

# 稀土铈 ( $\text{Ce}^{3+}$ )、钕 ( $\text{Nd}^{3+}$ ) 对水花生叶片 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害效应的影响

陈苏雅

(南京师范大学科技处, 江苏 南京 210046)

[摘要] 研究了不同浓度  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  对水花生 (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.) 叶片  $\text{Cu}^{2+}$  毒害的影响. 结果表明, 在  $\text{Cu}^{2+}$  毒害下, 水花生的叶绿素和可溶性蛋白含量下降, 保护酶系统 (POD、SOD、CAT) 活性降低,  $\text{O}_2^-$  产生速率和膜脂过氧化产物 MDA 含量上升,  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量降低, 一定浓度 (2.5~7.5 mg/L) 的  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理, 都能不同程度地缓解这些现象. 而更高浓度的  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理的缓解作用不断减弱, 甚至加重  $\text{Cu}^{2+}$  毒害. 相比之下, 单一  $\text{Ce}^{3+}$  的作用效果优于单一  $\text{Nd}^{3+}$ . 总的看来,  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  的最适浓度为 5~7.5 mg/L.  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  缓解重金属毒害的作用可能与调节蛋白质的表达及活性氧代谢有关.

[关键词]  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、水花生、毒害、缓解

[中图分类号] S555+.9 Q945.78 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2009)01-0099-06

## Toxic Effect of $\text{Cu}^{2+}$ on *Alternanthera philoxeroides* Alleviated by Different Concentration of $\text{Ce}^{3+}$ and $\text{Nd}^{3+}$

Chen Suyu

(Department of Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract** *Alternanthera philoxeroides* were cultivated in solution of 2 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  and different concentration of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$  for 7 days to investigate the action of rare earths on the toxic effect of heavy metal. Results show that under the low concentration of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$ , the content of chlorophyll, soluble protein and  $\text{H}_2\text{O}_2$ , the activity of protective enzymes (SOD, POD, CAT) are higher than that of single Cu treatment, the accumulation of MDA and the  $\text{O}_2^-$  generating rate are less compared with Cu poison. However, with higher concentrations of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$ , the relieving effect is getting weaker and weaker, even aggravates the toxic effect. Generally, the optimum concentration of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$  is 5~7.5 mg/L for *Alternanthera philoxeroides*, and  $\text{Ce}^{3+}$  is better than  $\text{Nd}^{3+}$ . The expression of protein and metabolism of active oxygen are responsible for the relieving effect mentioned above.

**Key words**  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., toxic effect, relieve

一定浓度的稀土元素 (rare earths简称 RE)对作物生长有一定的刺激作用,能提高根系和幼苗的干、鲜重,促进种子萌发和幼苗根系增长<sup>[1,2]</sup>.同时,越来越多的研究成果表明,稀土元素对增强植物耐低温<sup>[3]</sup>、高温<sup>[4]</sup>、抗病<sup>[5]</sup>、抗旱<sup>[6]</sup>等方面有明显作用,而对抗重金属毒害方面的报道较少<sup>[7]</sup>.

本文以广布性的水生植物水花生 (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)为实验材料,以重金属  $\text{Cu}^{2+}$ 作为毒害因子,初步研究了稀土元素  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对  $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片的光合色素含量、保护酶系统活性、活性氧含量、膜脂过氧化产物等的影响,以探讨稀土元素促进水生植物生长、增强其抗逆性和缓解重金属毒害的作用机制,为水环境污染的管理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

水花生采自南京市江心洲,2008年5月上旬采集后置于大缸中,用自来水预培养3d,取长势一致的

收稿日期:2008-09-18

通讯联系人:陈苏雅,硕士,研究方向:科技管理及重金属毒害. E-mail: suyabeckham@yahoo.com.cn

植株, 移入 2 000 mL 玻璃缸中, 根据预实验的结果, 各实验组标号如下: (0) 蒸馏水培养对照组 (CK); (1) 2 mg/L( $\text{Cu}^{2+}$ ), 即单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理组; (2) 2+ 2.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ ); (3) 2+ 5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ ); (4) 2+ 7.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ ); (5) 2+ 10 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ ); (6) 2+ 2.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ ); (7) 2+ 5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ ); (8) 2+ 7.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ ); (9) 2+ 10 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ ).

