实验室专项基金资助(2004sys003)

作者简介 王晓兰(1983—),女,山西大同人,在读硕士,主要从事水生植物生物学方面的研究。E-mail: wwxll.1983@163.com

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

correlated negatively with Cu^{2+} concentration under each treatment when the experiment was completed. In summary, *Carex dispalata* can improve its tolerance to oxidative stress by regulating in vivo activities of antioxidant enzymes, suggesting that the plant species investigated is a potential plant for the restoration of copper-polluted water bodies.

Keywords Cu^{2+} stress; *Carex dispalata*; antioxidant enzymes; malondialdehyde; proline; chlorophyll

近年来,随着采矿工业和冶金工业的迅速发展,大量的重金属通过各种途径进入河流湖泊等水体中,造成不同程度的环境污染。 Cu^{2+} 污染是造成水体重金属污染的重要元素之一,用 Cu^{2+} 污染水体灌溉农田或进入养殖水体都会造成对动植物的毒害,含 Cu^{2+} 过量的饮用水可以对人体造成不同程度的毒害。 Cu^{2+} 是植物必需的微量元素,是线粒体和叶绿体中电子传递酶的组成部分,但过量 Cu^{2+} 也会对一些植物产生毒害作用。在治理水体重金属污染技术中,植物修复技术具有处理成本低廉、无二次污染、生态效果好等优点,已成为治理重金属污染水体研究与开发的热点。目前对水体重金属污染的植物修复技术以水生植物的筛选为主,研究内容具体包括植物重金属的剂量效应和重金属的形态分布等^[1-5],而关于水生植物(特别是挺水植物)抗重金属胁迫和其解毒机理研究不多见。目前,运用水生植物修复重金属污染水体的方法已取得一定成效,筛选出了美人蕉^[6]、菰和菹蒲^[7]、芦苇^[8]等对重金属有富集能力的植物,应用于人工湿地、氧化塘的污水处理以及生态河道修复建设等水体生态工程中。

国内外就 Cu^{2+} 对植物的毒害、植物对 Cu^{2+} 的抗性机理等方面进行了诸多的研究报道^[9-13],但其研究材料多为农作物^[14-15]。弯囊苔草(*Carex dispalata*)是莎草科苔草属的一种多年生草本植物,广泛分布于我国南北各省。目前,国内外已有关于苔草属植物的分类进化、牧草和饲料、环境绿化美化、药用以及物质循环等方面的研究,而对重金属胁迫下的生理生化反应及生长特性的研究报道不多^[16]。本文以野外发现冬季仍生长旺盛的弯囊苔草为研究对象,在水培条件下研究弯囊苔草在不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下的部分生长特性及叶片部分生理生化指标的变化,以期对 Cu^{2+} 污染水体净化及水体环境修复工程提供有效的植物资源。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物材料弯囊苔草采自芜湖市三山区龙窝湖一带,挑选长势基本一致,无枯黄叶,生长健壮的植株。首先将根洗净,剪断其根状茎和部分须根,于改良

的 Hoagland 营养液中培养 7 d,进行适应性生长,备用。用于 Cu^{2+} 处理的弯囊苔草植株平均株高 80.00 cm,每株平均鲜重 22.50 g。

1.2 实验处理

参照“地表水环境质量标准”(GB 3838—2002),以改良的 Hoagland 营养液(Cu^{2+} 含量为 $0.032 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)为基本培养液,用 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 配制含 Cu^{2+} 量(以纯 Cu^{2+} 计算)分别为 1、5、25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液,以基本培养液为对照(CK),共设 4 个处理,进行水培实验。实验采用 7 L 塑料桶盛装 4 L 的营养液,以打有孔洞的泡沫塑料板作为漂浮载体,将供试植物分别移栽至载体的孔中进行水培,每桶 3 株,每个处理设 10 个重复,共计 30 株,总处理植株数为 120 株,培养温度和光照均为自然状态。每 3 d 分别换 1 次配制备用的不同 Cu^{2+} 含量营养液。分别在处理后的 1、4、7、10 d 于各处理组未取过样的植株的同一叶位取样,测定植株抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性,测定脯氨酸、丙二醛(MDA)和可溶性糖的含量及叶片叶绿素的含量,12 d 时收获整个植株,测定未取过样的植株的各生长指标。

