

铜锌复合污染对铜富集植物大聚藻 抗氧化酶活性的影响

陈柳君¹, 冯海峰¹, 朱雪梅^{1*}, 刘 静¹, 林立金², 梁 欢¹, 蓝焕杰¹, 刘 强¹

(1 四川农业大学 资源环境学院, 成都 611130; 2 雅安水土保持生态环境监测分站, 四川雅安 625000)

摘 要: 以前期筛选的铜富集植物大聚藻为材料, 采用两因素随机区组试验设计, 通过盆栽试验研究了不同浓度铜锌复合污染对大聚藻抗氧化酶活性的影响, 以揭示铜富集植物大聚藻对重金属的耐性机理, 为芦溪河及其它类似污染河流的生态恢复与植被重建提供参考依据。结果表明: (1) 铜锌复合污染条件下, 大聚藻生物量都表现出低促高抑现象。(2) 铜锌复合污染时, 大聚藻 MDA 含量随铜锌浓度升高表现出先升高后降低的变化。(3) 铜锌复合污染对大聚藻抗氧化酶系统活性均有不同程度的影响, 低浓度铜锌复合污染对 SOD(超氧化物歧化酶)、POD(过氧化物酶)和 CAT(过氧化氢酶)有促进作用, 而随浓度的升高则表现出不同的规律。研究发现, 铜锌胁迫下, 大聚藻细胞应急防御系统被启动, SOD、POD 和 CAT 发挥作用, 体内过量自由基及时被清除, 使大聚藻能够保持高的耐性。

关键词: 铜; 锌; 大聚藻; 抗氧化酶; 复合污染

中图分类号: Q945. 79 文献标志码: A

Effect of Cu and Zn Compound Pollution on Antioxidant Enzyme Activity of Cu-enrichment Plant *Myriophyllum aquaticum*

CHEN Liujun¹, FENG Haifeng¹, ZHU Xuemei^{1*}, LIU Jing¹,
LIN Lijin², LIANG Huan¹, LAN Huanjie¹, LIU Qiang¹

(1 College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Ya'an Soil and Water Conservation Monitoring Substation, Ya'an, Sichuan 625000, China)

Abstract: The pre-screening Cu-enrichment plant *Myriophyllum aquaticum* had been used as the experiment material. Through two factor randomized block experiment design, the antioxidant enzyme activity of *M. aquaticum* under different concentrations of Cu and Zn contaminated soil had been conducted by pot experiment. The results indicated that: (1) Under different concentrations of Cu and Zn compound pollution, the biomass of *M. aquaticum* was promoted by the low concentration pollution and inhibited by the high concentration pollution. (2) Under different concentrations of Cu and Zn compound pollution, the MDA content of *M. aquaticum* with the increase of Cu-Zn concentration showed after the first rise to reduce. (3) Different concentrations of Cu and Zn compound pollution played different roles on the activity of antioxidant enzyme system of *M. aquaticum*. The low concentration of Cu and Zn compound pollution improved the activities of SOD, POD and CAT, while the increased concentration of Cu and Zn compound pollution showed different effects on the activities of SOD, POD and CAT. Based on the data reported, under the pressure of the combination of Cu and Zn, *M. aquaticum* cell activate the emergency defense system, then SOD, POD and CAT start to work to removal of excess free radicals in the body in time, so that maintain the high tolerance of *M. aquaticum* under the stress of Cu and Zn. It is possible that *M. aquaticum* is a new

收稿日期: 2014-02-15; 修改稿收到日期: 2014-07-08

基金项目: 四川省科技厅 2008 年科技支撑计划 (2008FZ0180)

作者简介: 陈柳君 (1993—), 女, 在读本科生, 主要从事水土保持及污染生态研究。E-mail: 836435791@qq.com

* 通信作者: 朱雪梅, 博士, 教授, 主要研究方向为污染生态学。E-mail: zhubroad@163.com

material of ecological restoration and reconstruction of vegetation in Luxi river and other similar rivers contaminated by Cu and Zn.

Key words: Cu; Zn; *Myriophyllum aquaticum*; antioxidant enzyme; compound pollution

水体重金属污染已成为目前环境生物学关注的焦点。研究表明,重金属对水生生物会造成不同程度的毒害,严重时甚至造成死亡^[1-2]。重金属污染对水生生物的毒害作用机制之一是使细胞内活性氧(ROS)的产生和消除之间的平衡遭到破坏,形成过量的活性氧,破坏细胞膜系统、脂类、蛋白质和核酸等大分子,诱发机体损害^[3-5]。而在长期进化中,植物为保护自身免受活性氧毒害形成了抗氧化酶系统,主要包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)^[6-7]。这些酶不仅可以清除活性氧,且在细胞各部位都有分布,对维持细胞内活性氧(ROS)的代谢平衡起到重要的作用。