上述的 2~ 5 组为  $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$  处理组, 6~ 9 组为  $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$  处理组. 在 Foma Scientific 光照培养箱中培养 (光周期: 12 h/12 h 温度: 25℃ /18℃, D/N), 7 d 后, 取每株倒数 3~ 5 片叶, 蒸馏水洗净, 吸干, 测定生理生化指标. 实验重复 3 次, 取平均值.

试剂: 氯化亚铈 ( $\text{CeCl}_3$ )、氯化钕 ( $\text{NdCl}_3$ ) 购于南京生兴生物技术有限公司;  $\text{CuSO}_4$  为上海浦江化工厂产品 (AR); 考马斯亮蓝 G- 250 为 Fluka 公司产品; 标准牛血清蛋白 (BSA) 为上海生工生物工程有限公司产品 (AR).

1.2 实验方法

1.2.1 叶绿素含量的测定

按照 Arnon 的方法进行测定<sup>[8]</sup>, 单位: mg/g

1.2.2 可溶性蛋白含量的测定

采用 Bradford 考马斯亮蓝 G- 250 法测定<sup>[9]</sup>. 用 754 型分光光度计, 在 620 nm 下测定吸光值, 以牛血清白蛋白 (BSA) 为标准蛋白. 单位: mg/g

1.2.3 POD 活性的测定

愈创木酚法<sup>[10]</sup>, 单位  $\Delta A_{470 \text{ nm}} / (\text{min/g})$ .

1.2.4 SOD 活性的测定

化学比色法, 按从南京建成生物工程研究所购买的试剂盒顺序测定, 单位 U/g 以 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个亚硝酸盐单位 (NU).

1.2.5 CAT 活性的测定

可见光分光光度法, 按从南京建成生物工程研究所购买的试剂盒顺序测定, 单位 U/g 以每毫升样品每秒分解  $1 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2$  的量为一个活力单位 (U).

1.2.6  $\text{O}_2^-$  产生速率的测定

可见光分光光度法, 按从南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定, 单位 U/g 以每毫升样品在 37℃ 下反应 1 min, 使反应体系中  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度降低 1 mmol/L 为一个活性氧单位 (U).

1.2.7  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量的测定

分光光度法, 按从南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定, 单位 mmol/g

1.2.8 MDA 含量的测定

依据 Heath 和 Parker 的硫代巴比妥酸 (TBA) 比色法<sup>[11]</sup>, 单位 mmol/g

1.3 数据处理

实验数据以统计分析软件 SPSS 作不同处理间的差异显著性分析, 以  $P < 0.05$  为差异显著.

2 结果与分析

2.1 不同浓度的  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  对  $\text{Cu}^{2+}$  毒害下水花生叶片形态的影响

$\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  对  $\text{Cu}^{2+}$  毒害下水花生叶片形态的影响如表 1 所示.

由表 1 可见, 单一  $\text{Cu}^{2+}$  毒害组处理 7 d 后, 水花生叶片呈深褐色, 毒害严重. 单一  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理基本都能不同程度的缓解这种毒害, 分别以 7.5 mg/L 的  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Nd}^{3+}$  处理后, 叶片破坏程度明显减轻, 仅表现为部分叶片失绿, 都有最好的效果. 过高或过低

表 1 不同浓度  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  对  $\text{Cu}^{2+}$  毒害下水花生叶片形态的影响  
Table 1 Morphologies of *Alternanthera phibxeroides* leaves under  $\text{Cu}^{2+}$  stress at different  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$  concentration

处理组号	处理浓度	叶片形态
0	CK	叶片翠绿 Normal
1	2mg/L( $\text{Cu}^{2+}$ )	叶片呈深褐色 Rot
2	2+ 2.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ )	叶片呈深褐色 Rot
3	2+ 5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ )	叶片有黄褐斑 Chlorosis
4	2+ 7.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ )	叶片褪绿 Chlorosis
5	2+ 10 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$ )	叶片有黄褐斑 Chlorosis
6	2+ 2.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ )	叶片有深褐色斑块 Brown
7	2+ 5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ )	叶片有深褐色斑块 Brown
8	2+ 7.5 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ )	叶片有黄褐斑 Chlorosis
9	2+ 10 mg/L( $\text{Cu}^{2+} + \text{Nd}^{3+}$ )	叶片有深褐色斑块 Brown

浓度的稀土都达不到此效果. 因此, 一定浓度的单一  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理均可以缓解  $\text{Cu}^{2+}$  对水花生的毒害.

