

稀土元素铈缓解镉对菱叶的毒害效应研究*

罗玉明^{1,2} 保曙琳² 秉中² 亦余^{2†} 杨晋彬¹

(1 淮阴师范学院生物系, 江苏淮安 223300)

(2 南京师范大学生命科学学院, 南京 210097)

摘要 利用不同浓度的 Cd^{2+} 和不同浓度的 Cd^{2+} 加 $5\text{ mg L}^{-1} Ce^{3+}$ 分别处理菱植株, 对菱叶中的叶绿素、脯氨酸、保护酶——超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的动态变化进行了研究。实验结果表明: 在镉胁迫下, 随着镉浓度的上升($0\sim 4\text{ mg L}^{-1}$)菱叶中叶绿素含量下降, SOD、POD 活性和脯氨酸含量在镉低浓度时上升而高浓度时下降, 相反, CAT 活性在镉低浓度时下降而高浓度时上升。与镉离子单一处理相比, $Cd^{2+}-Ce^{3+}$ 复合处理中的 Ce^{3+} 可提高叶片中叶绿素的含量和 SOD、POD 的活性, 尤其是在 $1\text{ mg L}^{-1} Cd^{2+}$ 加 $5\text{ mg L}^{-1} Ce^{3+}$ 复合处理中, POD 活性较对照提高了 8.33 倍。由此表明, $5\text{ mg L}^{-1} Ce^{3+}$ 对低浓度镉引起菱叶片的毒害作用有较为明显的缓解效果。

关键词 稀土元素; 铈; 缓解; 镉胁迫; 菱; 酶

中图分类号 X503.23 文献标识码 A

“三废”的无序排放、矿产的泛滥开发, 使得水体的重金属污染日益加剧。具有致癌、致突变、致畸作用的重金属镉污染尤其受到众多学者的关注^[1, 2]。前人在细胞水平和分子水平上详细研究了镉对植物的毒害机理以及植物对镉毒害的防卫机制^[3, 4], 而如何缓解或抑制植物镉毒害则成为近年来人们关注的焦点, 已有学者初步探讨了 Si、Fe、Ca、Se 等对植物镉胁迫的作用机制^[5~7], 其中, 稀土元素对镉胁迫的缓解作用从 1 mg L^{-1} 起就有所体现^[8]。

稀土微肥中的稀土元素以镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)等为主, 不同的元素对植物的作用效应都有所差异。目前研究表明: 铈可明显降低小麦幼苗茎叶及根系中镉的生物富集量^[9], 具有促进植物叶绿素形成、提高光合速率、增强植物细胞内保护酶活性、降低自由基含量等生物学作用^[10]。但关于铈对水生植物镉毒害作用的缓解作用尚未见报道。本实验以水生经济作物菱为实验材料, 以稀土元素铈为调控因子, 研究镉胁迫下铈对菱生理特性的影响, 从而探讨铈能否抑制或缓解镉对菱的毒害作用。

1 材料与方法

1.1 实验材料

菱(*Trapa bispinosa*)为本实验所用材料, 采自江苏洪泽湖圩区, 后栽种于淮阴师范学院室外培养池和南京师范大学生命科学学院花房。实验所用试剂如下: $Ce(NO_3)_3$ (纯度 > 99%, 上海化学试剂公司)、 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ (纯度 > 99%, 亭新化工试剂厂)、L-脯氨酸(B.R, 上海化学试剂公司)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)试剂盒购于南京建成生物工程研究所。实验仪器采用 Beckman J2Mc 型冷冻离心机、上海第三分析仪器厂产 UV-754 型分光光度计、上海天平仪器厂产 HHS-4S 型电热恒温水浴锅。

