

不同浓度铜对紫背萍和青萍色素含量及抗氧化酶系统的影响*

涂俊芳 王兴明 刘登义** 李晶 李征

(安徽师范大学生物多样性研究中心,重要生物资源保护与利用安徽省重点实验室,芜湖 241000)

【摘要】 通过水培试验研究了不同浓度的重金属 Cu 对紫背萍 (*Spirodela polyrrhiza*) 和青萍 (*Lemna minor*) 的色素含量和抗氧化酶系统的影响。结果表明,低浓度 Cu ($0.056 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的处理下,紫背萍和青萍的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 (a+b) 的含量均出现不同程度的增加,分别高出其对照 11%、46%、22% 和 8%、15%、11%,而在高浓度 Cu ($0.18\sim 5.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的处理下,上述色素含量均显著下降,平均下降幅度分别达 63%、62%、65% 和 46%、44%、45%。紫背萍体内丙二醛 (MDA) 含量为青萍的 2.57 倍。两种浮萍的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 的活性均随 Cu 浓度的增加而呈先升后降的趋势,紫背萍体内 3 种酶活性在 Cu 浓度仅为 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时即达峰值,随后则大幅下降,而青萍体内 3 种酶活性却在 Cu 浓度分别升高到 0.56 、 1.0 和 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才达到峰值。可见,在 Cu 胁迫下,紫背萍受 Cu 毒害较青萍深,且其体内抗氧化酶系统也较青萍敏感。

关键词 铜 紫背萍 青萍 色素 抗氧化酶系统

文章编号 1001-9332(2006)03-0502-05 **中图分类号** Q945.78 **文献标识码** A

Effects of different concentration copper on pigment content and antioxidase system of *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna minor*. TU Junfang, WANG Xingming, LIU Dengyi, LI Jing, LI Zheng (Provincial Key Laboratory of Conservation and Exploitation of Biological Resources in Anhui, Biodiversity Research Center, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(3):502~506.

The study with water culture showed that when treated with $0.056 \text{ mg Cu}\cdot\text{L}^{-1}$, the chlorophyll a, b and (a+b) contents in *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna minor* were increased by 11%, 46% and 22%, and 8%, 15% and 11%, while under $0.15\sim 5.6 \text{ mg Cu}\cdot\text{L}^{-1}$, the contents were decreased by 63%, 62% and 63%, and 46%, 45% and 45%, respectively, compared with no copper added. The malondialdehyde (MDA) content in *S. polyrrhiza* was 2.75 times higher than that in *L. minor* averagely. The superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) activities in both *S. polyrrhiza* and *L. minor* all increased first, but decreased then with increasing copper concentration. For *S. polyrrhiza*, the activities of test enzymes were the highest at $0.18 \text{ mg Cu}\cdot\text{L}^{-1}$, but for *L. minor*, only when the Cu concentrations were up to 0.56 , 1.0 and $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the activities of SOD, CAT and POD got to their peak values, respectively. It was concluded that higher concentrations of copper caused more damage to *S. polyrrhiza* than to *L. minor*, and the antioxidase system of the former was much more sensitive to the copper stress than that of the latter.

Key words Copper, *Spirodela polyrrhiza*, *Lemna minor*, Pigment content, Antioxidase system.

1 引 言

随着人类活动的加剧和工业的发展,采矿、冶炼以及对一些重金属尾矿的处理不善等,导致重金属对水体环境的污染日趋严重。许多重金属(如 Cu、Zn 等)都是植物体必需的微量元素,对植物生长发育能起到十分重要的作用,但是当环境中重金属含量超过某一阈值时,就会对植物产生毒害作用,轻则导致植物体内代谢过程紊乱,生长发育受到限制,重则造成植物死亡。这些过量重金属一旦进入环境不仅难以排除,而且还会在生物体内出现有机化的趋势,并可经食物链危及人类健康^[5]。