## 2.2 不同浓度的 $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片中叶绿素含量的影响

由图 1 看出: 与对照相比, 单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理降低了叶绿素含量, 为正常值的 62.10%. 而施用  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  后的叶绿素含量总体上均高于单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理, 随着稀土元素处理浓度的加大, 叶绿素含量呈先升后降的趋势, 且 2 个处理组都在 7.5 mg/L 时, 达到最大值. 其中,  $\text{Ce}^{3+}$  处理时叶绿素含量高于单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理 29.7%,  $\text{Nd}^{3+}$  处理则使之增加了 15.3%. 一定浓度的单一  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理能减轻  $\text{Cu}^{2+}$  毒害对叶绿素的降解.

## 2.3 不同浓度的 $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片中可溶性蛋白含量的影响

实验结果表明 (图 2), 单一  $\text{Cu}^{2+}$  的毒害使得水花生的可溶性蛋白含量大大低于对照组, 而  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理组的可溶性蛋白含量明显高于单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理. 随着处理浓度的提高,  $\text{Ce}^{3+}$  处理组与  $\text{Nd}^{3+}$  处理组可溶性蛋白含量的变化趋势也不完全相同,  $\text{Ce}^{3+}$  处理组可溶性蛋白含量呈下降的趋势, 而  $\text{Nd}^{3+}$  处理组的可溶性蛋白含量则呈现出先升后降的趋势, 在 5 mg/L 时达到最大值. 2.5 mg/L  $\text{Ce}^{3+}$  处理的蛋白含量为单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理的 179.6%, 5 mg/L 处理的蛋白含量为单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理的 135.3%. 可知, 一定浓度范围内的  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Nd}^{3+}$  促进了蛋白的合成, 能缓解  $\text{Cu}^{2+}$  毒害造成的蛋白降解效应.

## 2.4 不同浓度的 $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片中保护酶系统活性的影响

### 2.4.1 POD 活性的变化

在重金属  $\text{Cu}^{2+}$  的毒害下, 水花生的 POD 酶活性急剧下降, 只有正常条件下的 46.2%, 加入 2 种稀土元素后, 其 POD 活性有明显的提高, 基本随着稀土元素作用浓度的升高呈现为先升后降的趋势 (图 3), 其中,  $\text{Nd}^{3+}$  处理组比  $\text{Ce}^{3+}$  处理组变化趋势浮动更大.  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理组的最大值分别出现在 7.5 mg/L 和 5 mg/L 处理浓度处, 分别比单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理组高出 83% 和 108.0%.

### 2.4.2 SOD 活性的变化

由图 4 可知, 单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理的 SOD 酶活性比正常生长条件明显下降, 这说明 SOD 受到了一定破坏, 其含量或者活性有明显降低, 而稀土元素处理组的 SOD 酶活性有了不同程度的提高, 都在 7.5 mg/L 时达到最大值, 分别高出单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理 54.3% 和 8.3%. 与  $\text{Nd}^{3+}$  处理组相比,  $\text{Ce}^{3+}$  处理组的作用效果更加明显.

### 2.4.3 CAT 活性的变化

水花生在受到  $\text{Cu}^{2+}$  毒害时, CAT 活性下降幅度极大, 只有对照的 31.2%, 而稀土元素  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  对提高 CAT 活性有很突出的作用. 从图 5 可知,  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理的 CAT 活性均高于单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理, 其中,  $\text{Ce}^{3+}$  处理组的变化幅度较大, 而  $\text{Nd}^{3+}$  则较为缓和.  $\text{Ce}^{3+}$  处理组在 7.5 mg/L 时达到峰值, 是单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理的 466.4%,  $\text{Nd}^{3+}$  处理组在 5 mg/L 时达到最大值, 为其 263.0%.