目前,关于重金属胁迫下植物体内活性氧代谢系统的平衡与抗氧化酶活性变化规律的研究虽有报道,但这些研究主要集中在单一污染对一般普通植物影响方面,不能反映重金属复合污染对富集植物抗氧化酶活性的影响^[8-9]。此外,不同重金属胁迫不同植物体导致其抗氧化酶活性的变化没有普适性的规律,还有待完善^[10-12]。本研究前期通过对成都平原污染河流芦溪河河道内的优势草本植物种类的调查和筛选发现,大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)是一种铜富集植物,其根部和地上部对铜的最高富集量分别可达 631.94 和 964.02 mg·kg⁻¹,锌则分别可达 390.32 和 467.16 mg·kg⁻¹;植株对铜的富集系数和转运系数分别为 5.13 和 2.28,而锌分别为 2.74 和 1.63,是一种铜富集植物。鉴于此,本试验以大聚藻为材料,主要研究其根系和叶片中 SOD、POD、CAT 活性对铜锌胁迫的应答反应,旨在初步探索铜富集植物大聚藻对重金属的耐性机理,以期为芦溪河及其它类似污染河流的生态恢复与植被重建提供参考和依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*),为小二仙草科狐尾藻属,多年生挺水或沉水草本,株高 40~70 cm,植株茎上部直立,下部沉水,叶片呈扇形,长度为 10~18 mm,雌雄异株,穗状花序^[13]。供试材料采自成都平原芦溪河,地理坐标为 104°08'28"~104°27'12" E、30°28'57"~30°46'46" N,平均海拔

750 m,多年平均降雨量 974.4 mm,年均气温 15.9 °C,年均日照时数 1 205.7 h,属四川盆地中亚热带湿润气候区,温暖湿润,四季分明,日照较充足。

1.2 试验设计

采用两因素随机区组试验设计,因素一为不同浓度 Cu,分别设置 0(C₀)、100(C₁)、200(C₂)、300(C₃)、400(C₄)和 500(C₅) mg·kg⁻¹ 6 个浓度水平;因素二为不同浓度的 Zn,分别设置 0(Z₀)、100(Z₁)、200(Z₂)和 300(Z₃) mg·kg⁻¹ 4 个浓度水平,共组成 24(6×4) 个处理组合,可分为空白对照(CK, C₀Z₀)、单一铜胁迫、单一锌胁迫及铜锌复合胁迫 4 类,每个处理重复 3 次。

重金属试剂采用分析纯 CuSO₄ 和 ZnSO₄。用 25 cm×20 cm 塑料桶装入过 5 mm 筛的风干土 5 kg,按风干土重加入设计浓度的铜、锌溶液,充分混匀,淹水(蒸馏水)放置 1 个月。

1.3 植株培养与取样

将长势一致的大聚藻幼苗(长度 15 cm 左右)栽植到塑料桶内培养,然后淹水(蒸馏水)至深度 10 cm,每桶均匀栽植 4 株,常规培养方式,培养期间每天早晚调节桶内水位高度。植株培养 60 d 后整株拔起,蒸馏水冲洗干净,用吸水纸吸干表面水分,测定生物量和 MDA 含量及 SOD、POD、CAT 活性。

1.4 指标测定方法

MDA 含量采用三氯乙酸 TCA-硫代巴比妥酸法测定^[14],POD 活性采用愈创木酚法测定^[15],SOD 活性采用 NBT 还原法测定^[15],CAT 活性采用紫外分光光度计法测定^[16]。生物量直接进行烘干称重。

1.5 统计学分析

试验数据均为实验中相应重复数的平均值,用 DPS 6.55 和 SSPS 20.0 软件进行统计分析,用 Excel 2007 作图。

2 结果与分析

2.1 铜锌复合污染对大聚藻单株生物量的影响

由图 1 可知,在单一铜胁迫下,大聚藻单株生物量表现出随铜胁迫浓度增加而先上升后下降的趋势,并在 Z₀C₄ 时达到最大值(24.45 g),且各处理均显著高于 CK(Z₀C₀),处理间大多存在显著差异(P<0.05);在单一锌胁迫下,大聚藻单株生物量随锌

胁迫浓度增加变化不明显,但各处理也不同程度的高于CK;在铜锌复合胁迫下,大聚藻单株生物量随胁迫浓度的增加呈现先上升后下降的趋势,并在Z₁C₄时达到最大值(19.11 g),且各处理间差异达显著水平。与CK相比,铜锌复合胁迫下大聚藻单株生物量均有所增加。通过偏相关分析(表1)可以看出,大聚藻单株生物量与土壤Cu含量的偏相关系数为0.757**,并达极显著正相关水平(P<0.01),而与土壤Zn含量间无显著相关性,并且多元回归方程中Cu的回归系数大于Zn的回归系数,符号也相反。以上结果表明,在铜锌复合污染条件下,大聚藻单株生物量随着Cu浓度增加而显著上升,但随着Zn浓度增加而略有下降,即锌对大聚藻生长有一定的抑制作用但作用不明显,主要表现为Cu的促进作用,Cu与Zn间存在一定的拮抗作用。

