

麻疯树对镉胁迫的生理耐性及富集特征研究

李清飞¹, 仇荣亮^{2*}

(信阳师范学院城市与环境科学学院, 河南 信阳 464000; 2.中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要:研究了不同 Cd 浓度(0、10、25、50、100、200 mg·kg⁻¹)对麻疯树的生理指标和 Cd 积累特征的影响。结果表明,在土壤中的 Cd≤50 mg·kg⁻¹ 时,麻疯树的生长未受到明显影响($P>0.05$),当 Cd≥100 mg·kg⁻¹ 时,其生长受到明显抑制($P<0.05$);同时,麻疯树叶中叶绿素含量随土壤中 Cd 浓度的增加而下降,而其体内 Cd 含量则呈增加趋势,且表现根>茎>叶的富集特征;麻疯树叶中的 SOD、POD 活性随 Cd 浓度的增加呈先升高后降低趋势,而 CAT 活性仅在 Cd 为 200 mg·kg⁻¹ 时显著增加,麻疯树叶中的 MDA、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白、酸溶性巯基和谷胱甘肽含量随 Cd 浓度的增大呈增加趋势,这可在一定程度上缓解金属 Cd 对麻疯树的毒害。因此,麻疯树在重金属镉污染土壤修复方面具有一定的应用潜能。

关键词:麻疯树;生理反应;积累特征;镉

中图分类号:X503.235 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)01-0042-06

Cadmium Physiological Tolerance and Accumulation Characteristics of *Jatropha curcas* L.

LI Qing-fei¹, QIU Rong-liang^{2*}

(1. Department of Urban and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The physiological response to Cd and its accumulation characteristics of *Jatropha curcas* L. at different Cd treatments(0, 10, 25, 50, 100, 200 mg·kg⁻¹) were analysed. Although the biomass of *J. curcas* was no significant difference at Cd≤50 mg·kg⁻¹ in the soil, significantly decreased at Cd≥100 mg·kg⁻¹; With the increase of Cd concentration, the chlorophyll content of *J. curcas* were decreased, but the Cd content in the plant increased, which presented the following accumulation order of root> stem> leaf. With the Cd concentration increased, the antioxidant enzymes activities- Superoxide Dismutase(SOD), peroxidase(POD) was first increased and then decreased, while the Catalase(CAT) activity was clearly increased than the control at Cd = 200 mg·kg⁻¹; Contents of Malondialdehyde(MDA), proline, soluble protein, soluble sugar, acid thiol(SH) and glutathione(GSH) in the leaves was increased with increasing of Cd concentration, which reduced the Cd toxicity to the plant in certain extent. The results suggested *J. curcas* had a great potential in phytoremediation of cadmium polluted soils.

Keywords: *Jatropha curcas* L.; physiological response; accumulation characteristics; cadmium

麻疯树(*Jatropha curcas* L.)属于大戟科油料植物,广泛分布于热带和亚热带地区,具有较高的经济价值,叶、皮和种子可以入药,种子含油量在 40%~60%之间,可用于生产生物柴油;同时,麻疯树也是一种适应性较强的抗逆植物,具有耐强酸性、干旱、贫瘠和富集重金属等特点,是保水固土、防沙化、改良土壤

的优选树种之一^[1]。据报道,麻疯树对重金属具有一定耐性,在修复矿山重金属污染方面有很大的应用前景^[2-3]。然而,关于麻疯树对 Cd 胁迫的生理耐性及富集特征的相关报道较少。

本研究通过盆栽试验,探讨 Cd 胁迫下麻疯树的生理生化指标的变化规律,并对 Cd 在麻疯树体内富集特征进行了研究,为麻疯树修复 Cd 污染土壤提供借鉴和科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤采自中国科学院华南植物园试验场。其基本

收稿日期:2011-06-01

基金项目:国家 863 计划重点项目(2007AA061001);NFSC-广东联合基金项目(U0833004);河南省科技厅项目(112102310431);信阳师范学院博士科研启动基金

作者简介:李清飞(1980—),男,博士,讲师,从事环境保护的教学与研究工作。E-mail:liqingfei@yahoo.cn

* 通讯作者:仇荣亮 E-mail:eesqr@mail.sysu.edu.cn

理化性质:pH6.03, 有机含量为 $37.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总氮为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总磷为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总镉为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。麻疯树种子购于广西富民达生物有限公司。

