

美人蕉 (*Canna indica* Linn) 镉胁迫的抗氧化机理

王业社¹, 刘可慧^{2,*}

(1. 邵阳学院城市建设系, 邵阳 422000; 2. 桂林电子科技大学应用科技学院, 桂林 541004)

摘要: 采用水培的方式, 探讨了不同 Cd^{2+} 水平 (0、1、2.5、7.5、15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对美人蕉生物量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性以及丙二醛 (MDA)、谷胱甘肽 (GSH)、植物螯合肽 (PCs)、酸溶性 SH、Cd 含量的影响。结果表明, 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd 显著提高了美人蕉的生物量 ($p < 0.05$), 促进了美人蕉的生长。随着 Cd^{2+} 浓度的提高, SOD、POD、CAT 活性以及 MDA 含量显著增加 ($p < 0.05$), 表明美人蕉受到了活性氧物质的胁迫。美人蕉中 GSH、PCs、SH 含量也随 Cd^{2+} 含量的增加而增加, 表明 Cd 胁迫诱导了 PCs 的产生, 有利于降低 Cd 对植物体本身的毒害, 且根系中的含量均高于叶片。美人蕉中 Cd 含量随着 Cd 浓度的增加而显著增加, 在 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时, 地上部 Cd 含量达到 555.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表明美人蕉对 Cd 有较强的富集能力。

关键词: Cd; 美人蕉; 抗氧化酶

文章编号: 1000-0933(2009)05-2710-06 中图分类号: Q142, Q945, Q948 文献标识码: A

Stress responses and resistance mechanism of *Canna indica* Linn to cadmium

WANG Ye-She¹, LIU Ke-Hui^{2,*}

1 Department of City Construction, Shaoyang University, Shaoyang, 422000, China

2 College of Applied Science and Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2710 ~ 2715.

Abstract: A solution culture experiment has been carried out to study the effects of different cadmium levels (0 — 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on the biomass, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and malondialdehyde (MDA), glutathione (GSH), PCs (phytochelatins) and total acid soluble SH in *Canna indica* Linn. The results show that 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd in the solution significantly increases the biomass of *Canna indica* Linn ($p < 0.05$). The activity of SOD, POD, and CAT was increased. The increase of Cd^{2+} enhances the SOD, POD, CAT activity and the MDA accumulation ($p < 0.05$), which indicates that *Canna indica* Linn has been stressed by Cd. Under this condition, the GSH, PCs, SH in *Canna indica* Linn increase as well. This means Cd stress induces the production of PCs which helps to decrease its harm to the plant. The roots have more PCs than the leaves. The higher the Cd concentration of the solution used in the experiment the more Cd in the tissues of *Canna indica* Linn. At the level of 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd of the solution, the concentration of Cd in the shoots reaches 555.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which proves the ample accumulation capacity of *Canna indica* Linn, and the *Canna indica* Linn was a potential species for phytoremediation of water polluted by moderate concentration of Cd.

Key Words: Cd; *Canna indica* Linn; antioxidative enzymes

近年来, 随着采矿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土壤和水中, 造成不同程度的环境污染, Cd^{2+} 便是其中之一。 Cd^{2+} 乃植物非必需元素, Cd^{2+} 的存在会对植物产生不同程度的毒害作用。国内外就 Cd^{2+} 对植物的毒害、植物对 Cd^{2+} 的抗性机理等方面进行了诸多的研究^[1~5], 但主要集中在农作物

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30499340); 桂林电子科技大学博士启动基金资助项目 (Z20718)

收稿日期: 2008-01-22; 修订日期: 2008-04-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: coffeeleave@126.com