## 2.5 不同浓度的 $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片中活性氧含量的影响

### 2.5.1 $\text{O}_2^-$ 产生速率

加入  $\text{Cu}^{2+}$  后, 水花生  $\text{O}_2^-$  的产生速率急速增加, 比对照组高 153.0%, 加入稀土元素后, 其产生速度明显降低, 但不同稀土元素, 不同浓度作用效果不同: 二者都在 7.5 mg/L 时达到最小值, 其中,  $\text{Ce}^{3+}$  处理组为单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理的 52.5%,  $\text{Nd}^{3+}$  处理组为 50.1%. 两处理组比较来看,  $\text{Nd}^{3+}$  处理组变化趋势较为和缓, 处理效果更稳定.

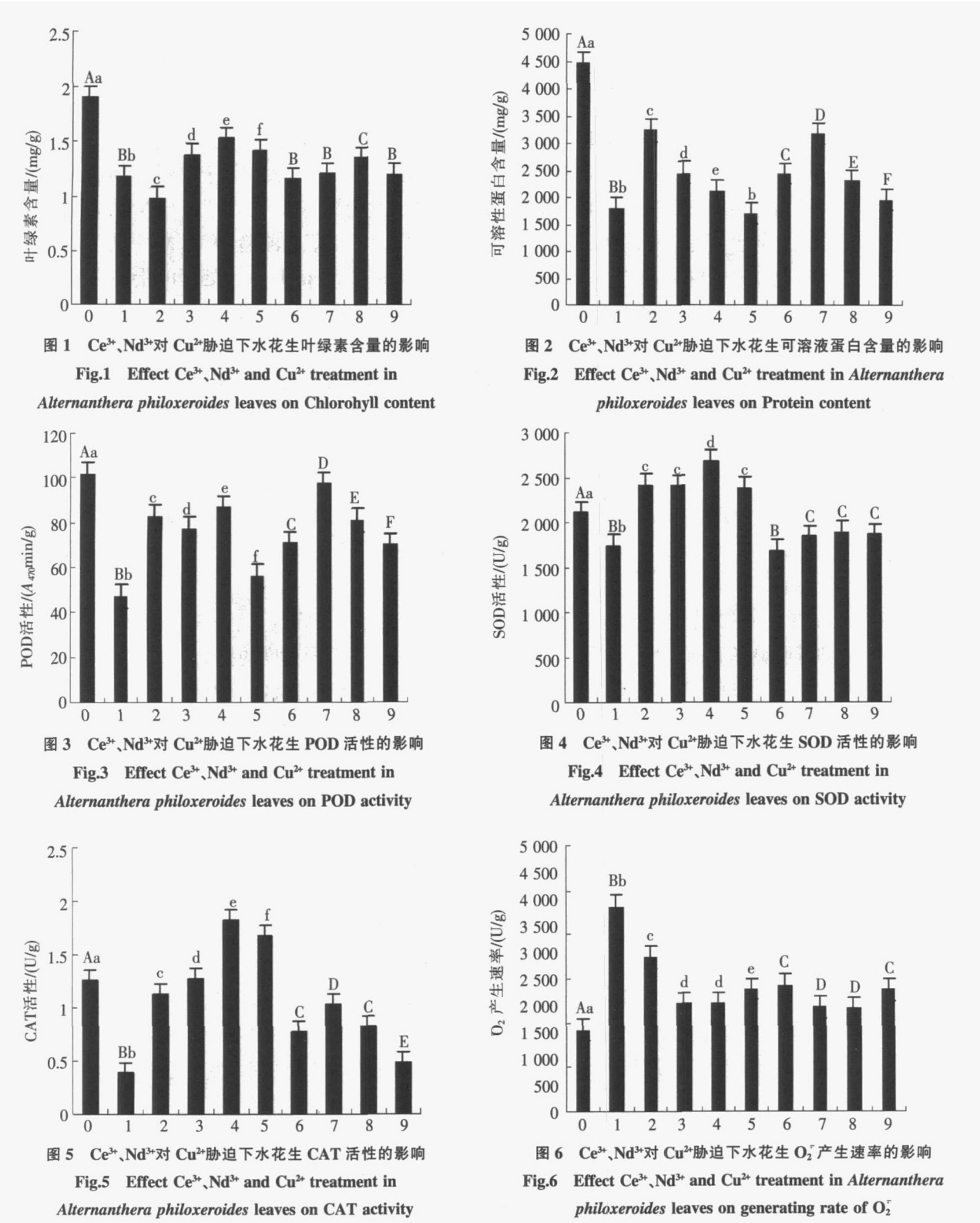
### 2.5.2 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量