1.2 试验方法

采用室内盆栽试验。将采集的土壤自然风干, 粉碎、搅拌均匀, 每盆土壤用量 2.5 kg , Cd 污染浓度设置为 $0, 10, 25, 50, 100, 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液形式均匀加入, 混合均匀后平衡 1 个月, 每个处理 3 次重复。种植前每盆都均匀施加 1 g 广东省农业科学院的农科牌复混肥料(15-6-12); 麻疯树种子经消毒后, 于营养土中育苗, 经 30 d 后选取大小一致、生长良好的三叶期实生幼苗移栽, 每盆移栽 1 棵, 温室中培养, 生长 6 个月后收获, 将植物分为叶、茎和根 3 部位, 先用自来水清洗干净, 再用去离子水冲洗数遍, 65°C 烘干, 称取生物量, 磨碎。收获前 2 d 分别剪取离代表性叶片顶端 3~5 cm 部位的样品, 测定麻疯树的各项生理生化指标。

1.3 测定方法

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性和可溶性蛋白、脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量参照李合生等^[4]的方法测定; 酸溶性巯基(SH)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量分别参照吴灵琼等^[5]和张宗申等^[6]的方法测定。

麻疯树植物样品采用硝酸-高氯酸(体积比为 4:1)消解法消解, Cd 含量用 ICP-OES(Optima 5300DV, Perkin-Elmer Instruments, USA)测定。以 ESP-1 西红柿叶(中国环境监测总站)进行质量控制, 质控样测定均值和平行样偏差都在规定要求范围内。

以上所有数据应用 SPSS11.5 软件中的 Duncan's 新复极差法(SSR)进行方差分析和在 $P=0.05$ 水平时的差异显著性检验; 相关性分析采用 Pearson 相关系

数, 并用双尾(Two-tailed)进行显著性检验。统计数据采用 Origin7.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 Cd 处理对麻疯树生物量的影响

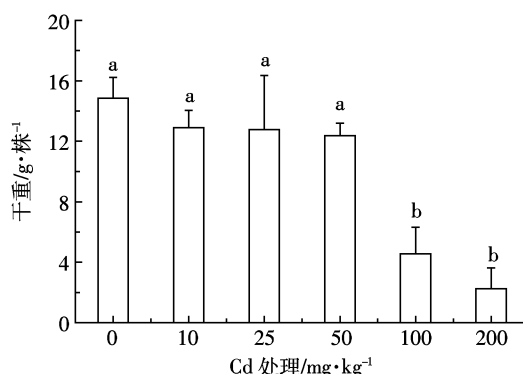
由图 1 可知, 麻疯树的生长在 Cd 浓度 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时未受到明显影响($P>0.05$), 而在 Cd 浓度 $\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其生长受到明显抑制($P<0.05$)。Cd 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的生物量分别比对照降低了 64.8%和 85.1%。

2.2 麻疯树体内 Cd 含量

由图 2 可知, 除对照中 Cd 含量未检出外, 其他处理的麻疯树叶、茎和根中 Cd 含量均随土壤 Cd 浓度的增加而增加; 当 Cd 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树各部位的 Cd 含量显著高于其他处理($P<0.05$)。麻疯树各部位的 Cd 含量分布规律为根>茎>叶, 其中根部 Cd 最高含量达 $347.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 Cd 处理对麻疯树叶中叶绿素含量的影响

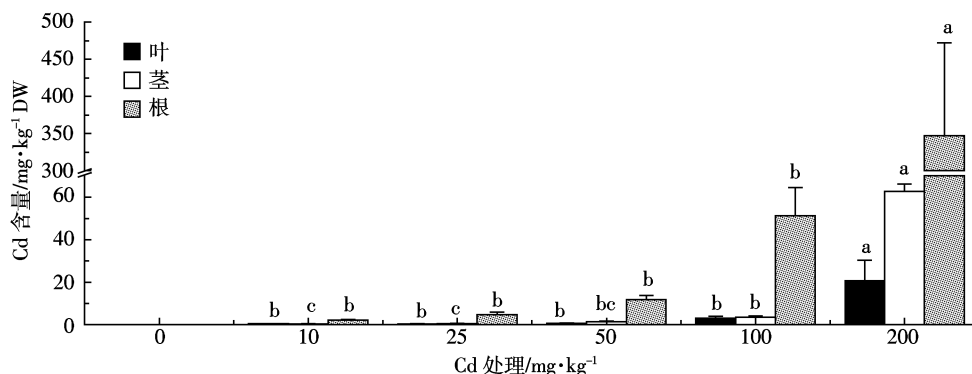
由表 1 可知, 麻疯树叶叶绿素含量随土壤 Cd 浓度



图中不同字母表示有显著性差异($P<0.05$), 下同

图 1 Cd 处理对麻疯树生物量的影响

Figure 1 Effect of Cd treatment on biomass of *J. curcas*



图中相同部位的不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)