1.3 测量指标与方法

1.3.1 植株生长指标的测定

测定植株株高、最长根长、新增根数、新分蘖数、鲜重、植株地上和地下部分的干重比(S/R)。

1.3.2 生理生化指标的测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用邻苯三酚自氧化法的改进-微量进样法^[17],以能使每毫升反应液自氧化速率抑制 50%的酶量为一个单位,单位为 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法^[18],将每分钟 OD 增加 0.01 定义为 1 个活性单位,单位为 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$;过氧化氢酶(CAT)活性测定采用陈利锋等的方法^[18],将每分钟 OD 减少 0.01 定义为 1 个活性单位,单位为 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$;丙二醛(MDA)和可溶性糖含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[18],单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 和 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$;脯氨酸含量用酸性茚三酮法测定^[18],单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$;叶绿素含量测定采用丙酮浸提法^[18],单位为 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 。所有数据吸光值用 UV-3802 型双光束紫外可见分光光度计测定,每次实验用测定 3 个重复的平均值表示。

1.4 数据处理

数据用 Microsoft Office Excel 和 SPSS11.5 进行 ANOVA 方差显著性分析。

2 结果与分析

2.1 Cu^{2+} 胁迫对弯囊苔草生长的影响

从表 1 可以看出,4 种处理下弯囊苔草的株高、新分蘖株数、鲜重都表现出与 Cu^{2+} 浓度呈负相关:株高 $r=-0.9653$,新分蘖株数 $r=-0.8796$,鲜重 $r=-0.9750$ 。方差分析表明,对照的株高与 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下的均存在显著差异 ($P<0.05$),1、5 和 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 3 个处理之间无显著差异;新分蘖株数在 1、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和对照之间无显著差异, $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下的新分蘖数与 1、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及对照之间均存在显著差异 ($P<0.05$);最长根长在各处理之间均无显著差异,但表现为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 促进, $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 抑制,新增根数在对照、1、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间均无显著差异, $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高浓度 Cu^{2+} 处理下无新增根,S/R 的大小顺序为对照 CK(10.06) $>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (9.09) $>25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (8.50) $>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (5.94)。

2.2 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下弯囊苔草叶片抗氧化酶活性的变化

不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下弯囊苔草叶片 CAT、POD 和 SOD 活性变化见图 1。CAT、POD 和 SOD 活性都表现出先升高后降低的趋势。各浓度 Cu^{2+} 胁迫下 CAT 活性在实验前 7 d 随着胁迫时间的延长都上升,第 7 d 达到峰值后下降。方差分析表明, 25 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理 CAT 活性的峰值显著高于对照和 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$);10 d 时, $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 胁迫下弯囊苔草叶片 CAT 活性与对照的基本持平,显著高于 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 胁迫下 CAT 活性 ($P<0.05$)。4 种 Cu^{2+} 浓度处理下 POD 活性在实验前 7 d 随胁迫时间的延长而升高,第 7 d 达峰值后下降,方差分析表明,1、5、 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下 POD 活性峰值均显著高于对照 ($P<$