1.2 实验方法

将大小和营养状况相似的菱盘植株放在加入自来水的玻璃缸中, 培养液为不含重金属的自来水, 依据我们的预实验结果, 5 mg L^{-1} 的 Ce 对菱的生长促进作用比较明显, 选择 Cd 和 Ce 的处理浓度见表 1。4 d 后测菱盘上倒数第三叶(即下文所称的浮水叶或菱叶)的各项生理指标。

* 江苏省教育厅自然科学基金项目(02KJD180009)资助

† 通讯作者, E-mail: dingxynj@263.net

作者简介: 罗玉明(1963~), 副教授, 主要从事植物抗性生理研究。E-mail: luoym21cn@163.com

收稿日期: 2005-09-28; 收到修改稿日期: 2006-03-22

表 1 不同 Cd^{2+} 、 Ce^{3+} 处理浓度的实验设计Table 1 Designing of the treatments in the experiment on Cd^{2+} and Ce^{3+} (mg L^{-1})

试验组 1 Treatment group 1		试验组 2 Treatment group 2		试验组 3 Treatment group 3		试验组 4 Treatment group 4	
Ce^{3+}	Cd^{2+}	Ce^{3+}	Cd^{2+}	Ce^{3+}	Cd^{2+}	Ce^{3+}	Cd^{2+}
0	0	0	1	0	2	0	4
5	0	5	1	5	2	5	4

1.2.1 菱浮水叶叶绿素含量测定 采用分光光度法, 用 754 型分光光度计, 于波长 663 nm、645 nm 下测定。

1.2.2 酶液制备 取处理 4 d 后的倒数第三叶片洗净、吸干、称重后, 加 50 mmol L^{-1} 磷酸 buffer (pH7.8), 冰浴中研磨成匀浆, 冷冻离心 ($0 \sim 4^\circ\text{C}$) $15\,000 \text{ r min}^{-1}$ 离心 20 min, 上清液为酶液。

1.2.3 酶活性测定 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用 SOD 试剂盒 (黄嘌呤氧化酶法) 测定^[11], 其活性单位定义为: 每 ml 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个亚硝酸盐单位。过氧化氢酶 (CAT) 活性用 CAT 试剂盒测定^[12], 其活性单位定义为: 每 g 植物材料每分解 $1 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ 的 CAT 量为活力单位。过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定^[13]。

1.2.4 脯氨酸含量测定 采用酸性茚三酮法^[14], 用 754 型分光光度计在波长 520 nm 下测定。

实验重复 3 次, 结果取平均值。采用相关系数分析 (R) 和无重复双因素方差分析 (F) 对结果进行处理和分析。

2 结果

2.1 外部形态的变化

各株菱的菱盘浮出水面, 除了茎端的外层幼叶的中上部挺水外, 其他叶片均与水体直接接触, 受处理因子影响更为直接。4 个试验组处理 4 d 后观察菱外部形态变化可见: 同时加入 Ce 和 Cd 的试验组的伤害症状要明显小于单独受 Cd 胁迫的试验组。当 Cd^{2+} 浓度为 1 mg L^{-1} 时, 菱叶尖、叶缘部位出现了灰斑, 开始褪绿, 根尖出现棕褐色, 初现伤害症状。随着 Cd^{2+} 浓度的加大, 植株的受害症状也随之加深。在 Ce^{3+} 缓解的处理过程中, 当 $\text{Ce}^{3+} + \text{Cd}^{2+}$ 浓度为 $5 + 1 \text{ mg L}^{-1}$ 时, 只有个别菱叶出现灰斑, 但不明显, 仅发现幼叶褪绿, 植株的伤害症状明显低于单一的 1 mg L^{-1} 的 Cd^{2+} 处理。当 $\text{Ce}^{3+} + \text{Cd}^{2+}$ 浓度为 $5 + 2 \text{ mg L}^{-1}$ 时, 植株的伤害症状明显低于单一的 2 mg L^{-1} Cd^{2+} 的处理结果。但当 Cd^{2+} 浓度到达 4 mg L^{-1} 时, 植株出现了坏死症状, 5 mg L^{-1} Ce^{3+} 不起缓解作用 (表 2)。