以及矿山植物上^[6,7],用绿化园林植物研究相对较少。美人蕉(*Canna indica* Linn)是一种应用价值较高的观赏花卉。近年来,随着植物修复工作的开展,利用水生生物修复水体中的重金属污染已越来越受到研究者的关注,尤其是大生物量的且对重金属具有一定耐性的水生植物是研究者关注的焦点。美人蕉以其生物量大,生长速度快,对重金属有良好的吸收、富集能力而备受关注^[1~4]。但前人的研究主要集中在对重金属的吸收以及形态分布方面,对抗重金属胁迫和其解毒机理研究却研究较少^[1]。因此,为探讨重金属胁迫下,美人蕉生理指标的变化以及其解毒机制,本文以美人蕉为研究对象,研究了 Cd 胁迫下,美人蕉抗氧化酶及非酶物质在消除活性氧类物质中的作用及解毒 Cd 毒害的机理,旨在为美人蕉在重金属污染水体修复中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物为美人蕉(*Canna indica* Linn)。

1.2 试验处理

在邵阳学院花卉中试基地选取生长一致的美人蕉幼苗,置于 150 cm × 80 cm × 25 cm 暂养箱中培养。美人蕉长至 8 叶期后,选取高度均在 50 cm 左右的植株,转入 12 L 塑料桶中,每桶两株,加 10 L 1/8 Hoagland 营养液进行水培。添加 Cd 前于营养液中预培养 20 d,待生长良好、未出现任何不良症状后,添加 Cd 继续培养 12 d, Cd 添加水平为 0、1、2.5、7.5、15 mg·L⁻¹ (以 CdCl₂·2.5H₂O 加入,单 Cd²⁺ 计算,设 Cd 添加浓度为 0 的处理为对照)。重复 3 次,每 4 d 更换 1 次营养液,并保持连续通气。整个试验在温室中完成。

1.3 测定方法

1.3.1 酶液的提取与活性测定

称取剪碎、混匀的美人蕉叶片 0.5000 g,加入 0.1 mmol·L⁻¹ 的磷酸缓冲液 10 ml (pH7.0, 内含 0.1 mmol·L⁻¹ EDTA, 1% 的 PVP) 和少量石英砂用玻璃研钵研磨成匀浆,在 4 °C 15000 g 下离心 15min^[8],上清液为酶粗液,用于测定 SOD、CAT、POD 活性。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT) 光化还原法, CAT 活性采用紫外吸收法、POD 活性测定采用愈创木酚法,具体过程测定参照李合生^[9]的方法进行。

1.3.2 巯基及 MDA 含量的测定

酸溶性 SH 的提取和其含量的测定参考文献^[1, 10, 11]。将 0.500 g 新鲜的美人蕉叶片加入 5 ml 0.02 mol·L⁻¹ 的 EDTA 溶液,在 4 °C 下研磨成匀浆,在 12000 g 离心 10min,所得上清液用于非蛋白 SH 的测定。总巯基测定:取 0.25 ml 的上清液与 0.2 mmol·L⁻¹ 三羟甲基甲烷缓冲液(Tris 缓冲液 0.25 ml, pH8.2) 和 0.01 mmol·L⁻¹ DTNB(0.05 ml) 混合在 15 ml 的塑料管中,加入甲醇 3.95 ml,于 20 °C 保温 10min 后,在 412 nm 处测定吸光值。同时做试剂空白(不含样品)和样品空白。还原型谷胱甘肽(GSH) 含量的测定参考文献^[12]完成。植物螯合肽的含量(PCs) 为酸溶性 SH 含量与 GSH 含量的差值。

丙二醛(MDA) 含量参照李合生^[9]的方法测定。以上酶与巯基的提取与测定均在 0~4 °C 条件下完成,每处理至少 3 次平行。

1.3.3 Cd 含量测定

称取 0.250 g 烘干且磨碎的美人蕉于 100 ml 三角瓶中,加入 10 ml 体积分数 5:1 的 HNO₃-HClO₄, 200~220 °C 消煮至澄清^[13],用去离子水定容后采用原子吸收分光光度计(AAS, HITACHI-Z5000)测定,同时用标准样(西红柿叶, ESP-1, 中国环境监测总站)进行质量控制。所有数据用 SPSS11.5 软件处理,以上测定至少 3 次平行。