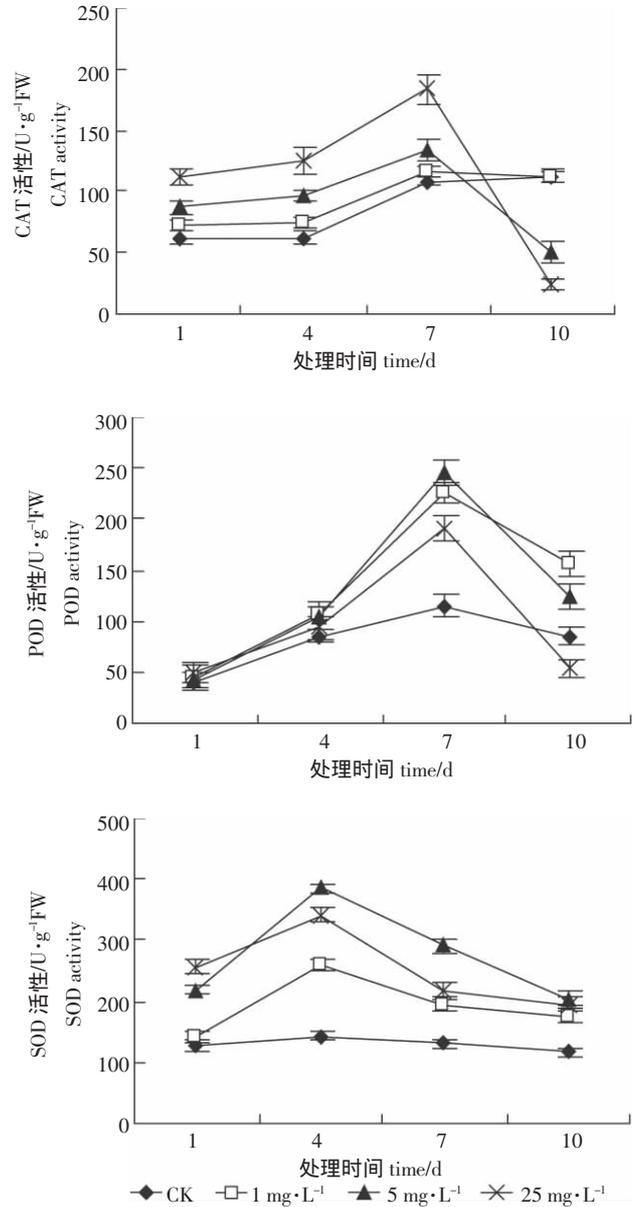


图 1 Cu^{2+} 处理对 CAT、POD、SOD 活性的影响

Figure 1 Effect of treatment on CAT、POD、SOD activities

0.05), 其中 5 和 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下 POD 活性峰值显著高于 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$);第 10 d 时 4 种处理下

表 1 不同浓度 Cu^{2+} 胁迫下弯囊苔草的生长特性($N=3$, $\bar{x}\pm s$)

Table 1 Growth characteristics of *Carex dispalata* under different concentrations Cu^{2+} ($N=3$, $\bar{x}\pm s$)

处理 treatment	生长特性 Growth characteristics					
	株高 Plant height/cm	最长根长 Length of longest root/cm	新分蘖数/株 New tillers/plant	新增根数/株 New root/plant	鲜重/株 Fresh weight/g	地上/地下 S/R
对照	86.52±1.79a	11.11±1.51a	2.33±0.88a	10.56±4.78a	24.76±2.94a	10.06±1.63a
$1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	83.50±3.79ab	12.50±2.96a	2.33±0.34a	14.67±2.33a	24.21±0.95a	9.09±0.77a
$5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	81.72±1.07b	10.28±1.25a	2.00±0.33a	10.56±4.44a	22.48±0.97a	5.94±1.14b
$25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80.94±2.24b	9.92±1.12a	0.89±0.51b	—	21.93±0.95a	8.50±1.36a

注:表中数据为 3 个重复的平均值±标准差,同列数据标有不同字母表示有显著差异(LSD 检验 $P=0.05$)。

的 POD 活性差异均显著($P<0.05$)。SOD 活性变化趋势与 CAT、POD 略有不同 4 种 Cu^{2+} 浓度处理下 SOD 活性均在第 4 d 达峰值。方差分析表明,各峰值间差异显著;第 10 d 时,1、5、25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理的 SOD 活性均显著高于对照($P<0.05$)。

从 3 种酶的变化趋势可以看出,在胁迫前期抗 Cu^{2+} 胁迫方面 SOD 起到更重要的抗性调节作用;CAT 和 POD 在胁迫后期起到了主要的抗性调节作用,其中 POD 的抗胁迫作用表现的更明显。