表 2 不同浓度 Cd^{2+} 、 Ce^{3+} 作用下菱的外部形态变化Table 2 Change in appearance of *Trapa bispinosa* treated with different concentrations of Cd^{2+} and $\text{Cd}^{2+} + \text{Ce}^{3+}$

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg L^{-1})	整体外观 Appearance	浮水叶 Natant leaf		不定须状根 Fibrous root	伤害 症状 ¹⁾ Damage
			质地 Texture	颜色 Colour	颜色 Colour	
			对照	0	菱盘饱满	
Cd^{2+}	1	叶尖、叶缘部位出现了灰斑	一般	开始褪绿	根尖出现棕褐色	++
Cd^{2+}	2	叶片灰褐斑增多, 斑直径增大, 幼叶中毒情况大于老叶, 部分老叶和幼叶开始脱落	变软	明显褪绿、黄化	棕褐色	+++
Cd^{2+}	4	部分叶片整张呈灰褐色、叶卷曲, 叶基本脱离植株	变软 变烂	老化变黑	灰黑色	++++
Ce^{3+}	5	菱盘饱满、增大	较硬	翠绿、深绿	淡绿	-
$\text{Ce}^{3+} + \text{Cd}^{2+}$	5+1	个别叶出现灰斑, 但不明显	较硬	幼叶开始褪绿	根尖出现棕褐色	+
$\text{Ce}^{3+} + \text{Cd}^{2+}$	5+2	叶片边缘部分出现褐斑	一般	开始褪绿	根尖呈棕褐色	++
$\text{Ce}^{3+} + \text{Cd}^{2+}$	5+4	部分叶片整张呈灰褐色、叶卷曲, 部分老、幼叶脱离植株	变软	变灰黑	灰黑色	++++

1) “-” 无; “+” 轻微; “++” 一般; “+++” 明显; “++++” 严重; “-” no; “+” slight; “++” moderate; “+++” significant; “++++” serious

2.2 镉对镉胁迫下菱叶片叶绿素的影响

在镉处理下,菱叶中叶绿素的含量随着其浓度的上升而逐渐降低,当 Cd^{2+} 浓度为 2 和 4 mg L^{-1} 时,同无重金属处理的对照组相比降低了 12.9% 和 25.9%。 $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 处理的叶绿素含量较对照上升了 50%, $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 、 $2 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 和 $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 、 $4 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 复合处理下,叶绿素则为对照组的 125.8% 和 99.5%, $F = 57.48$, $p = 0.0048$, 差异极显著(图 1)。

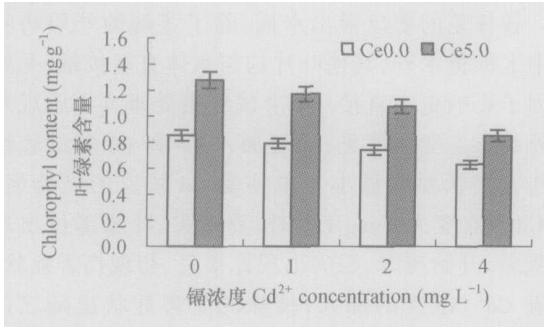


图 1 镉对镉胁迫下菱叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of Ce^{3+} on chlorophyll content under Cd^{2+} stress

2.3 镉对镉胁迫下菱叶片 SOD、CAT、POD 活性的影响

由图 2 可以看出,单一 Cd^{2+} 处理下,SOD 活性随着处理的浓度上升呈现出先升后降的趋势,在 2 mg L^{-1} 下处于最高峰,较对照组提高 33.86%,当浓度上升至 4 mg L^{-1} 时,SOD 活性较对照组下降了 6.58%。正常情况下, 5 mg L^{-1} 的 Ce^{3+} 能诱导 SOD 活性提高,为对照组的 113%, $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 、 $1 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 和 $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 、 $2 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 复合处理组 SOD 活性均较对照组高出 1.40 倍和 1.60 倍,当镉浓度升至 4 mg L^{-1} 时,复合组 SOD 活性明显下降,且幅度要大于单一 Cd^{2+} 处理, $F = 55.00$, $p = 0.005$ 。