2.2 铜锌复合污染对大聚藻MDA含量的影响

图2显示,当单一施加铜胁迫后,大聚藻根系和叶片MDA含量随着铜浓度的增加均表现出显著上

升的趋势,且各处理间差异达显著水平(P<0.05);当单一施加锌胁迫后,大聚藻叶片MDA含量的变化不明显,而大聚藻根系MDA含量随锌浓度的增加表现出先上升后下降的趋势。从铜锌复合处理来看,当锌浓度为100 mg·kg⁻¹(Z₁)时,大聚藻根系和叶片MDA含量都表现为显著上升;当锌浓度为200 mg·kg⁻¹(Z₂)时,大聚藻根系和叶片MDA含量都表现为随铜浓度的增加而先上升后下降的变化,在Z₂C₃时达到最大值,分别为0.31和0.55 nmol·g⁻¹;当锌浓度为300 mg·kg⁻¹(Z₃)时,大聚藻叶片MDA含量随铜浓度增加表现为显著上升趋势,而大聚藻根系MDA含量则表现为先上升后下降的变化,并在Z₃C₃处达最大值(0.28 nmol·g⁻¹)。同时,相比较而言,大聚藻根系MDA含量小于叶片,且各处理间差异显著(P<0.05)。从表1可以看到,大聚藻根系和叶片MDA含量与土壤Cu含量的偏相关系数分别为0.938**和0.757**,并均达极显著正相关水平(P<0.01),且

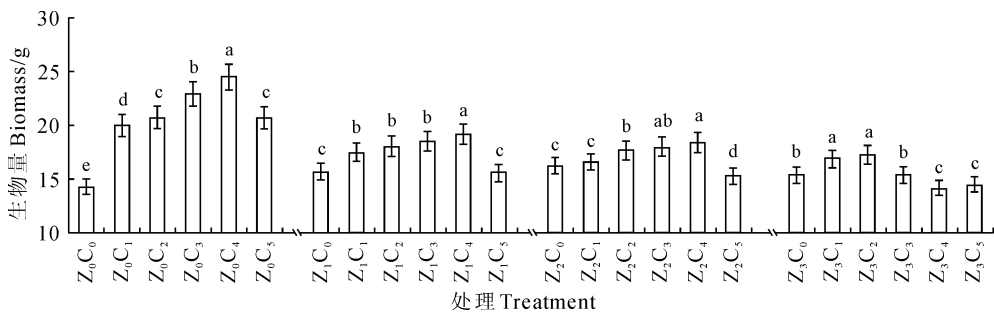


图1 铜锌复合污染下大聚藻单株生物量的变化

C₀~C₅ 分别表示 Cu²⁺ 浓度为 0、100、200、300、400 和 500 mg·kg⁻¹; Z₀~Z₃ 分别表示 Zn²⁺ 浓度为 0、100、200 和 300 mg·kg⁻¹; 不同字母表示相同 Zn 处理下不同 Cu 处理间在 0.05 水平上差异显著;图中数据表示为平均值±标准偏差,n=3;下同

Fig. 1 The biomass per plant of *Myriophyllum aquaticum* under the stress of Cu and Zn

C₀—C₅ stand for 0,100,200,300,400 and 500 mg·kg⁻¹ of Cu²⁺ concentrations;Z₀—Z₃ stand for 0,100,200 and 300 mg·kg⁻¹ Zn²⁺ concentrations, respectively;The different letters are significant difference at 0.05 level compared in the same concentration of Zn²⁺;The value is mean±SD,n=3;The same as below

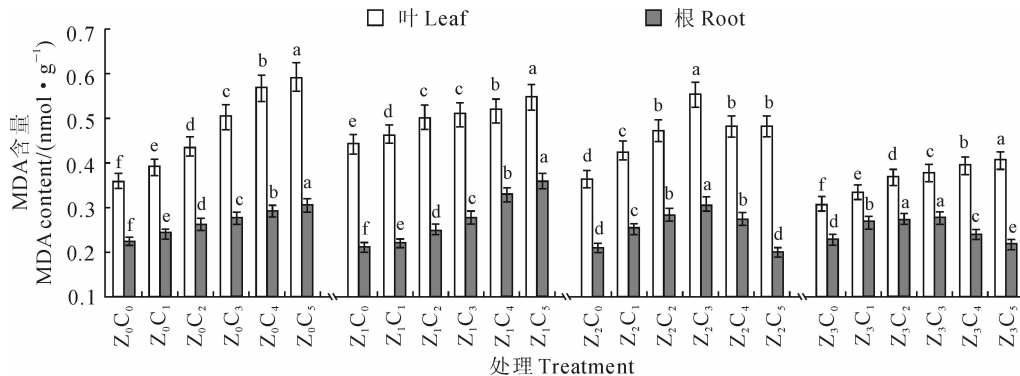


图2 铜锌复合污染下大聚藻MDA含量的变化

Fig. 2 The MDA content of *M. aquaticum* under the stress of Cu and Zn

多元回归方程中 Cu 与 Zn 回归系数的符号相反。以上结果说明,在铜锌复合污染条件下,Cu 对大聚藻根系和叶片 MDA 含量有极显著促进作用,Zn 对大聚藻根系和叶片 MDA 含量具有一定抑制作用但不显著,主要表现为 Cu 促进作用,Cu 与 Zn 间表现出一定的拮抗作用。