2 结果与分析

2.1 Cd 对美人蕉生物量及 Cd 含量的影响

美人蕉在添加 Cd 后的第 4 天开始,除 0、1 mg Cd·L⁻¹ 处理外,其余各处理均有不同程度地萎蔫;第 7 天时,7.5、15 mg Cd·L⁻¹ 处理叶片出现黄色斑点,呈现失绿症状,表明高浓度的 Cd 不利于美人蕉的生长。从 Cd

对生物量的影响中可以看出,处理浓度为 $1 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随 Cd 处理浓度的增加呈显著性下降(表 1)。统计分析结果表明, $1 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理与对照相比差异显著($p < 0.05$),说明 $1 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理促进了美人蕉的生长。从表 1 可以看出,随镉处理浓度的增加,美人蕉地上、地下部镉含量呈显著性地增加, $15 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下地上、地下部镉含量分别达到 555.4 、 $1159.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 Cd^{2+} 对美人蕉生长及 Cd 含量的影响(mean $\pm$ SE) *

Table 1 Effects of Cd^{2+} on the biomass and Cd contents (mean $\pm$ SE) in *Canna indica* Linn

Cd($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd 含量 Cd content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		生物量 Biomass(g, DW)	
	地下部 Roots	地上部 Shoots	株重 Whole plant	相对百分数(%) Relative percentage
0	$0.09 \pm 0.01 \text{ d}$	$0.05 \pm 0.01 \text{ e}$	$49.3 \pm 2.8 \text{ b}$	100
1.0	$110.2 \pm 10.7 \text{ d}$	$55.3 \pm 5.6 \text{ d}$	$57.2 \pm 6.9 \text{ a}$	115.9
2.5	$454.9 \pm 34.6 \text{ c}$	$235.4 \pm 25.7 \text{ c}$	$46.6 \pm 3.5 \text{ b}$	94.4
7.5	$1091.9 \pm 127.1 \text{ b}$	$409.9 \pm 19.6 \text{ b}$	$43.5 \pm 3.5 \text{ bc}$	88.2
15.0	$1519.2 \pm 159.4 \text{ a}$	$555.4 \pm 39.8 \text{ a}$	$38.1 \pm 3.3 \text{ c}$	77.3

* 同列的不同字母表示在 0.05 水平的差异显著;下同 The same letter in the same column meant no significant differences among different treatments at 0.05 level; the same below

2.2 Cd 对美人蕉抗氧化酶系统的影响

Cd 添加对美人蕉抗氧化酶系统的影响如图 1。从图中可以看出,随着 Cd 处理浓度的增加,SOD、POD、CAT 活性以及 MDA 含量呈增加的变化趋势。在 Cd 处理浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶片与根系中 SOD 活性分别比对照提高了 75% 和 88%,与对照间的差异显著($p < 0.05$)。POD 活性的变化趋势与 SOD 相似,根系中 POD 活性较叶片中的高,这可能与根系中 Cd 含量较高有关。根系中 CAT 活性与根系中 Cd 含量成极显著正相关($r = 0.931, p < 0.01$),叶片中 CAT 活性与地上部中 Cd 含量成极显著正相关($r = 0.968, p < 0.01$)。MDA 含量也随着 Cd 处理浓度的增加而增加,表明美人蕉随着 Cd 处理浓度的增加,所受的胁迫也增加。

2.3 Cd 对美人蕉巯基含量的影响

从表 2 中可以看出,随着 Cd 处理浓度的增加,叶片与根系中的 SH、GSH、PCs 呈增加的变化趋势。根系中 SH、GSH 含量处理间差异显著($p < 0.05$), $2.5 \sim 15 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 PCs 含量无显著差异($p > 0.05$),但与对照以及 $1 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理间差异显著($p < 0.05$)。叶片中 SH、GSH、PCs 含量均低于根系中的相应处理,高 Cd 处理与对照间的差异显著($p < 0.05$)。这可能与根系中 Cd 含量高于地上部含量有关,表明 SH、GSH、PCs 在美人蕉中起到了很好的解毒 Cd 的作用。

表 2 Cd^{2+} 对美人蕉酸溶性 SH 含量(mean $\pm$ SE)的影响($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, FW)