2.3 丙二醛(MDA)和可溶性糖含量的变化

由图 2 可知,4 种处理下弯囊苔草叶片 MDA 含量和可溶性糖含量都随着 Cu^{2+} 胁迫时间的延长而增加。胁迫 10 d 时,各处理下 MDA 含量为 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (26.66 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$) > 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (22.28 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$) > 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (19.25 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$) > CK (17.08 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$);可溶性糖含量为 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (82.54 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) > 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (81.64 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) > 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (65.23 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) > CK (48.60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)。方差分析表明,第 10 d 时 4 种处理间 MDA 含量差异均显著($P<0.05$);可溶性糖含量在 25 和 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下与 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下和对照之间差异显著($P<0.05$),25 和 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间差异不显著。胁迫

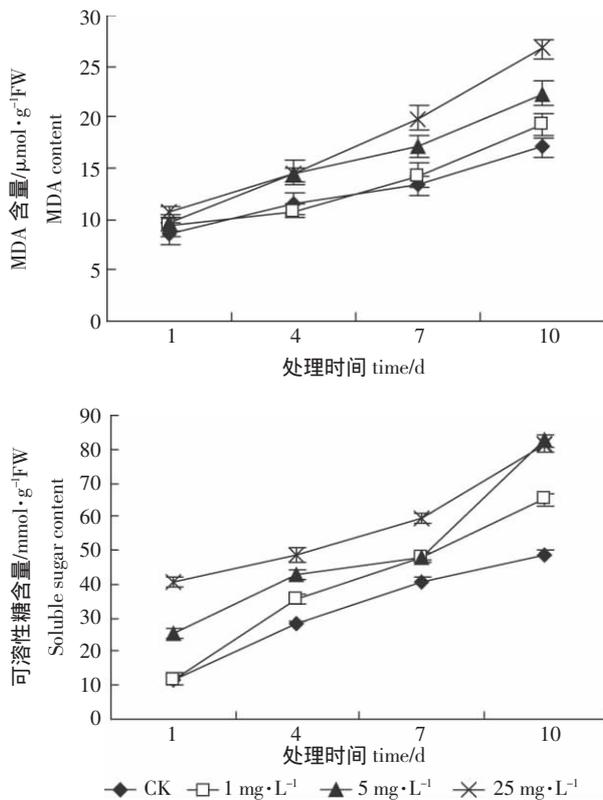


图 2 Cu^{2+} 处理对 MDA 和可溶性糖含量的影响

Figure 2 Effect of treatment on MDA and soluble sugar contents

胁迫 10 d 时弯囊苔草叶片的丙二醛 (MDA)($r=0.9880$) 和可溶性糖($r=0.9512$)含量都表现出与 Cu^{2+} 浓度呈正相关性。

2.4 脯氨酸(Pro)含量变化

由图 3 可知,CK、1、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下弯囊苔草叶片 Pro 含量在处理前 4 d 随 Cu^{2+} 胁迫时间的延长而增加,第 4 d 达峰值后下降,峰值大小为 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (14.38 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$) > 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (12.44 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$) > CK (10.88 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)。25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 胁迫下弯囊苔草叶片 Pro 含量在实验第 7 d 达到最大值,Pro 含量显著高于其他处理组($P<0.05$);第 10 d 时,4 种浓度 Cu^{2+} 处理之间 Pro 含量均无显著差异。

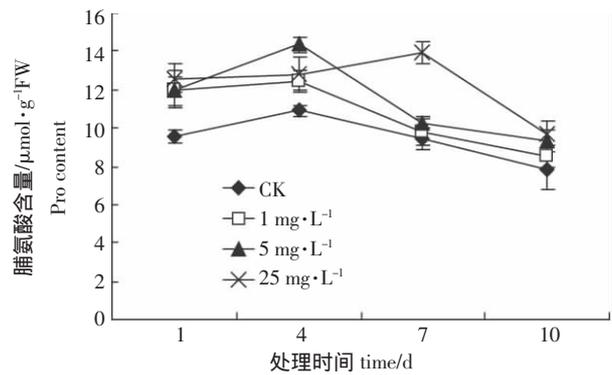


图 3 Cu^{2+} 处理对 Pro 含量的影响

Figure 3 Effect of treatment on pro contents

2.5 叶绿素含量变化

由图 4 可知,4 种 Cu^{2+} 处理下弯囊苔草叶绿素含量随着处理时间的延长表现不同的变化趋势。CK 和 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+} 处理下叶绿素含量随胁迫时间的延长不断升高,5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下叶片叶绿素含量先升高再降低,并在处理第 4 d 达到峰值后下降。胁迫 10 d 后 4 种 Cu^{2+} 处理下弯囊苔草叶绿素含量为