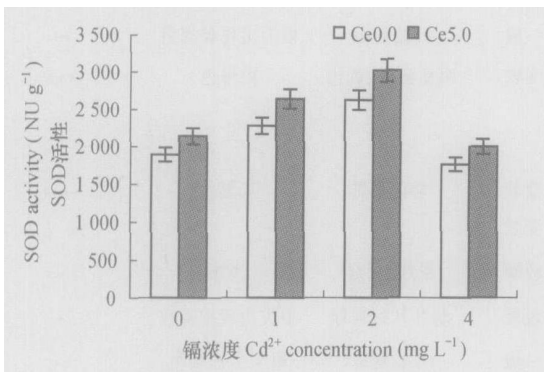


图 2 镉对镉胁迫下菱叶片 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of Ce^{3+} on SOD activity in *Trapa bispinosa* leaf under Cd^{2+} stress

在 Cd^{2+} 胁迫下, CAT 活性是先降后升, $r = -0.975$, 表现为 CAT 酶活性被抑制, $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 能够缓解 CAT 活性下降的幅度, 方差分析结果为 $F = 17.31$, $p = 0.025$, 差异显著(图 3)。

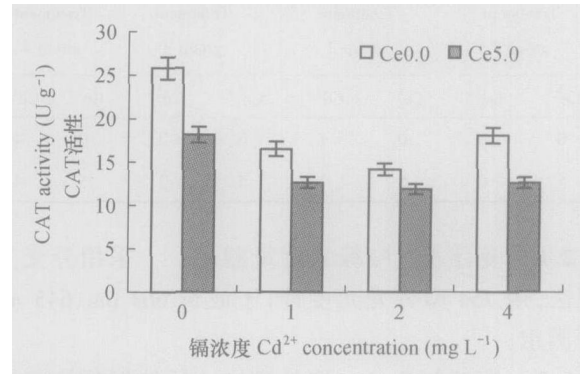


图 3 镉对镉胁迫下菱叶片 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effects of Ce^{3+} on CAT activity in *Trapa bispinosa* leaf under Cd^{2+} stress

从图 4 中可以看出,单一 Cd^{2+} 处理,随着浓度的升高,POD 活性出现了先升后降的趋势,但较为缓和, $r = 0.984$, 呈极显著正相关,在 1 mg L^{-1} 的 Cd^{2+} 浓度下出现一个应急峰,随后下降,但仍高于对照。加入 $5 \text{ mg L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ 后,POD 活性显著上升,较对照组高出 8.33 倍,复合处理组的活性也随之先上升后下降,且幅度要较单一 Cd^{2+} 处理的剧烈, $p = 0.05$, 相关显著。

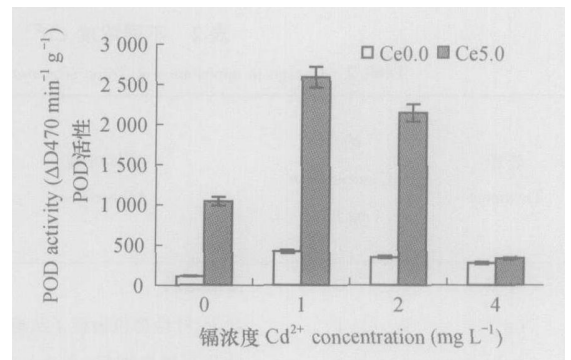


图 4 镉对镉胁迫下菱叶片 POD 活性的影响

Fig. 4 Effects of Ce^{3+} on POD activity in *Trapa bispinosa* leaf under Cd^{2+} stress