采用植物修复方法治理污水,不但投资小、效率

高,而且会带来较高的环境生态效益,已逐渐成为当今国际植物营养、污染修复治理研究的一个新热点^[2,20]。近年来,越来越多的污水生物处理技术正在尝试利用水生植物来治理污染^[13]。其中,浮萍科水生维管植物具有生长速度快和易于打捞处理等特点,因而成为处理污水的重要植物类群之一^[4]。我国的浮萍科植物有 3 属 6 种,广泛分布于南北各省,安徽省有 3 属、5 种。种云霄等^[21~23]对细脉浮萍、小浮萍和紫背萍在废水 N、P 资源化方面的应用潜力

* 国家重点基础研究发展规划项目(2004 CB418503)和国家自然科学基金资助项目(30470270)。

** 通讯联系人。

2005-06-03 收稿,2005-11-08 接受。

作了探讨研究,而它们在重金属污水治理中的应用潜力却少有研究^[15]。

为了研究浮萍科植物对重金属污染的耐性,从野外采回分布最广的紫背萍(*Spirodela polyrrhiza*)和青萍(*Lemna minor*),用修改的 Hoagland 营养液^[10]进行驯化培养,然后再用不同浓度 Cu 溶液进行了水培试验.研究不同浓度 Cu 对紫背萍和青萍色素含量及过氧化酶系统的影响,可为治理以 Cu 为主的水污染和筛选耐 Cu 植物提供参考资料。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验用紫背萍和青萍均采自安徽省芜湖市马塘区某一远离工业污染的水塘,采回后用自来水、蒸馏水、去离子水各冲洗数次,直至冲洗水中检测不出 Cu 离子,然后置于直径为 16 cm 的聚乙烯盒中,用修改的 Hoagland 营养液驯化培养 7 d 以上,待生物量扩增后,选用大小均一,生长健壮的植物个体(1 个叶片即 1 个植物个体)作试验材料.试验室培养条件:温度 25 ± 2 °C,光暗时比 16:8,隔天向培养盒内添加适量培养液,以保持液面高为 5 cm。

2.2 试验方法

2.2.1 试验设计 试验以修改的 Hoagland 营养液为基础,其中 Cu 含量根据试验要求向营养液中添加硫酸铜进行调整,先进行预备试验.依据预备试验结果,设计 9 个 Cu 浓度(以纯 Cu 计):0.056、0.1、0.18、0.32、0.56、1.0、1.8、3.2 和 5.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以不加硫酸铜的营养液(Cu 浓度计为 0)为对照.在直径为 12 cm 的聚乙烯培养盒中分别加入含有上述不同浓度 Cu 的溶液,液面高 5 cm.依据相关资料^[19],每个浓度设 6 个重复,每个培养盒中放 50 个植物体,培养条件同上,培养 96 h 后收取,检测生理指标。

2.2.2 叶片色素含量的测定 分别取鲜叶 0.2 g,加入适量 80% 丙酮,研磨提取后,采用 752A 型分光光度计,分别测定 663、652、645 和 440 nm 光密度,计算叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素(a+b)(Chl(a+b))和类胡萝卜素(Chlt)含量(单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$)^[24]。

2.2.3 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定 采用氮蓝四唑(NBT)光还原法,利用其对 NBT 光抑制作用,酶液在 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 冷冻离心机离心 20 min 后,于 25 °C、4 000 lx 光照下进行反应,20 min 后测定 560 nm 处的光密度($\Delta\text{OD}_{560} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$)^[6]。

2.2.4 过氧化物酶(POD)活性测定 采用 Proinoke^[12]的方法进行测定.活性单位用 20 °C 条件下,1 min 内 1 g 植物材料氧化愈创木酚的微克数来表示($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.2.5 丙二醛(MDA)含量测定 按林植芳等^[7]的硫代巴比妥酸(TBA)法测定($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$)。