图 2 麻疯树体内 Cd 含量

Figure 2 Cd content in the tissues of *J. curcas*

表 1 Cd 处理对麻疯树叶绿素含量的影响

Table 1 Effect of Cd treatment on chlorophyll content of *J. curcas*

处理/mg·kg ⁻¹	叶绿素含量/mg·g ⁻¹ FW			a/b
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素(a+b)	
0	1.60±0.17a	1.30±0.20a	2.90±0.36a	1.24±0.09a
10	1.35±0.04ab	1.07±0.06ab	2.42±0.07ab	1.26±0.08a
25	1.29±0.12b	1.07±0.12ab	2.37±0.24ab	1.20±0.06a
50	1.12±0.34bc	0.89±0.27bc	2.01±0.61bc	1.25±0.01a
100	0.93±0.06c	0.71±0.10c	1.63±0.15c	1.32±0.12a
200	0.42±0.04d	0.33±0.02d	0.76±0.05d	1.27±0.06a

注: 同一列中不同字母表示差异性显著($P<0.05$)。

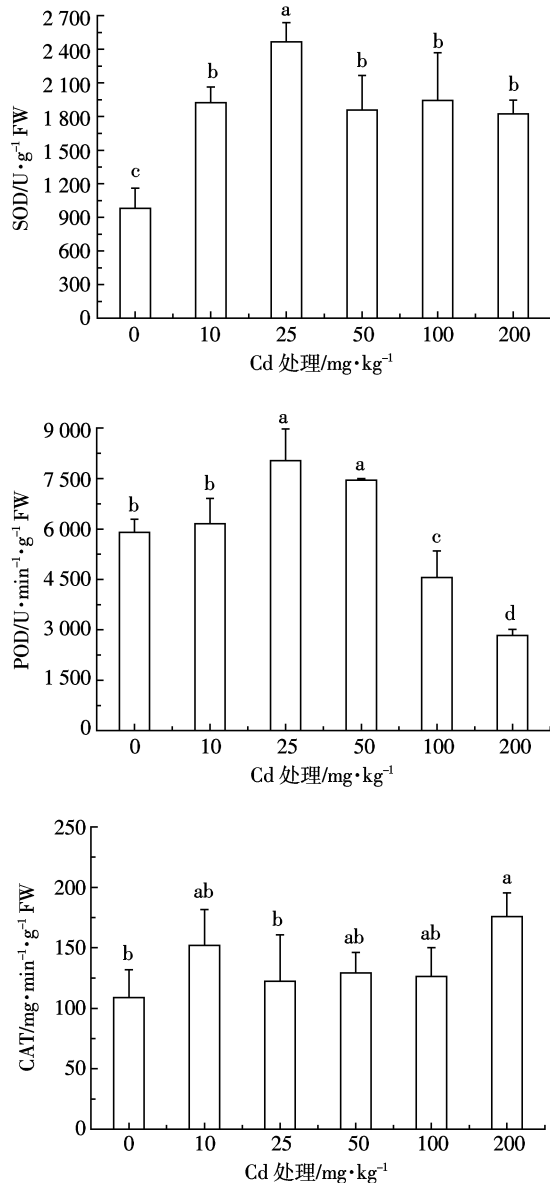


图 3 Cd 处理对麻疯树的抗氧化酶活性的影响

Figure 3 Effect of Cd treatment on antioxidant enzyme activities of *J. curcas*

的增加而降低。其中, 叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素 (a+b) 含量分别比对照降低 15.6%~73.8%、17.6%~74.6%、16.6%~73.8%; 且 Cd 浓度 ≥ 50 mg·kg⁻¹ 的处理与对照之间有显著性差异 ($P<0.05$)。而叶绿素组成 (a/b) 在 Cd 各处理之间无显著差异性 ($P>0.05$)。