2.3 铜锌复合污染对大聚藻 SOD 活性的影响

由图 3 可以看出,铜、锌单一胁迫时,大聚藻根系 SOD 活性随浓度的增加表现出显著下降趋势($P < 0.05$),最小值为 CK(Z_0C_0)的 58.63%;而大聚藻叶片 SOD 活性随浓度的增加整体表现出上升的趋势,并以 Z_0C_5 处理值最大,为 CK 的 127.53%。从铜锌复合胁迫来看,大聚藻根系 SOD 活性随铜锌处理浓度的增加整体表现出先显著上升后下降的趋势,并在 Z_3C_4 处理时达最大值,为 CK 的 160.75%;大聚藻叶片 SOD 活性随处理浓度的上升大体表现出显著上

升的趋势,并在 Z_2C_3 处理达到最大值,其为 CK 的 140.48%;同时,相比较而言,大聚藻根系 SOD 活性小于叶片,且各处理间差异显著。

同时,表 1 的偏相关分析结果表明,大聚藻根系 SOD 活性与土壤 Cu、Zn 含量均呈极显著负相关关系,且从多元回归方程中看到 Cu 与 Zn 间存在协同交互作用;而大聚藻叶片 SOD 活性与土壤 Cu 含量呈显著正相关关系,与土壤 Zn 含量呈显著负相关关系,偏相关系数分别为 0.472 和 -0.459,同时从多元回归方程中看到 Cu 与 Zn 间存在一定的拮抗作用。以上结果表明,在铜锌复合污染条件下,随着铜锌复合浓度的增加,Cu 与 Zn 协同使大聚藻根系 SOD 活性显著上升,即对大聚藻根系 SOD 活性表现出显著的激活作用;而 Cu 对大聚藻叶片 SOD 活性有显著的促进作用,Zn 对大聚藻叶片 SOD 活性有一定的抑制作用。

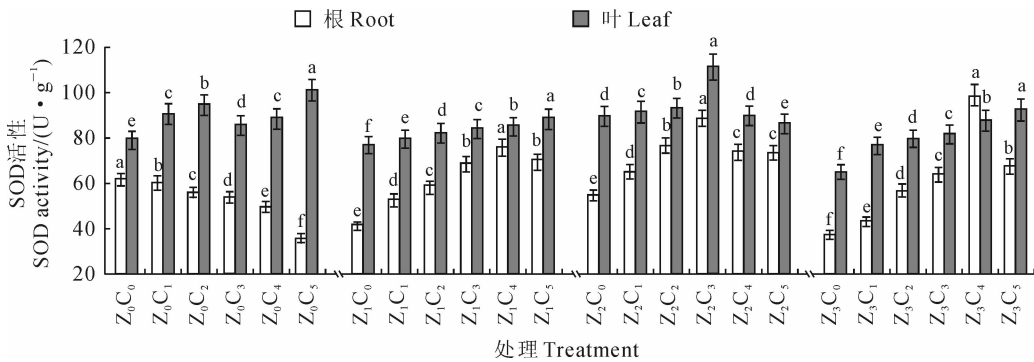


图 3 铜锌复合污染下大聚藻 SOD 活性的变化

Fig. 3 The SOD activity of *M. aquaticum* under the stress of Cu and Zn

表 1 大聚藻的生物量和根叶 MDA 含量以及 SOD、POD、CAT 活性与土壤中 Cu、Zn 含量的多元回归方程

Table 1 The multivariate regression equation of *M. aquaticum* biomass and its root, leaf MDA content and activities of SOD, POD and CAT with Cu and Zn contents in the soil