3 结果与分析

3.1 不同浓度 Cu 对叶片色素含量的影响

Cu 处理下,紫背萍和青萍叶片中的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b)在 Cu 浓度低于 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均比其对照有所升高,在 Cu 浓度高于 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均随着 Cu 浓度的升高而降低.紫背萍和青萍叶片中的 Chlt 则均随 Cu 浓度的升高,先有所降低后回升,然后再下降(图 1).各色素含量均与 Cu 浓度呈显著负相关(表 1).通过比较发现,紫背萍叶片色素含量随 Cu 浓度增高的变化幅度显著大于青萍($P < 0.01$).当 Cu 浓度为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,紫背萍和青萍的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b)均达到峰值,分别高出对照 11%、46%、22% 和 8%、15%、11%,Chlt 则分别比其对照降低 60% 和 58%;当 Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,紫背萍和青萍的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b)均降到最低,分别比其对照降低 91%、84%、89% 和 80%、73%、77%,Chlt 则分别比其对照降低 89% 和 50%。

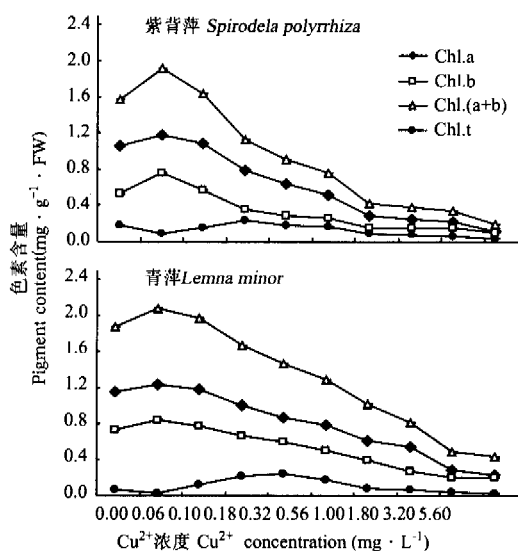


图 1 不同浓度 Cu 对紫背萍与青萍叶片色素含量的影响

Fig. 1 Effects of the concentrations of copper on pigment content in leaves of *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna minor*.

3.2 不同浓度 Cu 对膜脂过氧化水平的影响

MDA 是膜脂过氧化的重要产物,可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性的化合物(脂褐素)沉淀,干扰细胞的正常生命活动^[17],因此 MDA 含量常被用来衡量植物体内的膜脂过氧化水平.本研究中,Cu 胁迫下紫背萍体内的丙二醛含量(Z(MDA))和青萍体内的丙二醛含量(Q(MDA))平均分别为 4.72 和 $1.84 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$,前者明显高于后者($P < 0.05$).Z(MDA)在 Cu 浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比对照略低,当 Cu 浓度高于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时随 Cu 浓度的增高而先显著升高,至 Cu 浓度为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到峰值,比对照增加 64% ($P < 0.05$),

随后大幅度下降,当 Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时甚至比对照降低 61% ($P < 0.05$). Q(MDA) 在 Cu 浓度低于 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时与对照差异并不显著,当 Cu 浓度高于 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时随 Cu 浓度的增高而先逐渐升高,直至 Cu 浓度达到 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才达到峰值,比对照增加 281% ($P < 0.05$),随后下降,当 Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,比其对照降低 46% ($P < 0.05$) (图 2a).

3.3 不同浓度 Cu 对抗氧化酶系统的影响

紫背萍和青萍体内 3 种抗氧化酶活性均随 Cu 浓度的增高而先升高后降低. 在 Cu 胁迫下,紫背萍体内的 CAT 活性(Z(CAT))和青萍体内的 CAT 活性(Q(CAT))分别为 4.29 和 $6.87 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$,前者显著低于后者 ($P < 0.05$),但相对对照的变化幅度却高于后者(图 2b). Z(CAT) 随 Cu 浓度的增高而先略升,当 Cu 浓度为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到峰值,高出其对照 67% ($P < 0.05$),随后下降,当 Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,降到最低,比对照降低 63%. Z(CAT) 与 Cu 浓度呈显著负相关(表 1). Q(CAT) 在 Cu 浓度低于 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照无明显差异,当 Cu 浓度高于 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,则随 Cu 浓度的增高而先升高,当 Cu 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到峰值,高出其对照 46% ($P < 0.05$),随后略降. 可见,就对 Cu 胁迫的敏感性而言, Z(CAT) $>$ Q(CAT).