从图 7 可见, 在受到  $\text{Cu}^{2+}$  毒害时, 水花生叶片中的  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量会明显下降, 降幅达 28.5%, 一定浓度的稀土元素, 则对此有很强的缓解作用.  $\text{Ce}^{3+}$  和中等浓度的  $\text{Nd}^{3+}$  (5~7.5 mg/L) 处理都能明显提高  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量. 在  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  处理组中,  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量在稀土元素作用浓度上升的过程中, 呈先升后降的趋势. 5 mg/L  $\text{Ce}^{3+}$  处理的  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量高于单一  $\text{Cu}^{2+}$  处理 45.3%, 7.5 mg/L  $\text{Nd}^{3+}$  处理则高出 69.0%.

## 2.6 不同浓度的 $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 对 $\text{Cu}^{2+}$ 毒害下水花生叶片中 MDA 含量的影响

作为膜脂过氧化产物, MDA 是细胞膜受伤害程度的重要指标之一. 由图 8 可知, 2 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  的作用, 使水花生的 MDA 含量提高了 44.78%, 说明此时水花生的膜脂过氧化程度加剧, 破坏严重, 而稀土元素的

作用,使得MDA的含量有所降低.  $Ce^{3+}$  和  $Nd^{3+}$  处理基本都能减少MDA含量,  $Nd^{3+}$  处理组变化趋势起伏较大, 10mg/L处理时,已无缓解作用. 5mg/L的  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  浓度都最大程度的缓和MDA含量增加的趋势,其中,  $Ce^{3+}$  使之比单一  $Cu^{2+}$  处理减少了43.8%,  $Nd^{3+}$  减少了41.6%.



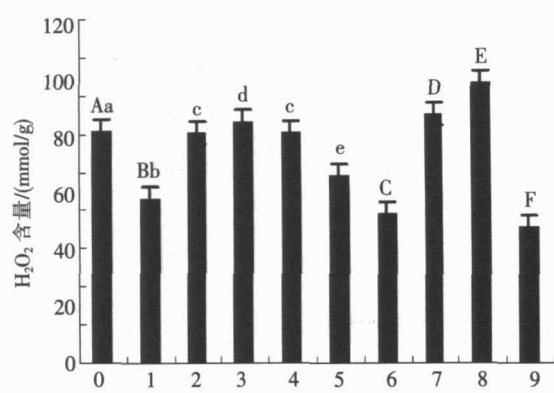


图7  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$ 对  $Cu^{2+}$ 胁迫下水花生  $H_2O_2$  含量的影响

Fig.7 Effect  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  and  $Cu^{2+}$  treatment in *Alternanthera philoxeroides* leaves on  $H_2O_2$  content

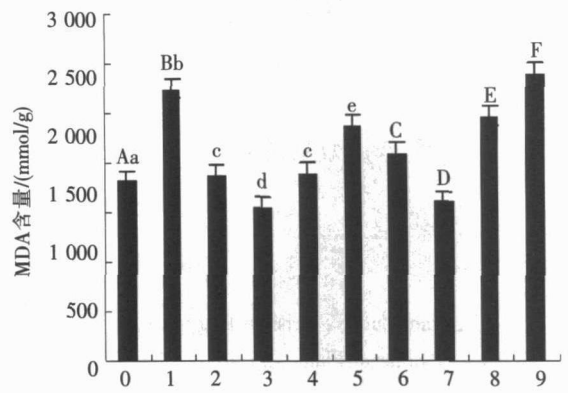


图8  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$ 对  $Cu^{2+}$ 胁迫下水花生 MDA 含量的影响

Fig.8 Effect  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  and  $Cu^{2+}$  treatment in *Alternanthera philoxeroides* leaves on MDA content

图 1~ 8 的处理浓度:

- 0 CK; 1 2mg/L( $Cu^{2+}$ ); 2 2+2.5mg/L( $Cu^{2+} + Ce^{3+}$ ); 3 2+5mg/L( $Cu^{2+} + Ce^{3+}$ );  
4 2+7.5mg/L( $Cu^{2+} + Ce^{3+}$ ); 5 2+10mg/L( $Cu^{2+} + Ce^{3+}$ ); 6 2+2.5mg/L( $Cu^{2+} + Nd^{3+}$ );  
7 2+5mg/L( $Cu^{2+} + Nd^{3+}$ ); 8 2+7.5mg/L( $Cu^{2+} + Nd^{3+}$ ); 9 2+10mg/L( $Cu^{2+} + Nd^{3+}$ )

图上字母不同表示差异显著  $P < 0.05$

### 3 讨论

叶绿素是光合作用的主要色素, 叶绿素的破坏与降解会直接导致光合作用效率的降低. 重金属污染导致叶绿素含量下降, 其原因主要是重金属离子抑制叶绿素酸酯还原酶和影响氨基- $\gamma$ -戊酮酸的合成<sup>[12]</sup>, 也与重金属离子直接破坏叶绿体结构及功能和干扰植物对 Fe、Zn 的吸收有关<sup>[13]</sup>. 本实验中,  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  处理组的叶绿素含量高于单一  $Cu^{2+}$  处理组, 这说明, 一定浓度的  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  都能缓解重金属离子对于叶绿素的破坏作用, 但是这种缓解作用随着处理浓度的上升而有所减弱, 说明高浓度的稀土元素对重金属污染的缓解能力不断减弱, 甚至加重污染. 有研究表明, 稀土离子是通过促进叶绿体蛋白质的合成或者是延缓叶绿体衰老, 从而提高叶绿素含量<sup>[14]</sup>. 另外, 稀土离子与叶绿体色素的结合, 可能加强了光合色素对光的捕获能力, 或者是提高了叶绿体中的二磷酸核酮糖羧化加氧酶的活性, 从而提高对  $CO_2$  的同化作用, 最终表现为较高的光合能力<sup>[15]</sup>.

重金属毒害下, 蛋白质含量下降的主要原因是由于重金属影响氨基酸的形成造成的<sup>[16]</sup>: 一是重金属进入酶的活性中心, 与部分基团结合, 破坏酶结构, 毒害加强其分解; 二是抑制新蛋白质的合成<sup>[17]</sup>, 最终导致蛋白质含量的降低. 实验表明,  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  都能明显提高  $Cu^{2+}$  毒害下植物体内可溶性蛋白含量. 也有研究认为, 稀土元素是从转录水平提高了 rRNA (异戊烯基嘌呤) 的水平, 从而促进了叶绿素和蛋白质的合成<sup>[18]</sup>, 增强植物抗毒害的能力. 而高浓度稀土可与 ATP 形成络合物, 从而抑制己糖激酶的催化反应而使糖酵解受阻, 导致质膜通透性增大, 电解质和细胞质外渗, 从而降低和破坏植株的抗逆、抗病能力<sup>[19]</sup>.

POD、SOD、CAT 等是植物体内抗氧化酶系统中几种主要的保护酶. 植物体内的保护酶系统的抗毒害能力是决定植物对逆境胁迫响应特征的关键因素. SOD 催化由  $O_2^-$  合成  $H_2O_2$  的反应, CAT 和 POD 则是负责清除其它的氧自由基<sup>[20]</sup>. 由本实验可见, 在重金属离子的作用下, 这三种保护酶的活性受到抑制,  $H_2O_2$  含量下降, 而  $O_2^-$  产生速率以及膜脂过氧化产物 MDA 的含量则逐渐增加, 从而使得植物体清除活性氧的能力减弱, 膜脂过氧化程度加剧. 加入稀土元素之后, 各项生理指标的变化趋势均有不同程度的缓解. 这主要是由于, 一方面是稀土元素提高了 SOD 和 CAT 的活性而消除了自由基; 另一方面, 稀土离子直接参与了消除  $O_2^-$ , 生成  $H_2O_2$  的作用, 以保护生物膜不被逆境破坏<sup>[21]</sup>. 一些研究认为, 稀土离子能取代  $Ca^{2+}$  在细胞膜上的位置, 并在一定条件下产生与  $Ca^{2+}$  相似的作用, 这对维持细胞膜的稳定性及对养分的吸收、运转均起了一定的促进作用<sup>[22]</sup>. 同时, 在各稀土元素处理组中, 从减轻毒害的程度和作用的稳定性来看,  $Ce^{3+}$  的作用效果要优于  $Nd^{3+}$ , 但高浓度的  $Ce^{3+}$  和  $Nd^{3+}$  处理都会加重重金属毒害的效果.