项目 Item	多元回归方程 Multiple regression equation	决定系数 R^2	偏相关系数 Partial correlation coefficient		
			x_1	x_2	
单株生物量 Biomass per plant	$y = 17.077 + 0.014x_1 - 0.006x_2$	0.728**	0.757**	-0.266	
叶 Leaf	MDA 含量 MDA content	$y = 0.498 + 0.00040x_1 - 0.00043x_2$	0.559**	0.534**	-0.369
	SOD 活性 SOD activity	$y = 84.147 + 0.024x_1 - 0.040x_2$	0.567**	0.472*	-0.459*
	POD 活性 POD activity	$y = 766.457 + 0.320x_1 - 0.622x_2$	0.314*	0.281	-0.312
	CAT 活性 CAT activity	$y = 1.232 + 0.001x_1 + 0.001x_2$	0.532**	0.715**	0.326
	根 Root	MDA 含量 MDA content	$y = 0.234 + 0.00018x_1 - 0.00004x_2$	0.929**	0.938**
SOD 活性 SOD activity		$y = 60.697 - 0.037x_1 - 0.075x_2$	0.582**	-0.692**	-0.744**
POD 活性 POD activity		$y = 604.201 + 0.118x_1 - 0.170x_2$	0.025	0.081	-0.067
CAT 活性 CAT activity		$y = 0.731 - 0.00043x_1 - 0.00069x_2$	0.088	-0.274	-0.256

注: y 表示大聚藻单株生物量和其根、叶 MDA 含量以及 SOD、POD、CAT 活性; x_1 和 x_2 分别表示土壤中 Cu、Zn 含量; ** 和 * 分别表示 0.01 和 0.05 水平的显著相关性。

Note: y expresses *M. aquaticum* biomass and its root, leaf MDA content and activities of SOD, POD and CAT; x_1 and x_2 express Cu and Zn contents in the soil, respectively; ** and * mean significant correlation coefficient at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

2.4 铜锌复合污染对大聚藻 POD 活性的影响

图 4 显示,在单一施铜条件下,大聚藻根系和叶片 POD 活性随铜浓度的增加表现出先上升后下降再升高的趋势,并在 Z_0C_4 时降到最低点,此时根系和叶片 POD 活性分别为 CK(B_0A_0)的 55.84% 和 84.83%;从单一施锌处理来看,随着锌浓度的增加,大聚藻根系和叶片 POD 活性均呈现出先上升后下降的趋势,且分别在 Z_2C_0 时达到最大值。在铜锌复合胁迫下,除个别处理外,大聚藻根系和叶片 POD 活性均随处理浓度的升高而呈现先升高后显著降低再升高的变化趋势,并分别在 Z_1C_4 、 Z_2C_4 、 Z_3C_4 时降到最低点。同时,相比较而言,根系 POD 活性小于叶片,且各处理间差异显著($P < 0.05$)。另外,从表 2 可以看到,大聚藻根系和叶片 POD 活性与土壤 Cu、Zn 含量间无显著相关性,但从多元回归方程回归系数中可知大聚藻叶片 POD 活性的 Cu 与 Zn 间表现出拮抗作用。以上结果表明,在铜锌复合污染条件下,低处理浓度对大聚藻根系和叶片 POD 活性

有促进作用,当铜浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时大聚藻根系和叶片 POD 活性受到显著抑制,随后又表现为促进作用。

2.5 铜锌复合污染对大聚藻 CAT 活性的影响

由图 5 可看出,当单一施铜时,随铜浓度升高,大聚藻根系和叶片 CAT 活性都表现为先下降后上升再下降趋势,特别是根系 CAT 活性对铜浓度更为敏感,其最小值仅为 CK(Z_0C_0)的 29.06%。当单一施锌时,大聚藻根系和叶片 CAT 活性随浓度升高均表现为先下降后上升,而根系 CAT 活性降幅更为明显。从铜锌复合胁迫来看,当施加锌浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Z_1) 时,随着铜浓度升高,大聚藻根系和叶片的 CAT 活性都呈先升高后降低的变化,根系在 Z_1C_2 处达最大值 ($0.99 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$),而叶片在 Z_1C_3 处达最大值 ($1.95 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$);当施加锌浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Z_2) 时,大聚藻叶片 CAT 活性表现出先升高后降低再升高的趋势,而根片则表现为先上升后逐渐下降;当

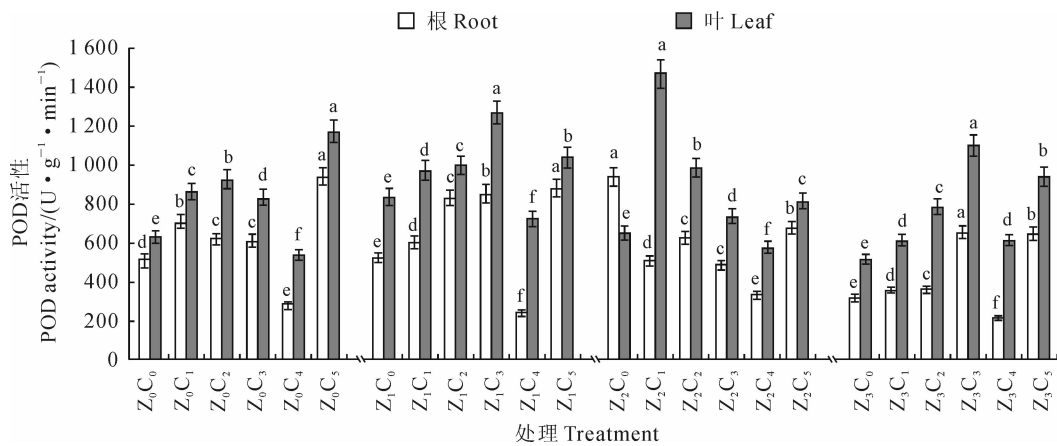


图 4 铜锌复合污染下大聚藻 POD 活性的变化
Fig. 4 The POD activity of *M. aquaticum* under the stress of Cu and Zn