2.4 镉对镉胁迫下脯氨酸含量的影响

单一 Cd^{2+} 处理下,脯氨酸的含量迅速增加, $1 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 处理下,较对照升高了 75%, 达到高峰, $4 \text{ mg L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 处理则较对照下降了 64.37%, 加入 Ce^{3+} 后,复合组较单一 Cd^{2+} 处理时脯氨酸的含量要有所降低, $F = 10.96$, $p = 0.045$ (图 5)。

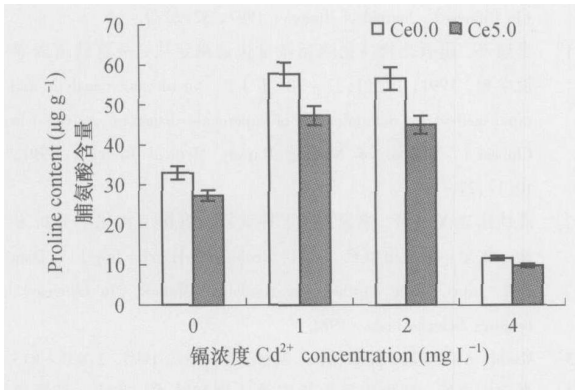


图5 铈对镉胁迫下菱叶片脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Effects of Ce^{3+} on proline content of *Trapa bispinosa* leaf under Cd^{2+} stress

3 讨论

3.1 Cd^{2+} 污染对菱叶片的生理毒害作用

重金属镉对高等植物的毒害主要表现在破坏植物水分平衡^[15],降低光合速率、破坏光合器官及色素^[16],抑制呼吸作用并能产生氧化胁迫^[17]。本研究选择菱盘上形态刚发育完整、经预试验证明最易受重金属污染毒害的倒数第三叶为测试对象。在 Cd^{2+} 处理下,该叶的叶绿素受到破坏,其含量随着镉浓度的上升而逐渐降低($p < 0.01$),叶绿素含量的下降影响光合作用,使植物生长发育受到阻碍而出现毒害效应。重金属对植物的危害与活性氧清除系统被破坏有关^[18],抗氧化酶系统中SOD、POD受到活性氧自由基的诱导后活性上升参与清除自由基,2 mg L⁻¹ Cd^{2+} 诱导菱叶SOD活性达到高峰($p = 0.005 < 0.01$),POD活性峰值的 Cd^{2+} 诱导浓度在1 mg L⁻¹处。当 $Cd^{2+} > 2$ mg L⁻¹时,酶系统被重金属离子破坏使得其活性有所下降,SOD、POD在4 mg L⁻¹ Cd^{2+} 处较2 mg L⁻¹ Cd^{2+} 处分别降低了32.62%和20.91%。本实验中,CAT活性则最初表现为被抑制,这表明 Cd^{2+} 对过氧化氢酶活性的抑制作用较强,但当 Cd^{2+} 浓度升至4 mg L⁻¹时,其活性又有所升高,分析原因可能是高浓度 Cd^{2+} 毒害下POD活性下降,植物体内不断积聚的 H_2O_2 激发了CAT活性,其活性又升高,以弥补POD活性下降造成的 H_2O_2 清除能力的削弱。

在干旱、盐渍、重金属污染等胁迫条件下,植物体内脯氨酸会大量积累,因此脯氨酸含量的变化在一定程度上可以反映植物受到胁迫的程度以及抵抗

逆境的能力^[19]。 Cd^{2+} 胁迫下,菱叶片内的脯氨酸含量也出现先上升后下降的趋势,高峰出现在1 mg L⁻¹和2 mg L⁻¹处,而4 mg L⁻¹镉处理时,脯氨酸含量明显下降,说明在高浓度的镉处理下,脯氨酸清除氧自由基的作用不再积极。脯氨酸的抗逆生理功能主要表现在稳定生物大分子结构、降低细胞酸度、作为能量库调节细胞氧化还原势以及清除活性氧的作用等。