Z(POD)和 Q(POD)在 Cu 浓度分别为 0.18 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到峰值,分别高出其对照 37% 和 69% ($P < 0.05$),峰值过后, Z(POD) 随 Cu 浓度增高的下降幅度较大,当 Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Z(POD) 比其对照降低 35% ($P < 0.05$),而 Q(POD) 却仍然比对照高出 43% ($P < 0.05$),表明 Z(POD) 对 Cu 胁迫的敏感性也大于 Q(POD) (图 2c). Z(POD) 与 Cu 浓度呈显著负相关,而 Q(POD) 与 Cu 浓度呈曲线相关(表 1).

(Z(SOD)) 和 (Q(SOD)) 平均分别为 1.00 和

$0.55 \Delta \text{OD}_{560} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$, Z(SOD) $>$ Q(SOD) ($P < 0.05$) (图 2d), 与 Z(MDA) $>$ Q(MDA) 相对应,这可能是为维持其体内正常的自由基代谢所需. Z(SOD) 和 Q(SOD) 在 Cu 浓度分别为 0.18 和 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到峰值,分别比对照升高 180% 和 311% ($P < 0.05$),峰值过后均随 Cu 浓度增高而大幅下降,但 Z(SOD) 下降幅度显著高于 Q(SOD),当

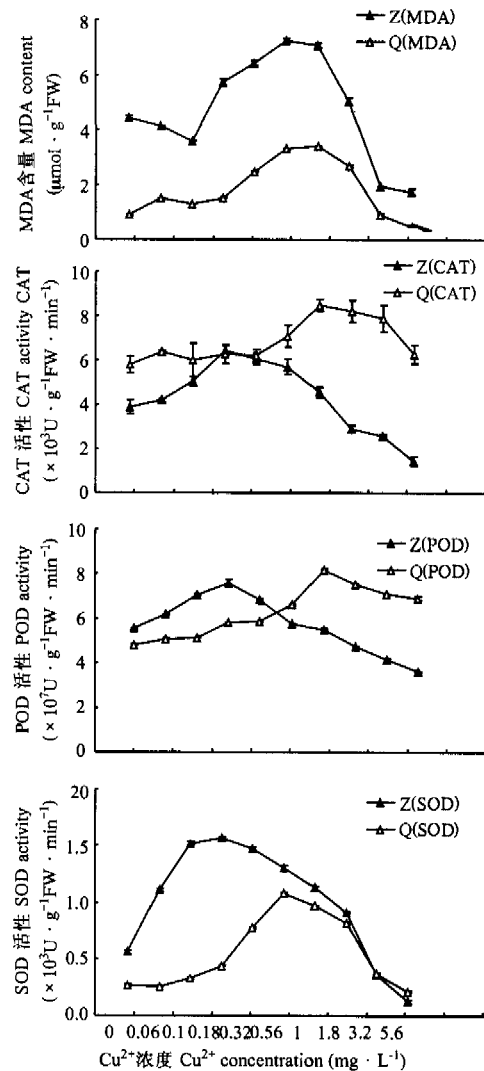


图 2 不同浓度 Cu 对两种浮萍 MDA 含量、CAT 活性、POD 活性和 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of the concentrations of copper on MDA content, CAT activity, POD activity and SOD activity of two duckweeds.