Table 2 Effects of Cd^{2+} on the acid soluble SH concentration(mean $\pm$ SE) in *Canna indica* Linn

Cd ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SH		GSH		PCs	
	根 Roots	叶 Leaves	根 Roots	叶 Leaves	根 Roots	叶 Leaves
0	$0.59 \pm 0.07 \text{ e}$	$0.37 \pm 0.02 \text{ c}$	$0.48 \pm 0.03 \text{ e}$	$0.31 \pm 0.04 \text{ c}$	$0.11 \pm 0.08 \text{ c}$	$0.06 \pm 0.05 \text{ c}$
1.0	$2.05 \pm 0.13 \text{ d}$	$0.58 \pm 0.11 \text{ bc}$	$1.50 \pm 0.11 \text{ d}$	$0.41 \pm 0.03 \text{ bc}$	$0.55 \pm 0.09 \text{ b}$	$0.18 \pm 0.10 \text{ bc}$
2.5	$3.60 \pm 0.20 \text{ c}$	$0.75 \pm 0.10 \text{ bc}$	$2.32 \pm 0.20 \text{ c}$	$0.42 \pm 0.04 \text{ b}$	$1.28 \pm 0.02 \text{ a}$	$0.33 \pm 0.07 \text{ ab}$
7.5	$4.38 \pm 0.11 \text{ b}$	$0.99 \pm 0.09 \text{ b}$	$3.12 \pm 0.16 \text{ b}$	$0.56 \pm 0.05 \text{ a}$	$1.26 \pm 0.09 \text{ a}$	$0.44 \pm 0.13 \text{ a}$
15.0	$5.27 \pm 0.29 \text{ a}$	$1.17 \pm 0.11 \text{ a}$	$3.86 \pm 0.10 \text{ a}$	$0.66 \pm 0.10 \text{ a}$	$1.41 \pm 0.21 \text{ a}$	$0.51 \pm 0.18 \text{ a}$

3 讨论

本研究发现在 $1 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时,美人蕉地上与地下部分 Cd 含量分别达到 $55.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $110.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且生物量明显增加, $15 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时分别达到 555.4 、 $1159.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1),表明美人蕉对水体中的 Cd 有较强的吸收与富集能力,特别是对低、中浓度的 Cd 有较强的耐性,是一种良好的修复 Cd 污染水体的水生植物^[1,14,15]。但高浓度的 Cd 造成美人蕉叶片失绿,阻碍了美人蕉的生长(表 1),这与许多农作物的