3.2 Ce^{3+} 对 Cd^{2+} 毒害菱的生理缓解作用

前人研究表明:有机肥料的施用可明显降低土壤中有毒性Cd的含量,对重金属污染有明显的缓解作用^[20]。除此以外,稀土元素镧、铈等对植物受重金属污染具有较好的缓解作用,稀土元素对植物受重金属胁迫下的保护作用主要与清除自由基有关。王金盛等研究了铈离子清除超氧化物自由基的机理,探讨了铈离子清除 O_2^- 的机理为: $Ce^{3+} + O_2^- + 2H^+ \rightarrow Ce^{4+} + H_2O_2$, $Ce^{4+} + O_2^- \rightarrow Ce^{3+} + O_2$ ^[21]。在加入5 mg L⁻¹ Ce^{3+} 处理后,菱SOD、POD酶活性明显提高,增加了清除自由基的能力,POD活性提高非常显著,较对照组增高8.33倍,这可能是低浓度的 Cd^{2+} 使得菱叶细胞膜脂过氧化程度较高,迫使POD活性加强以阻止膜脂降解。与前人研究的稀土元素缓解植物重金属的作用有所差异的是,在加入5 mg L⁻¹ Ce^{3+} 后,CAT活性反而有所降低,且先被抑制后被激活,本研究认为这可能与植物物种、不同生长期有关,还需进一步探讨。

研究认为, Ce^{3+} 对 Cd^{2+} 毒害菱的生理缓解作用机理可能表现在以下三个方面:(1)人们通过分子活化分析法(MAA),测出了稀土元素能通过植物细胞壁进入原生质体作用于细胞器^[22]。因此,在外加5 mg L⁻¹ Ce^{3+} 处理一定时段后,铈离子通过细胞壁进入菱叶片细胞,从而影响了遗传物质和蛋白酶的功能。(2)有“超级钙”之称的稀土离子能与细胞膜上的磷脂结合,调节钙代谢^[23],作为本实验的调控因子, Ce^{3+} 很可能激活了细胞膜上的钙离子通道,促进 Ca^{2+} 内流,细胞内 Ca^{2+} 浓度增多有利于第二信使 $Ca^{2+} \cdot CaM$ 的形成,从而激活许多酶参与菱体内的解毒过程。(3)铈抑制了外源性化合物产生的自由基,通过增强SOD、POD活性来清除毒害所产生的超氧阴离子和降低膜脂过氧化程度、稳定膜透性^[22]。

此外,加入5 mg L⁻¹ Ce^{3+} 后,作为抗逆指标之一的脯氨酸含量的减少,进一步说明了5 mg L⁻¹ Ce^{3+} 能缓解低浓度 Cd^{2+} (0~2 mg L⁻¹)对菱的毒害程度。

与许多学者的研究结果类似, 稀土在一定浓度范围内对重金属引起的毒害有缓解作用^[9, 24, 25], 铈对植物的胁迫缓解是有一定的浓度限度的, 当超过最大缓解浓度时, 它将与重金属一起协同来破坏植物的生长发育。