表 1 2 种浮萍叶片色素含量和体内抗氧化酶活性与 Cu 浓度间的回归分析

Table 1 Results of the analysis of regression between pigment content and activities of antioxidant enzyme of two duckweeds (Y) and concentrations of Cu (x)

项目 Item	紫背萍 <i>Spirodela polyrrhiza</i>			青萍 <i>Lemna minor</i>		
	方程 Equation	R ²	P	方程 Equation	R ²	P
Chla	$Y = -0.168x + 0.812$	0.585	0.010	$Y = -0.176x + 1.016$	0.769	0.001
Chlb	$Y = -0.800x + 0.416$	0.440	0.037	$Y = -0.120x + 0.661$	0.692	0.003
Chl(a + b)	$Y = -0.248x + 1.228$	0.540	0.016	$Y = -0.286x + 1.677$	0.743	0.001
Chlt	$Y = -0.026x + 0.139$	0.538	0.016	$Y = -0.021x + 0.136$	0.248	0.143
CAT	$Y = -0.727x + 5.220$	0.666	0.004	$Y = -0.301x^2 + 1.731x + 6.073$	0.809	0.003
POD	$Y = -0.588x + 6.460$	0.709	0.002	$Y = -0.256x^2 + 1.662x + 5.360$	0.676	0.019
SOD	$Y = -0.320x + 1.285$	0.625	0.006	$Y = -0.626x^2 + 0.285x + 0.477$	0.343	0.023

Cu 浓度为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,二者分别比其对照降低 78% 和 19%。可见,2 种浮萍体内的 SOD 活性在 Cu 胁迫下的变化率均明显大于 CAT 和 POD,体现了 SOD 对 Cu 胁迫的反应更为敏感,而且 Z(SOD) 对 Cu 胁迫的敏感性也大于 Q(SOD)。Z(SOD) 与 Cu 浓度呈显著负相关(表 1)。

4 讨 论

Cu 可以在细胞色素及其生化过程等不同层次上来影响植物的光合作用,从而影响植物生长^[9]。本研究中,Cu 胁迫下 2 种浮萍的 Chla、Chlb 和 Chl(a+b) 均在低浓度 ($< 0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时增高,然后随 Cu 浓度增高而递减。其变化机制可能是质体蓝素作为光反应的电子传递链中的一员不可或缺,其氧化还原中心有 Cu^{2+} , 故适量 Cu 的存在使叶绿素含量先微增,但高浓度 Cu 使得叶绿体酶活性比例失调,加快了叶绿素的分解,同时由于 Cu 的局部积累,致使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化而失活,所以会导致叶绿素含量降低。与储玲等^[1]对 Cu 污染下三叶草幼苗生长的研究结果类似。另外,通过比较发现,各浓度下紫背萍的叶绿素含量不仅低于青萍 ($P < 0.05$),且随 Cu 浓度的升高其叶绿素含量的变化幅度明显高于青萍,表明紫背萍叶片中叶绿素受 Cu 胁迫的影响较大。

过量 Cu 会导致植物体内的活性氧自由基如 O_2^- 、 $\cdot\text{OH}$ 、 H_2O_2 等的产生量增大。类胡萝卜素在植物体内具有抑制活性氧的产生及清除活性氧的功能^[3]。本研究中,Z(Chlt) 与 Q(Chlt) 在 Cu 浓度为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均比对照有所下降;当 Cu 浓度高于 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,二者均随 Cu 浓度的增高而先增后降。值得注意的是,Z(Chlt) 随 Cu 浓度升高的变化幅度也大于 Q(Chlt),Z(Chlt) 对 Cu 胁迫的敏感性大于 Q(Chlt)。

植物体内的 O_2^- 、 $\cdot\text{OH}$ 、 H_2O_2 等活性氧的大量产生会引发或加剧膜脂过氧化作用,造成膜系统的严重伤害^[5]。本研究中用 MDA 来衡量植物的受害程度时发现,当 Cu 浓度分别为 $0.1 \sim 0.56$ 和 $0.18 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,Z(MDA) 和 Q(MDA) 明显高于对照 ($P < 0.01$),表明 Cu 毒害使植物体内膜脂过氧化水平升高了。当 Cu 浓度继续增高时,Z(MDA) 和 Q(MDA) 则可能由于活性氧的大量积累,使细胞失去正常代谢能力,而大幅降低。在 Cu 浓度相同时,Z(MDA) $>$ Q(MDA) ($P < 0.05$),且 Z(MDA) 达到峰值时 Cu 的浓度较低,反映出在相同 Cu 胁迫的条件