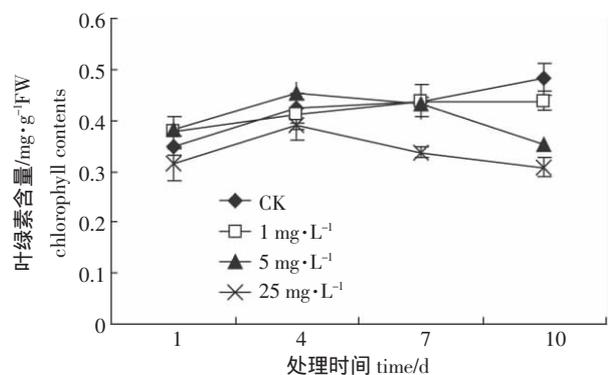


图 4 Cu^{2+} 处理对叶绿素含量的影响

Figure 4 Effect of treatment on chlorophyll contents

CK(0.48 mg·g⁻¹FW)>1 mg·L⁻¹(0.420 mg·g⁻¹FW)>5 mg·L⁻¹(0.35 mg·g⁻¹FW)>25 mg·L⁻¹(0.31 mg·g⁻¹FW),各处理间差异均显著。

3 讨论

Cu²⁺是线粒体和叶绿体中电子传递酶的组成部分,过量的Cu²⁺可以对植物光合作用和呼吸作用过程产生不良影响,从而使植物生长受阻。本实验中1、5、25 mg·L⁻¹3种处理下弯囊苔草的株高、新分蘖株数、鲜重都表现出与Cu²⁺浓度呈负相关。说明在不同浓度Cu²⁺胁迫下,随着处理浓度的升高和胁迫时间的延长,弯囊苔草体内Cu²⁺不断积累,对其生长产生了一定的影响。5、25 mg·L⁻¹处理下的株高与对照差异显著(P<0.05),可见过量的Cu²⁺对弯囊苔草植株生长产生了一定的不良影响,25 mg·L⁻¹高浓度Cu²⁺处理明显抑制了弯囊苔草的新增根和新分蘖植株数,实验结果与王友保等^[19]关于Cu²⁺污染对高羊茅生长及活性氧代谢影响的研究结果基本一致。

植物正常生长时,作为保护酶系统的重要组成部分,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等能维持体内活性氧产生和清除的动态平衡。很多研究证明,植物在逆境胁迫下SOD、POD等抗氧化酶类活性随活性氧的升高而上升^[20],但其因果关系以及作用机制尚待深入阐明。本实验中4种浓度Cu²⁺处理下,3种酶活性在不同胁迫时间达到最大值,可能是在不同Cu²⁺胁迫下,弯囊苔草体内产生一定量的活性氧,SOD首先要催化超氧自由基歧化,故在处理第4d就达到峰值,POD和CAT是将歧化产生的H₂O₂分解除去,在处理第7d达到峰值。随着胁迫时间的延长,3种酶的活性呈不同程度的下降趋势,可能是植物体内有害物质被氧化分解,导致抗氧化酶合成速率降低,也可能是植物吸收过量Cu²⁺使酶活性降低。弯囊苔草叶片CAT、POD、SOD活性所表现出的变化特点,反映了植物体内抗氧化酶系统各种酶类之间的协调抗性作用。与张开明等^[21]对水生花卉黄菖蒲Cu²⁺胁迫抗耐性研究的结果相一致。

当植物受胁迫体内的活性氧浓度超过一定阈值时,膜脂发生过氧化,最重要的产物是MDA,因而MDA含量可反映膜脂质过氧化作用的强弱,质膜透性可表示膜受伤害或变性程度。研究表明,重金属是脂质过氧化的诱变剂,其浓度越高脂质的过氧化产物MDA积累越多,两者呈密切相关^[22]。植物受胁迫时体内的可溶性糖含量也增加。本实验最后一次测定的