总的来说,稀土元素  $Ce^{3+}$ 、 $Nd^{3+}$  都能在一定程度上减缓  $Cu^{2+}$  对叶绿素与可溶性蛋白的破坏,提高植物体内保护酶系统的活性,减少活性氧的产生或含量,减缓膜脂过氧化进程,抑制 MDA 的积累,从而提高植物体抵抗重金属毒害的能力。且  $Ce^{3+}$  的缓解效果好于  $Nd^{3+}$ , 其中  $7.5\text{ mg/L } Ce^{3+}$  作用效果最为明显,  $Nd^{3+}$  则是  $5\text{ mg/L}$  作用效果最为明显。

# [参考文献]

- [1] Wahid P, Kanakam N, Krishna Prabhu R, et al. Rare earth element fluxes in diverse soils and their absorption by coconut palm[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(7), 1427-1439.
- [2] Zeng F, Tian H E, Wang Z, et al. Effect of rare earth element europium on anarathin synthesis in anarathus caudatus seedlings[J]. Biological Trace Element Research, 2003, 93(1/3), 271-182.
- [3] 郭伯生,竺伟民,熊炳昆. 农业中的稀土[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988, 5-64.
- [4] 邵红建,常江,张自立,等. 稀土在植物抗逆中的生理作用[J]. 中国稀土学报, 2003, 10(2): 487-490.
- [5] 章健,刘庆都,承河元. 稀土积累对植物病原细菌生长的影响[J]. 稀土, 1997, 18(4): 50.
- [6] 洪建明,邱泽生. 植物抗性生理(二)[J]. 生物学通报, 1997, 32(6): 6-8.
- [7] 王春涛,施国新,徐勤松,等. 外源钼减轻了重金属镉对苜蓿的毒害作用[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(6): 821-824.
- [8] Amon D I. Copper enzyme in isolated chloroplasts polyphenol oxidase in beta vulgaris[J]. Plant Physiol, 1949, 24: 1-15.
- [9] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantity of protein dye binding[J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248-254.
- [10] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990, 88-91, 154-155.
- [11] 赵亚华,主编. 生物化学实验技术教程[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000, 28-29.
- [12] Stobart A K, Griffiths W T. The effect of  $Cd^{2+}$  on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley[J]. Physiol Plant, 1985, 63: 293-298.
- [13] 王焕校. 污染生态学基础[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1990, 71-148.
- [14] 斯琴巴特尔,乌宁. 稀土对胡麻的生物学效应研究[J]. 稀土, 2003, 21(1): 33-36.
- [15] 方能虎,何友昭,赵贵文. 稀土元素的植物生理作用研究进展[J]. 稀土, 1998, 19(5): 66-70.
- [16] Spaulding B P. Effect of divalent metal chlorides on respiration and extractable enzymatic activities of Douglas fir needle litter[J]. J Environ Qual, 1979, 8: 105-109.
- [17] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases[J]. Plant Physiol, 1993, 101: 7-12.
- [18] 陈靠山,张举仁,彭正华.  $NdCl_3$  对油菜离体子叶生长和 PA 水平的影响[J]. 中国稀土学报, 1996, 14(4): 379-381.
- [19] Morrison J F, Cleland W W. Lanthanide-adenosines 5'-triphosphate complexes: determination of their dissociation constants and mechanism of action as inhibitors of yeast hexokinase[J]. Biochem, 1983, 22(24): 5507-5510.
- [20] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases[J]. Plant Physiol, 1993, 101: 7-12.
- [21] Brogardh T, Johnsson A. Effects of Magnesium, Calcium and Lanthanum ions on stomatal oscillations in Avena sativa L[J]. Planta, 1975, 124: 99-103.
- [22] 杨燕生,刘德龙,白娟,等. 镉对小麦幼苗素质、蛋白质及钙调素水平的影响[J]. 稀土, 1997, 18(2): 61-63.

[责任编辑: 孙德泉]