下,紫背萍受毒害较深,其对 Cu 胁迫的反应可能要比青萍更为敏感。

逆境胁迫使植物体内的活性氧的产量增大,同时植物体内存在的由 SOD、CAT 和 POD 共同组成的抗氧化酶系统,在一定范围内能有效地清除植物体内的自由基和过氧化物,活性氧和抗氧化酶常被认为是种平衡体系^[8,18]。本研究中 2 种浮萍的 SOD、CAT 和 POD 的活性均随 Cu 浓度的增高而先升后降,与任安芝等^[14]对 Pb、Cd 和 Cr 胁迫下青菜幼苗体内几种抗氧化酶活性变化的研究结果类似。低浓度处理时的抗氧化酶活性出现不同程度的升高,可能是低浓度 Cu 对植物产生积极的“刺激作用”^[11]。Vera-Estrella 等^[16]提出少量活性氧可作为第 2 信使,启动细胞的防御反应。本研究中,低浓度 Cu 处理下,2 种浮萍体内均产生少量的 MDA,说明 Cu 刺激了植物体内少量的活性氧的积累,并激发了细胞的自身防御系统,表现出抗氧化酶活性的升高。而高浓度 Cu 的胁迫,使植物体内的活性氧大量积累,并超出细胞自身的抵御能力,因此对细胞的结构和功能造成了严重的破坏,并使酶蛋白氧化变性,从而使 2 种浮萍的抗氧化剂类胡萝卜素含量及 3 种抗氧化酶活性明显降低,造成抗氧化酶系统严重失衡,表现出严重的 Cu 毒害现象。此外,SOD、CAT 和 POD 3 种抗氧化酶对 Cu 毒害反应的敏感性是不同的,本试验结果表明 2 种浮萍的 SOD 对 Cu 胁迫的反应比 POD 和 CAT 敏感,表明 SOD 在浮萍体内清除活性氧的过程中不起关键作用。紫背萍体内的 3 种抗氧化酶随 Cu 浓度增高的变化幅度较大,且达到峰值时的 Cu 浓度较低,说明紫背萍体内的抗氧化酶系统对 Cu 胁迫反应也较敏感。

参考文献

- 1 Chu L(储玲), Liu D-Y(刘登义), Wang Y-B(王友保), et al. 2004. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pretense*. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 15(1): 119~122(in Chinese)
- 2 Gao J-X(高吉喜), Ye Q(叶青), Du J(杜鹃), et al. 1997. Study of removing ability of macrophytes to N, P in run-off. *China Environ Sci*(中国环境科学), 17(3): 247~251(in Chinese)
- 3 Han L-J(韩利军), Yang C-W(阳成伟), Ou Z-Y(欧志英). 2002. Progress in biosynthesis pathway and its biological functional of plant carotenoid. *J Biol*(生物学杂志), 19(6): 1~3(in Chinese)
- 4 Herwood CR, Ronald W, Crites E, et al. 1995. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. New York: McGraw-Hill. Inc. 134
- 5 Jiang X-Y(江行玉), Zhao K-F(赵可夫). 2001. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants. *Chin J Appl Environ Biol*(应用与环境生物学报), 7(1): 92~99(in Chinese)
- 6 Li H-S(李合生). 2000. *The Theory and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*. Beijing: Higher Education Press. 167~169(in Chinese)