MDA和可溶性糖含量与Cu²⁺处理浓度的相关性系数为:MDA r=0.988 0,可溶性糖 r=0.951 2。与计汪栋等^[23]对Cu²⁺胁迫对竹叶眼子菜叶片生理指标和超微结构的影响的研究结果相一致。

植物体内的游离脯氨酸含量变化是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应。它既可能是植物细胞结构和功能受损伤的表现,又可能是植物对逆境胁迫的适应性反应,可以作为细胞质渗透调节物质,稳定生物大分子结构和作为能量库调节细胞氧化还原势等作用,还具有清除活性氧的功能^[24]。在本实验中,随着胁迫时间的延长游离脯氨酸含量先增后降,说明弯囊苔草可能在通过调节体内游离脯氨酸含量来抵抗Cu²⁺毒害,具体机理有待于进一步研究。

Cu²⁺是叶绿体中质体蓝素的组成成分,是叶绿素形成过程中某些酶的活化剂,参与光合作用电子传递过程,故适量的Cu²⁺可以弥补蓝质体所需,并激发酶的活性,促进植物光合作用。但植物体内Cu²⁺过量可以使叶绿体酶活性比例失调致使叶绿素分解加快^[14]。本实验结束时各处理下弯囊苔草叶片叶绿素含量与处理浓度呈负相关 r=-0.958 5。可见,低浓度的Cu²⁺处理促进弯囊苔草叶片叶绿素的生成,这与计汪栋等^[23]对Cu²⁺胁迫对竹叶眼子菜叶片生理指标和超微结构的影响的研究结果一致。

4 结论

在Cu²⁺胁迫下,弯囊苔草生长特性和叶片内保护酶SOD、POD、CAT活性的变化以及Pro、叶绿素含量的变化都表明了弯囊苔草对Cu²⁺胁迫有一定的耐受性,再者弯囊苔草生物量大,生长周期长,繁殖快,可作为Cu²⁺污染水体的修复植物加以利用。对弯囊苔草的研究尚处于初步研究阶段,其对Cu²⁺的耐受机理、富集能力以及牧草利用等方面还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Robinson B, Duwig C, Bolan N, et al. Uptake of arsenic by New Zealand watercress(*Lepidium sativum*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 301(1-3): 67-73.
- [2] DENG H, YE Z H, WONG M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(1): 29-40.
- [3] 韩志萍, 胡正海. 芦竹对不同重金属耐性的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 161-165.
HAN Zhi-ping, HU Zheng-hai. Tolerance of *Arundo donax* to heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 161-165.
- [4] Mkwandawire M, Dudel E G. Accumulation of arsenic in *Lemma gibba* L.