参考文献

- [1] Eneman J D, Potts R J, Osier G S, *et al.* Suppressed oxidant-induced apoptosis in cadmium adapted alveolar epithelial cells and its potential involvement in cadmium carcinogenesis. *Toxicology*, 2000, 147(3): 215~ 228
- [2] Wei S Q, Jarvis N. Modelling of cadmium transport in soil-crop system. *Pedosphere*, 2000, 10(1): 1~ 9
- [3] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展. *生态学报*, 2000, 20(3): 514~ 523. Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 514~ 523
- [4] 张玉秀, 柴团耀, Burkard G. 植物耐重金属机理研究进展. *植物学报*, 1999, 41(5): 453~ 457. Zhang Y X, Chai T Y, Burkard G. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants (In Chinese). *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(5): 453~ 457
- [5] 周建华, 王永锐. 硅营养缓解水稻幼苗 Cd, Cr 毒害的生理研究. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(1): 11~ 15. Zhou J H, Wang Y R. Physiological studies on poisoning effects of Cd and Cr on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings through inhibition of Si nutrition (In Chinese). *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 1999, 5(1): 11~ 15
- [6] 周卫, 汪洪, 李春花, 等. 添加碳酸钙对土壤中镉形态转化与玉米叶片镉组分的影响. *土壤学报*, 2001, 38(2): 219~ 225. Zhou W, Wang H, Li C H, *et al.* Effects of calcium carbonate addition on transformation of cadmium species in soil and cadmium forms in leaves of maize (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 219~ 225
- [7] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 78~ 87. Wang H, Zhou W, Lin B. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 78~ 87
- [8] 李大辉, 施国新, 丁小余, 等. Ca^{2+} 、 Hg^{2+} 对菱幼苗生长及其超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性的影响. *武汉植物学研究*, 1999, 17(3): 206~ 210. Li D H, Shi G X, Ding X Y, *et al.* Effects of Cd^{2+} , Hg^{2+} on growth and activity of superoxide dismutase and peroxidase in *Trapa bispinosa* Roxb. seedlings (In Chinese). *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1999, 17(3): 206~ 210
- [9] 胡忻, 陈逸, 王晓蓉, 等. 稀土元素铈对小麦幼苗镉伤害的防护效应. *南京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 671~ 677. Hu X, Chen Y J, Wang X R, *et al.* The protective effects of cerium on the damage to wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings caused by cadmium (In Chinese). *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2001, 37(6): 671~ 677
- [10] 江铃. 稀土元素在植物中的生理效应. *生物学通报*, 1997, 32(2): 9~ 11. Jiang L. Physiological effects of lanthanum in plants (In Chinese). *Journal of Biology*, 1997, 32(2): 9~ 11
- [11] 季建平. 超氧化物歧化酶超微量快速测定法. *南京铁道医学院学报*, 1991, 10(1): 27~ 30. Ji J P. An ultramicroanalytic and rapid method for determination of superoxide dismutase activity (In Chinese). *Journal of Nanjing Railway Medical College*, 1991, 10(1): 27~ 30
- [12] 波钦诺克 X H 著. 荆家海, 丁钟荣译. 植物生物化学分析方法. 北京: 科学出版社, 1981. Bochinoc X H. ed. Jing J H, Ding Z R. trans. *Plant Biochemistry Analytical Method* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1981
- [13] Maehly A C. Plant peroxidase. *Meth. Enzym.*, 1995, 2: 801~ 813
- [14] 李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. Li H S. ed. *Elements and Technology of Plant Physiological Biochemical Experiment* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000
- [15] Bazzaz F A, Rolfe G L, Carlson R M, *et al.* Effect of Cd on photosynthesis and transpiration of excised leaves of comand sunflower. *Physiol. Plant*, 1974, 32: 372~ 376
- [16] Reese R N, Roberts L W. Effects of cadmium on whole cell and mitochondrial respiration in tobacco cell suspension culture (*Nicotiana tabacum* L. var. xanthi). *Plant Physiol.*, 1985, 120: 123~ 130
- [17] 荆红梅, 郑海雷, 赵中秋, 等. 植物对镉胁迫响应的研究进展. *生态学报*, 2001, 21(12): 2 125~ 2 130. Jing H M, Zheng H L, Zhao Z Q, *et al.* Progresses of plants response to cadmium (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2 125~ 2 130
- [18] 杨世勇, 王方, 谢建春. 重金属对植物的毒害及植物的耐性机制. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 27(1): 71~ 74. Yang S Y, Wang F, Xie J C. Plant toxicity of heavy metals and the tolerant mechanisms of plants (In Chinese). *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2004, 27(1): 71~ 74
- [19] 刘宁, 高玉葆, 贾彩霞, 等. 渗透胁迫下多花黑麦草叶内过氧化物酶活性和脯氨酸含量以及质膜相对透性的变化. *植物生理学通讯*, 2000, 36(1): 11~ 14. Liu N, Gao Y B, Jia C X, *et al.* Changes in POD activity, free proline content and cytomembrane permeability of *Lolium multiflorum* leaves under different levels of osmotic stress (In Chinese). *Journal of Plant Physiology*, 2000, 36(1): 11~ 14
- [20] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应. *土壤学报*, 2001, 38(2): 212~ 218. Zhang Y L, Shen Q R, Jiang Y. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 212~ 218
- [21] 王金盛, 郭春程, 程玉香, 等. 铈离子清除超氧物自由基的机理. *中国稀土学报*, 1997, 15(2): 151~ 154. Wang J S, Guo C R, Cheng Y X, *et al.* Mechanism of cerium ion clearing superoxide radical (In Chinese). *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 1997, 15(2): 151~ 154
- [22] Zhang Z Y, Wang Y Q, Sun J X, *et al.* Determination of rare earth elements in plant protoplasts by MAA. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(16): 1 497~ 1 499
- [23] 倪嘉缵主编. 稀土生物无机化学. 北京: 科学出版社, 1995. Ni J Z. ed. *Bio-abiocchemistry of Lanthanum* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1995