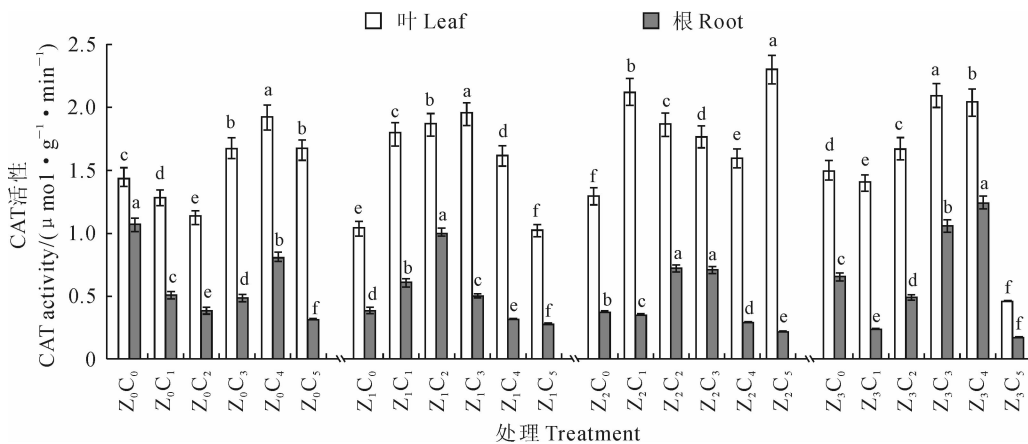


图 5 铜锌污染下大聚藻 CAT 活性的变化
Fig. 5 The CAT activity of *M. aquaticum* under the stress of Cu and Zn

施加锌浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{Z}_3)$ 时,大聚藻根系和叶片 CAT 活性都表现为随铜浓度的升高而先下降后上升再急剧下降的趋势。同时,相比较而言,大聚藻根系 CAT 活性小于叶片,且各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。另外,从表 1 可以看出,大聚藻叶片 CAT 活性与土壤 Cu 含量呈极显著正相关,偏相关系数为 0.715;从回归方程中也不难看出,Cu 与 Zn 间表现出协同交互作用。以上结果表明,除个别处理外,在铜锌复合污染条件下,低处理浓度时 Cu 与 Zn 协同对大聚藻根系和叶片 CAT 活性有一定的促进作用,高处理浓度时大聚藻根系和叶片 CAT 活性受到抑制。

3 讨 论

植物抗氧化酶系统的研究已成为逆境生态的研究热点。大聚藻作为铜富集植物,在重金属富集能力和耐抗性上明显高于普通植物,其对重金属耐性机理的研究显得尤为重要。

低浓度的 Cu、Zn 能在一定程度上促进植物的生长,而过量的 Cu、Zn 则会抑制植物的生长发育,使植物的叶片颜色、形状、大小发生明显的改变,影响根形态特征,显著降低生物量等^[17-19]。本研究表明,在铜锌复合污染条件下,大聚藻生物量都表现出低促高抑的变化,而 Cu 对大聚藻生物量有促进作用,Zn 对大聚藻生物量有抑制作用但不明显,Cu 的促进作用仍占主导地位,Cu 与 Zn 间表现为拮抗作用。且铜锌胁迫下的大聚藻生物量都高于 CK (Z_0C_0),这可能与大聚藻是铜富集植物有关,其具体机理有待进一步研究。

在逆境条件下,植株细胞内活性氧的积累量大于细胞对其的清除速度时,细胞内活性氧含量上升,会造成植物体脂质过氧化伤害^[20]。MDA 是植物细胞膜脂过氧化作用的最终产物,而 SOD、POD、CAT 是清除细胞内活性氧(ROS)的重要酶系。

MDA 对细胞膜具有毒害作用,通过其含量的高低可以用来衡量植物在逆境胁迫下细胞膜脂过氧化的程度大小,以间接鉴定植物细胞膜系统的受损程度及植株对重金属污染的抗性^[21-22]。本研究发现,在铜锌复合污染条件下,大聚藻根系和叶片 MDA 含量随铜锌浓度的升高都表现出先升高后降低的趋势,其受到的毒害作用是由 Cu 造成的,而 Zn 在一定程度上减缓了这种毒害作用。可能原因是,与一般水生植物相比,铜富集植物大聚藻对土壤中 Cu 具有较强的活化和吸收能力,其地上部和地下部