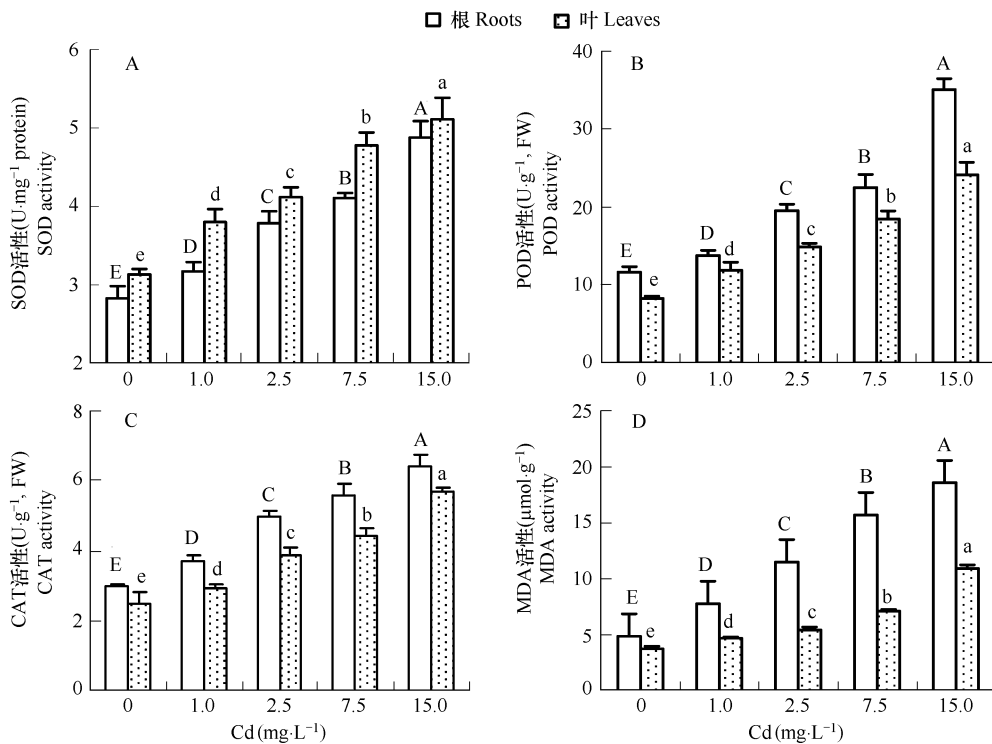


图1 Cd²⁺对美人蕉抗氧化酶系统的影响(mean + SE)

Fig. 1 Effects of Cd²⁺ on antioxidative enzymes activities (mean + SE) in *Canna indica* Linn

图中不同字母表示在 0.05 水平的差异显著 The same letter in the figure meant no significant differences among different treatments at 0.05 level

研究结果相似^[5]。Cd 导致叶片失绿的可能原因在于 Cd 取代了叶片中 Fe²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺ 等,直接破坏叶绿体微结构,抑制叶绿素前体的合成,促进叶绿素分解,从而降低叶绿素的含量^[16]。Cd 的存在不仅破坏叶绿素的合成,同时还会产生活性氧物质(ROS)——超氧根(O₂⁻)、氢氧根(OH⁻)、羟自由基(·OH)、过氧化氢(H₂O₂)等^[17]。这些活性氧类物质破坏膜脂类物质、蛋白质以及核酸,减缓植物体的生长发育^[18]。植物体将通过抗氧化酶系统(SOD、CAT、POD 等)与非酶物质(GSH、抗坏血酸盐类等)来消除或减少 ROS 带来的伤害。在一定范围内,SOD、CAT 共同作用能把 O₂⁻ 和 H₂O₂ 转化为 H₂O 和 O₂,并能减少具毒性和高活性的·OH 的形成,POD 和 CAT 则使体内某些氧化酶的毒性产物 H₂O₂ 分解,阻止其对膜脂的攻击,而发生氧化的过程^[19]。SOD 是抗氧化系统中第一道屏障,是防御细胞膜脂过氧化的主要酶,是一种清除超氧离子自由基的酶,与植物的抗逆性、抗衰老密切相关。有研究表明,SOD 活性的增加,有利于超氧离子的清除。POD 是植物体内普遍存在、活性较高的一种酶,它与呼吸作用、光合作用以及生长素等氧化有密切相关。当植物体内 Cd 达一定浓度时,膜脂过氧化作用增强,使得 POD 活性升高,同时,CAT 浓度增加,也会导致 POD 酶活性增加^[20]。本研究结果表明,POD、CAT 活性随着 Cd 处理浓度的增加呈增加的变化趋势,这有利于活性氧物质的消除,使细胞膜免受伤害。MDA 是膜脂过氧化的最终产物,是对细胞生命活动极有害的基团。MDA 的增长在一定程度上反映了体内自由基的量态,其含量的高低直接反映了植物受害情况,同时也反映了·OH、O₂⁻ 等自由基浓度的高低。本研究发现,处理间 MDA 含量差异显著($p < 0.05$),这可能与美人蕉是 Cd 的耐性植物有关。杨兵等研究结果表明,耐性的鸭跖草中累积 MDA 的量远远高于非耐性^[7]。