- 7 Lin Z-F(林植芳), Li S-S(李双顺), Lin G-Z(林桂珠). 1984. The relationship between the decrepitude of leaf of ripe and the enzyme activity of SOD and peroxidation of lipid. *Acta Bot Sin* (植物学报), 26(6):605~615(in Chinese)
- 8 Ma C-C(马成仓). 1998. Hg harm on cell membrane of rape leaf and cell endogenous protection effect. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 9(3):323~326(in Chinese)
- 9 Ouzounidou G. 1994. Copper-induced changes on growth, methal content and photosynthetic function of *Alyssum montanum* plants. *Environ Exp Bot*, 34(2):165~172
- 10 Pan R-C(潘瑞炽). 2001. Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press. 28(in Chinese)
- 11 Patra J, Lenka M, Panda BB. 1994. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to tercury, cadmium and zinc. *New Phytol*, 128:165~171
- 12 Proinok XH. 1981. The Analysis Methods of Biochemistry of Plants. Beijing: Science Press. 197~209
- 13 Reddy KR, Debusk TA. 1987. State of the art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water Sci Technol*, 19(10):61~79
- 14 Ren A-Z(任安芝), Gao Y-B(高玉葆), Liu S(刘爽). 2002. Response of some antioxidation enzymes in *Brassica chinensis* seedlings to Pb^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} and Cr^{6+} stresses. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(4):510~512(in Chinese)
- 15 Tian S-Y(田淑媛), Wang J-F(王景峰), Lang T-Z(朗铁柱), et al. 2000. Waste water treatment by aquatic vaseular bundle and its comprehensive use. *Urban Environ Urban Ecol* (城市环境与城市生态), 13(6):54~56(in Chinese)
- 16 Vera-Estrella R, Hiffins VJ, Blumwald E. 1994. Plant defense response to fungal pathogens: IIG-proteinmediated changes in host plasma membrane redox reaction. *Plant Physiol*, 106:97~102
- 17 Xu Q-S(徐勤松), Shi G-X(施国新), Du K-H(杜开和). 2001. Effect of Cu^{2+} on antioxidase system and ultrastructure of *Ottelia alisoides* (L.). *Rural Ecol-Environ* (农村生态环境), 17(2):30~34(in Chinese)
- 18 Yan C-L(严重玲), Hong Y-T(洪业汤), Fu S-Z(付舜珍). 1997. Effect of Cd, Pb stress on scarenging system of activated oxygen in leaves of tobacco. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 17(5):488~492(in Chinese)
- 19 Zhang T(张彤), Jin H-J(金洪均). 1995. Phytotoxicity evaluation of four pollutants by *Lemna minor* test. *China Environ Sci* (中国环境科学), 15(4):266~271(in Chinese)
- 20 Zhong Y-X(钟云霄), Hu H-Y(胡洪营), Qian Y(钱易). 2003. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control. *Technol Equip Environ Mental Poll Cont* (环境污染治理技术与设备), 4(2):36~40(in Chinese)
- 21 Zhong Y-X(钟云霄), Hu H-Y(胡洪营), Qian Y(钱易). 2004. Growth feature of biomass of *Lemna aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* in medium with nutrient character of waster water. *Environ Sci* (环境科学), 25(6):59~64(in Chinese)
- 22 Zhong Y-X(钟云霄), Hu H-Y(胡洪营), Qian Y(钱易). 2003. Effect of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of duckweed *Lemna aequinoctialis*. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 23(11):2293~2298(in Chinese)
- 23 Zhong Y-X(钟云霄), Hu H-Y(胡洪营), Qian Y(钱易). 2003. Studies on the effect of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of *Spirodela polyrrhiza*. *China Environ Sci* (中国环境科学), 23(4):417~421(in Chinese)
- 24 Zhu G-L(朱广廉), Zhong H-W(钟海文), Zhang A-Q(张爱琴). 1990. Plant Physiology Experimentation. Beijing: Peking University Press. 51~54(in Chinese)

作者简介 涂俊芳,女,1980年生,硕士生.主要从事环境生态学与污染生态学研究. Tel:0553-3869193; E-mail: tujunfang@etang.com

责任编辑 梁仁禄