能够富集大量的 Cu,Cu 在植物体内积累达到一定浓度后会对植物产生毒害作用,相比较而言,其对 Zn 的吸收和富集能力较弱,且 Zn 是植物生长的营养元素。

SOD 是最重要的自由基清除酶,能催化超氧阴离子自由基(O_2^-)发生歧化反应,生成 O_2 和 H_2O_2 ,减轻 O_2^- 对植物体的毒害作用^[23]。本研究结果表明,铜锌单一胁迫对大聚藻根系 SOD 活性具有抑制作用,而对其叶片 SOD 活性具有促进作用,铜锌复合胁迫对大聚藻根系和叶片 SOD 活性均有促进作用,说明铜锌复合胁迫比单一胁迫更能促进大聚藻根系和叶片 SOD 活性。大聚藻在铜锌复合污染条件下 SOD 活性整体表现出先升高后降低的趋势,说明大聚藻为保持体内活性氧代谢的平衡能及时调节自身与之相关的系统^[24],防止因重金属铜、锌污染引起的植物体内自由基伤害。而 SOD 降低的原因,可能因为高浓度的铜锌污染可能干扰了其分子结构、改变了其空间结构或产生了大量活性氧自由基超过了保护酶清除范围,SOD 活性低升高抑的结果也进一步验证了前人^[25-26]研究结论。

POD 在植物体内的主要作用是清除 H_2O_2 ,并将其分解为 O_2 和 H_2O ,有效保护细胞免受毒害损伤^[27]。本研究结果表明,大聚藻 POD 活性在铜锌复合污染条件下大体表现出先升高后降低再升高的趋势。通研究我们认为,短时间和低浓度的铜锌污染条件下,大聚藻启动了细胞的防御机制,体内 POD 活性发生了应急性提高,起到了一定的保护作用;但随着铜锌浓度的继续升高,超过了细胞防御系统的保护限度,保护酶活性降低。而后期随着胁迫时间的延长 POD 活性又有所上升,这可能与某种特殊基因的表达^[28]及细胞的衰老化^[29]有关。

CAT 不仅是植物中清除 H_2O_2 的关键酶,而且是植物耐受胁迫所必需的保护酶^[30]。Teisseire 等^[31]用浓度为 $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cu^{2+} 处理小麦幼苗后发现,3 种酶 CAT、POD、POD 活性在一定浓度范围内随 Cu^{2+} 浓度的升高而上升。本研究发现,在铜锌复合污染下,大聚藻 CAT 活性随胁迫浓度升高大体上都表现出先升高后降低的趋势,表明 CAT 在消除 H_2O_2 过程中起重要作用,细胞内 CAT 活性升高可能与铜锌污染因子诱导了大聚藻 CAT 基因的大量表达有关。另一种可能是,在铜锌污染条件下,大聚藻能合成包括有机酸等在内的特殊物质,这些物质的存在有助于稳定 CAT 基因的转录产物或者促进了酶活力提高^[32]。

综上所述,在铜锌复合胁迫下,大聚藻能通过联合增强体内 SOD、POD、CAT 活性以应对铜锌胁迫引起的体内活性氧物质增加,有效减轻所受的过氧化伤害,并保持了生物量的增加,这是大聚藻作为铜富集植物强耐性的表现,可望为芦溪河及其它类似

污染河流的生态恢复与植被重建提供新材料。铜锌复合胁迫更有利于大聚藻抗氧化酶活性的增强也为单一铜或单一锌污染水域的植物修复提供了修复技术的理论参考。

参考文献:

- [1] DENG S P(邓思平), ZHAO Y T(赵云涛), ZHU CH H(朱春华), *et al.* Effect of cadmium on the antioxidant enzyme activity and lipid peroxidation in *Sanguinolaria acuta*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*(水生生物学报), 2012, **36**(4): 689-695(in Chinese).
- [2] XU Q S(徐勤松), SHI G X(施国新), WANG X(王学), *et al.* Generation of active oxygen and change of antioxidant enzyme activity in *Hydrilla verticillata* under Cd Cu and Zn stress[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*(水生生物学报), 2006, **30**(1): 107-112(in Chinese).
- [3] MANIVANNAN P, JALEEL C A, KISHOREKUMAR A, *et al.* Changes in antioxidant metabolism of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. by propiconazole under water deficit stress[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, **57**(1): 69-74.
- [4] SEKI M, UMEZAWA T, URANO K, *et al.* Regulatory metabolic networks in drought stress responses[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2007, **10**(3): 296-302.
- [5] MANIVANNAN P, JALEEL C A, SANKAR B, *et al.* Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, **59**(2): 141-149.
- [6] SHARMA S S, DIETZ K J. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, **14**(1): 43-50.
- [7] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, **7**(9): 405-410.
- [8] JIN C X(金彩霞), ZHOU Q X(周启星), SUN R L(孙瑞莲), *et al.* Cd, bean black soil under cycling stress-the dynamic changes of the enzyme activity in wheat system[J]. *Journal of Environmental Science*(环境科学学报), 2006, **26**(4): 632-639(in Chinese).
- [9] RIFFAT A F, MASOOD A. Certain antioxidant enzymes of *Allium cepa* as biomarkers for the detection of toxic heavy metals in wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **346**(15): 256-273.
- [10] BOOMINATHAN R, DORAN P M. Cadmium tolerance and antioxidative defenses in hairy roots of the cadmium hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens*[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **83**(2): 158-167.
- [11] Z HANG J, YU P, YANG B, *et al.* Comparative analysis on cadmium tolerance and antioxidant enzymatic activities of two *Viola* species[J]. *Agricultural Basic Science and Technology*, 2011, **12**(8): 1 195-1 198, 1 216.
- [12] LU Y(鲁艳), LI X R(李新荣), HE M ZH(何明珠), *et al.* Effects of Ni and Cu on antioxidative enzymes in *Peganum harmala*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报), 2012, **21**(3): 147-155(in Chinese).
- [13] 钟观光, 秦仁昌, 王启无, *等.* 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 103-104.
- [14] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980: 67-69.
- [15] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [16] 张志良. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [17] XU J(徐劼), YU M G(于明革), CHEN Y X(陈英旭), *et al.* Distribution of lead in tea tree and chemical characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*(应用生态学报), 2011, **22**(4): 891-896(in Chinese).
- [18] TANG Y T(汤叶涛), WU Y D(吴好都), QIU R L(仇荣亮), *et al.* *Picrisdivaricata* Vant. absorption and accumulation characteristics of Zn[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(4): 1 823-1 830(in Chinese).
- [19] HU F J(胡方洁), ZHANG J(张健), YANG W Q(杨万勤), *et al.* Pb stress on *Toonaciliata* Roem growth and enrichment characteristics[J]. *Agricultural Journal of Environmental Science*(农业环境科学学报), 2012, **31**(2): 284-291(in Chinese).
- [20] HU Y H(胡一鸿). Cu, Zn, Cr on rice seedling of antioxidant enzymes[J]. *Anhui Agricultural Science*(安徽农业科学), 2010, **38**(5): 2 283-2 284(in Chinese).
- [21] KHATUM S, ALI M B, HAHN E J, *et al.* Copper toxicity in *Withania somnifera*: growth and antioxidant enzymes responses of *in vitro* grown plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **64**: 279-285.
- [22] HAN H J(韩红江), TIAN Q(田琴), LI W P(李维平). Effect of lead stress on photosynthetic characteristics and the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling[J]. *Journal of Shihezi University*(Nat. Sci. Edi.)(石河子大学学报·自然科学版), 2012, (30): 18-22(in Chinese).
- [23] LIMON P, GONSEBATT M E. The role of antioxidants, antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2009, **674**: 137-147.
- [24] 杨远祥. 小鳞苔草铅锌富集特性及生理机制初步研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
- [25] YIN H X(殷恒霞), LI X(李健), *et al.* Effects of cadmium, zinc and copper-induced stresses on the early seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*(植物遗传资源学报), 2009, **10**(2): 290-294(in Chinese).
- [26] HUANG W X(黄五星), GAO J Q(高境清), *et al.* Bioaccumulation and physiological response to cadmium, zinc and copper stress in *Phytolacca acinosa*[J]. *Environmental Science and Technology*(环境科学与技术), 2010, **33**(1): 77-79(in Chinese).
- [27] CHEN S Y. Lipid peroxidation of plant cell damage[J]. *Plant Physiology Communications*, 1991, **27**(2): 84-90.
- [28] BLINDA A, ABOU-MANDOUR A, *et al.* Heavy metal-induced changes in peroxidase activity in leaves, roots and cell suspension cultures of *Hordeum vulgare* L. [M]//OBINGER C U. Plant Peroxidases: Biochemistry and Physiology, University of Geneva, 1996: 374-379.
- [29] YAN C L, FU S Z, FANG C H, *et al.* Effect of Hg, Cd and their interaction on chlorophyll content and antioxidant enzyme systems in leaves of tobacco[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, **21**(5): 468-473.
- [30] SHAH K, KUMAR R G, VERMA A, *et al.* Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, **161**: 1 135-1 144.
- [31] TEISSIRE H, VERMET G. Cu-induced changes in antioxidant enzymes activities in fronds of duckweed (*Lemna minor*)[J]. *Plant Science*, 2000, **153**: 65-72.
- [32] LOMBARDI L, SEBASTIANI L. Copper toxicity in *Prunus cerasifera*: growth and antioxidant enzymes responses of *in vitro* grown plants[J]. *Plant Science*, 2005, **168**: 797-802.