- (duckweed) in tailing waters of two abandoned uranium mining sites in Saxony, Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 336(1-3) :81-89.
- [5] Bragato C, Brix H, Malagoli M. Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3) :967-975.
- [6] CHENG S P, REN F, Wolfgang G, et al. Effects of cadmium on chlorophyll content, photochemical efficiency, and photosynthetic intensity of *Canna indica* L. [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, 4(3) :239-246.
- [7] 周守标, 王春景, 杨海军, 等. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力[J]. *生态学报*, 2007, 27(1) :281-287.
ZHOU Shou-biao, WANG Chun-jing, YANG Hai-jun, et al. Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1) :281-287.
- [8] 滑丽萍, 华 珞, 王学东, 等. 芦苇对白洋淀底泥重金属污染程度的影响效应研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2) :102-105.
HUA Li-ping, HUA Luo, WANG Xue-dong, et al. Study on effect of reed on heavy metal pollution in sediments of Baiyangdian[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2) :102-105.
- [9] Kinraide T B, Pedler J F, Parker D R. Relative effectiveness of calcium and magnesium in the alleviation of rhizotoxicity in wheat induced by copper, zinc, aluminum, sodium, and low pH[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2) :201-208.
- [10] LIN J X, JIANG W S, LIU D H. Accumulation of copper by roots, hypocotyls, cotyledons and leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86 :151-155.
- [11] LIU J, Xiong Z T, LI T Y, et al. Bioaccumulation and ecophysiological responses to copper stress in two populations of *Rumex dentatus* L. from Cu contaminated and non-contaminated sites[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52 :43-51.
- [12] 谷 巍, 施国新, 张超英, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 对菹草光合系统及保护酶系统的毒害作用 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2002, 28(1) :69-74.
GU Wei, SHI Guo-xin, ZHANG Chao-ying, et al. Toxic effects of Hg^{2+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} on photosynthetic systems and protective enzyme systems of *Potamogeton crispus* [J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 2002, 28(1) :69-74.
- [13] 周长芳, 吴国荣, 施国新, 等. 水生花抗氧化系统在抵御 Cu^{2+} 胁迫中的作用[J]. *植物学报*, 2002, 43(4) :389-394.
ZHOU Chang-fang, WU Guo-rong, SHI Guo-xin, et al. The role of antioxidant systems in Cu^{2+} stress resistance in *Alternanthera philoxeroides* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(4) :389-394.
- [14] 王友保, 刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5) :773-776.
WANG You-bao, LIU Deng-yi. Effect of Cu, As and their combination pollution on eco-physiological index of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5) :773-776.
- [15] 王友保, 刘登义, 张 莉. 铜、砷及其复合污染对黄豆 (*Glycine max*) 影响的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1) :117-120.
WANG You-bao, LIU Deng-yi, ZHANG Li, et al. Effect of Cu and As and their combination pollution on *Glycine max* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1) :117-120.
- [16] 胡宗达, 杨远祥, 朱雪梅, 等. Pb、Zn 对超富集植物(小鳞苔草)抗氧化酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6) :86-91.
HU Zong-da, YANG Yuan-xiang, ZHU Xue-mei, et al. Influence of Pb, Zn on activity of SOD, POD and CAT within roots and leaves of hyperaccumulator (*Carex gentiles* Franch.) [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6) :86-91.
- [17] 萧能庚, 余瑞云, 袁明秀, 等. 生物化学实验原理和方法[M]. 第二版. 北京: 北京大学出版社, 2008.
XIAO Neng-geng, YU Rui-yun, YUAN Ming-xiu, et al. Principles and methods of biochemical experiments [M]. The second edition. Beijing: Beijing University Press, 2008.
- [18] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-jing. Experiments guide of plant physiology [M]. The third edition. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [19] 王友保, 黄永杰, 严 密, 等. 铜污染对高羊茅生长及活性氧代谢影响的研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6) :167-170.
WANG You-bao, HUANG Yong-jie, YAN Mi, et al. Effects of Cu on growth and activate oxygen metabolism of *Festuca arundinacea* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6) :167-170.
- [20] YAN B, DAI Q J, LI X Z, et al. Flooding induced membrane damage, lipid oxidation and activated oxygen generation in corn leaves[J]. *Plant Soil*, 1996, 179 :261-268.
- [21] 张开明, 黄苏珍, 原海燕, 等. 水生花卉黄菖蒲 Cu^{2+} 胁迫抗耐性研究[J]. *江苏农业科学*, 2006(6) :217-220.
ZHANG Kai-ming, HUANG Su-zhen, YUAN Hai-yan, et al. Tolerance of *Iris pseudacorus* L. to Cu^{2+} stress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2006(6) :217-220.
- [22] 张玉秀, 柴团耀, Gerard B. 植物耐重金属机理研究进展[J]. *植物学报*, 1999, 41(5) :453-457.
ZHANG Yu-xiu, CHAI Tuan-yao, Gerard B. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(5) :453-457.
- [23] 计汪栋, 施新国, 杨海燕, 等. 铜胁迫对竹叶眼子菜叶片生理指标和超微结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12) :2727-2732.
JI Wang-dong, SHI Guo-xin, YANG Hai-yan, et al. Effects of Cu stress on leaf physiological indices and ultrastructure of *Potamogeton malaianus* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12) :2727-2732.
- [24] 曾路生, 廖 敏, 黄昌勇, 等. 镉污染对水稻土微生物量、酶活性及水稻生理指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11) :2162-2167.
ZENG Lu-sheng, LIAO Min, HUANG Chang-yong, et al. Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, (16) :2162-2167.