植物体不仅仅通过抗氧化系统来消除活性氧物质的危害,同时还通过提高巯基含量来消除 Cd 的危害。本研究结果表明,随着 Cd 处理浓度的增加,美人蕉中的 SH、GSH、PCs 含量呈增加的变化趋势,表明 SH、GSH、PCs 在消除 Cd 毒害过程中起着重要作用,这与吴灵琼等^[1]的结果一致。GSH 不仅是植物螯合肽的合成前体^[21],其含量的提高将有利于缓解 Cd 的毒害,同时 GSH 还可通过 AsA-GSH 循环代谢(Halliwell-Asada 途

径)参与 H_2O_2 的清除,可直接清除活性氧自由基^[22]。PCs 是植物组织内富含 SH 的多肽,重金属胁迫下植物诱导 PCs 的合成是植物的解毒机制之一。PCs 通过巯基与重金属螯合形成无毒化合物(metal-PC 络合物),从而减少细胞内游离的重金属离子,减轻重金属对植物的伤害作用^[23]。此外,PC-Cd 络合物可促进 Cd^{2+} 向地上部的长距离运输^[24],植物根系所吸收的 Cd 至少有 60% 被结合成 Cd-PC 而被运送到地上部,不过过量表达 PCs 产生的高 PC 含量对植物可能也有毒性^[25]。本研究结果表明,Cd 胁迫下美人蕉中 PCs 含量显著增加,说明 Cd 胁迫诱导了 PCs 的合成,PCs 在解毒 Cd 毒害的过程中起着重要作用。

References:

- [1] Wu L Q, Cheng S P, Yang L H, Wu Z B. Stress responses and resistance mechanism of *Canna indica* Linn to cadmium and copper. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1365—1369.
- [2] Li F B, Wu Q T. Domestic wastewater treatment with means of soilless cultivated plants. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1997, 8(1): 88—92.
- [3] Grosse W. Consolidated Report-Project N ERBIC18CT1960059 in INCO-DC-Biotechnology- of the 4th Framework Programme of European Commission, Brussels. 1999.
- [4] Fu C P, Tang Y P, Zhang Z Y, Li J H, Li J, Chen S X, Guan D Y. Study on the removal efficiencies of salt water by *Canna Indica* Linn in TEDA landscape river. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(5): 70—73.
- [5] Ouariti O, Gouia H, Ghorbal M H. Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition and nitrate reduction. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1997, 35:347—354.
- [6] An Z Z, Wang X C, Yan W D, Shi W M, Cao Z H. Phytochelatins and its adaptive mechanism under heavy metal stress. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(5): 463—467.
- [7] Yang B, Liao B, Deng D M, Shu W S, Lan C Y. Effect of Cu^{2+} on Cu^{2+} accumulation and antioxidative enzymes of two ecotype of *Commelina communis*. *China Environmental Science*, 2004, 24(1):9—13.
- [8] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44: 25—37.
- [9] Li H S, Sun Q, Zhao S J. Theory and technique of plant physiological and biochemical experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000. 125—128.
- [10] Zhang W H, Cai Y, Downum K R. Thiol synthesis and arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata* (*Chinese brake fern*). *Environmental Pollution*, 2004, 131: 337—345.
- [11] Hartley-Whitaker J, Ainsworth G, Voojiss R. Phytochelatins are involved in differential arsenate tolerance in *Holcus lanatus*. *Plant Physiology*, 2001, 126(1): 299—306.
- [12] Zhang Z S, Li R Q, Wang J B. Effects of oxalate treatment on the membrane permeability and calcium distribution in pepper leaves under heat stress. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2001, 27(2):109—113.
- [13] Zhao F J, Mcgath S P, Grossland A D. Comparison of three wet digestion methods for the determination of plant sulphur by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25:407—418.
- [14] Wang Z Q, Wen Y M, Huang Z T, Li H S. Adaptability of several plant to heavy metal wastewater treatment. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 540—544.
- [15] Wu S T. Studies of phytoremediation on *Canna Generalis* for soil cadmium pollution. *Industrial Safety and Dust Control*, 2005, 31(9): 13—15.
- [16] Peng L, Pardee A B. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction. *Science*, 1992, 257:967—971.
- [17] Chernikova T, Robinson J M, Lee E H. Ozone tolerance and antioxidant enzyme activity in soybean cultivars. *Photosynth Res*, 2000, 64:15—26.
- [18] Liu J X, Hu H R, Zhao G L. The relationship between the release of ethylene and the concentration of polyamines and the accumulation of reactive oxygen in *Peganum multisectum* Bobr leaves under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4):1579—1585.
- [19] Liu D Y, Wang Y B, Zhang X X, Si Q. Effect of sewage irrigation on wheat growth and its activate oxygen metabolism. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(10):1319—1322.
- [20] Li Y, Wang H X, Wu Y S. Effects of cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(2): 147—154.
- [21] Tsuji N, Hirayanagi N, Iwabe O. Regulation of phytochelation synthesis by zinc and cadmium in marine green alga *Dunaliella tertiolecta*. *Phytochemistry*, 2003, 62: 453—459.