- [24] 张小兰, 施国新, 徐勤松, 等. 镧缓解镍对水鳖叶片的毒害效应研究. 中国稀土学报, 2003, 21(1): 81~ 84. Zhang X L, Shi G X, Xu Q S, *et al.* Detoxication of lanthanum against nickel in *Hydrocharis dubia* BL. backer leaves (In Chinese). Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2003, 21(1): 81~ 84
- [25] 郜红建, 常江, 张自立, 等. 稀土在植物抗逆中的生理作用. 中国稀土学报, 2003, 21(5): 487~ 490. Gao H J, Chang J, Zhang Z L, *et al.* Physiological effects of rare earth elements on stress resistance in plant (In Chinese). Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2003, 21(5): 487~ 490

MODERATING EFFECT OF CERIUM ON CADMIUM TOXICATION OF *TRAPA BISPINOSA* LEAVES

Luo Yuming^{1,2} Bao Shulin² Ding Bingzhong² Ding Xiaoyu^{2†} Yang Jinbin¹

(1 Department of Biology, Huaiyin Teachers College, Huaian, Jiangsu 223300, China)

(2 College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Dynamic changes in content of chlorophyll and proline, and activity of protective enzymes such as superoxide (SOD), peroxidase (POD) and chloramphenicol acetyltransferase (CAT) in the leaves of *Trapa bispinosa* treated, respectively, with Cd²⁺ at varying rates and Cd²⁺ plus 5 mg L⁻¹ Ce³⁺ were studied. Results show that chlorophyll contents decreased with increasing Cd²⁺ concentration, while the activity of both SOD and POD, and the content of proline increased when Cd²⁺ concentration was low and decreased when it was high. In contrast, CAT activity decreased when it was low and increased when it was high. Compared with the single ion treatments, the Cd²⁺ + Ce³⁺ treatments increased chlorophyll contents, and stimulated activity of SOD and POD, especially, that of the latter, which was 8.33 times higher than its control when the combination was 5 mg L⁻¹ Ce³⁺ plus 1 mg L⁻¹ Cd²⁺. The results suggest that the addition of 5 mg L⁻¹ Ce³⁺ can relieve the toxicity of a low concentration Cd²⁺ on leaves of *Trapa bispinosa*.

Key words Rare earth element; Cerium; Relief; Stress of cadmium; *Trapa Bispinosa*; Enzymes