- [22] Zhu Z J, Yu J Q, Gerendas J, Burkhard S. Effects of light intensity and nitrogen from on growth and activities of H_2O_2 scavenging enzymes in tobacco. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4): 379—385.
- [23] Goldsbrough P. Metal tolerance in plants: the role of phytochelatins and metallothioneins. In: Terry Nand Banuelos G, ed. *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Florida: Lewis, Boca Raton, 2000. 221—234.
- [24] Gong J M, Lee D A, Schroeder J I. Long distance root to shoot transport of phytochelatins and cadmium in *Arabidopsis*. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 10118—10123.
- [25] Lee S, Moon J S, Ko T S, Petros D, Goldsbrough P B, Korban S S. Overexpression of *Arabidopsis* phytochelatin synthase paradoxically leads to hypersensitivity to cadmium stress. *Plant Physiol*, 2003, 131(2): 656—663.

参考文献:

- [1] 吴灵琼, 成水平, 杨立华, 吴振斌. Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对美人蕉的氧化胁迫及抗性机理研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1365~1369.
- [2] 李芳柏, 吴启堂. 无土栽培美人蕉等植物处理生活废水的研究. *应用生态学报*, 1997, 8(1): 88~92.
- [4] 付春平, 唐运平, 张志扬, 李江华, 李健, 陈双星, 关代宇. 美人蕉对泰达高含盐再生水景观河道水体净化效果研究. *灌溉排水学报*, 2005, 24(5): 70~73.
- [6] 安志装, 王校常, 严蔚东, 施卫明, 曹志洪. 植物螯合肽及其在重金属胁迫下的适应机制. *植物生理学通讯*, 2001, 37(5): 463~467.
- [7] 杨兵, 廖斌, 邓冬梅, 束文圣, 蓝崇钰. Cu^{2+} 对两种生态型鸭跖草 Cu 积累和抗氧化酶的影响. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 9~13.
- [9] 李合生, 孙群, 赵世杰. *植物生理生化试验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社, 2000. 125~128.
- [12] 张宗申, 利容千, 王建波. 草酸处理对热胁迫下辣椒叶片膜透性和钙分布的影响. *植物生理学报*, 2001, 27(2): 109~113.
- [14] 王忠全, 温琰茂, 黄兆霆, 李华升. 几种植物处理含重金属废水的适应性研究. *生态环境*, 2005, 14(4): 540~544.
- [15] 吴双桃. 美人蕉在镉污染土壤中的植物修复研究. *工业安全与环保*, 2005, 31(9): 13~15.
- [18] 刘建新, 胡浩斌, 赵国林. 干旱胁迫下多裂骆驼蓬(*Peganum multisectum* Bobr) 叶片乙烯释放和多胺含量变化与活性氧积累的关系. *生态学报*, 2008, 28(4): 1579~1585.
- [19] 刘登义, 王友保, 张徐祥, 司琴. 污灌对小麦幼苗生长及活性氧代谢的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1319~1322.
- [20] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd 、 Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响. *生态学报*, 1992, 12(2): 147~154.
- [22] 朱祝军, 喻景权, Gerendas J, Burkhard S. 氮素形态和光照强度对烟草的 H_2O_2 清除酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 379~385.