2.4 Cd 处理对麻疯树的抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知, SOD 与 POD 变化规律相似, 即随 Cd 浓度的增加, 其活性呈现先增加后降低的趋势, 表明低浓度 Cd 促进 SOD 和 POD 活性增加, 高浓度 Cd 抑制 SOD 和 POD 的活性。在 Cd 浓度为 25 mg·kg⁻¹ 时 SOD 和 POD 活性最大, 分别比对照增加了 151% 和 36%; 而 CAT 活性在 Cd 浓度为 0~100 mg·kg⁻¹ 之间无显著差异 ($P>0.05$), 仅在 Cd 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 处理时比对照显著增加了 61.7%。

2.5 Cd 处理对麻疯树叶中 MDA 和脯氨酸含量的影响

由图 4 可知, 麻疯树叶中的 MDA 含量仅在 Cd 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 时比对照显著增加了 41.1% ($P<0.05$); 脯氨酸含量随 Cd 浓度的递增呈明显增加趋势 ($P<0.05$), 在 Cd 浓度为 200 mg·kg⁻¹ 时, 脯氨酸含量最大, 比对照增加 168.9%。

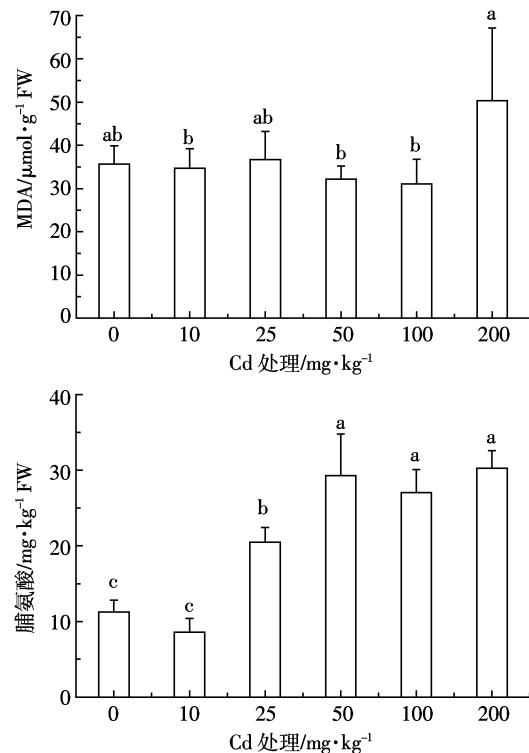


图 4 Cd 处理对麻疯树的 MDA 和脯氨酸含量的影响

Figure 4 Effect of Cd treatment on MDA and proline contents of *J. curcas*

2.6 Cd 处理对麻疯树叶中可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

由图 5 可知,随 Cd 处理浓度的增加,麻疯树叶中的可溶性蛋白和可溶性糖含量也呈增加的趋势。与对照相比,Cd 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶中的可溶性蛋白和可溶性糖含量最大,分别比对照显著增加了 357.6% 和 54.2%。

2.7 Cd 处理对麻疯树叶中酸性巯基和谷胱甘肽含量的影响

由图 6 可知,随 Cd 浓度的增加,麻疯树叶中酸性巯基(SH)和谷胱甘肽(GSH)含量呈明显增加趋势($P < 0.05$)。其中酸性巯基和谷胱甘肽含量在 Cd 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时最大,分别比对照显著增加了 58.3% 和 58.1% ($P < 0.05$)。

2.8 相关性分析

由表 2 可知,除麻疯树叶中 Cd 含量与 SOD 活性

和脯氨酸含量没有达到显著性相关外,其余均达到显著性正相关或负相关性,这说明其他生理指标均能很好地反映 Cd 胁迫状况。

3 讨论

植物对重金属的耐性需要其体内有一个复杂网络机制进行调控,以保护植物的代谢^[7]。本研究表明,随土壤 Cd 污染程度增加,麻疯树植株各部位 Cd 含量也增加,其中麻疯树根部重金属含量最高,达 $347.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这有利于减轻 Cd 对地上部分特别是叶片的毒害效应,这是植物耐受并缓解重金属毒害的重要策略^[8]。同时也引起麻疯树体内一系列生理指标发生适应性变化。

叶绿素含量和叶绿素 a/b 值是衡量叶片衰老的重要指标,也是影响植物光合作用和生物量的重要因素^[9]。在 Cd 处理中,当 Cd 浓度 $\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯

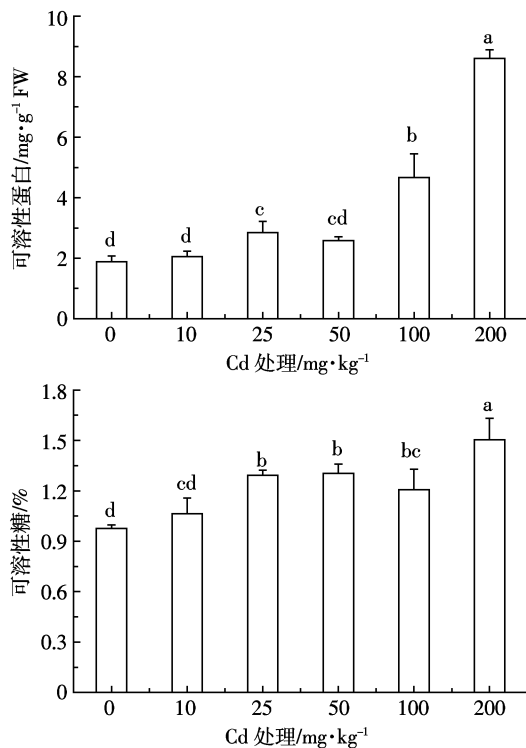


图 5 Cd 处理对麻疯树可溶性蛋白和可溶性糖的影响

Figure 5 Effect of Cd treatment on soluble protein and sugar content of *J. curcas*

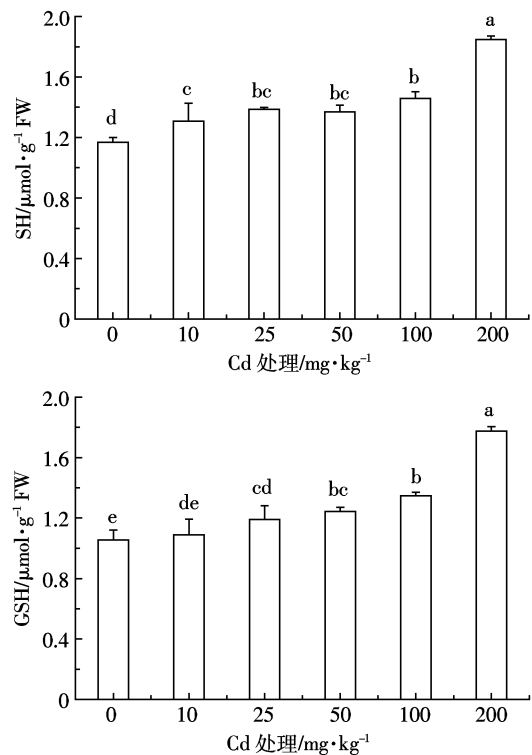


图 6 Cd 处理对麻疯树的酸性巯基及谷胱甘肽含量的影响

Figure 6 Effect Cd treatment on acid SH and GSH contents of *J. curcas*

表 2 Cd 处理下麻疯树叶片的 Cd 含量与其生理指标的相关性 ($n=18$)

Table 2 Correlations between physiological index and Cd content in leaves under Cd treatments

项目	SOD	POD	CAT	MDA	可溶性糖	可溶性蛋白	SH	GSH	脯氨酸	总叶绿素
Cd	0.015	-0.695**	0.621*	0.539*	0.533**	0.883**	0.856**	0.868**	0.442	-0.766**

注:“*”表示在 0.05 水平上显著相关,“**”表示在 0.01 水平上显著相关。

树的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量(a+b)大幅度下降(表 1),这表明 Cd 对麻疯树体内叶绿体结构造成了不可逆的伤害,由此造成生物量的显著下降。叶绿素(a/b)之间无显著性差异($P>0.05$),这表明 Cd 对麻疯树叶片捕光系统中色素的影响速率相似^[10]。

在重金属胁迫下,植物体内产生 O_2^- 、 H_2O_2 、 $\cdot OH$ 等活性氧类物质(ROS)而抑制植物的生长,植物将通过抗氧化酶(SOD、POD、CAT等)与非酶物质(SH、GSH等)消除活性氧类物质^[11-13]。在抗氧化酶中,SOD 是一种重要的活性氧防御酶,在消除 ROS 过程中起重要作用,SOD 能够将阴离子自由基(O_2^-)歧化成 H_2O_2 ,而 POD、CAT 能有效地清除 H_2O_2 ^[14]。在氧化胁迫下植物通过体内抗氧化酶活性,在一定范围内可以维持体内活性氧平衡^[7]。本研究中,随着 Cd 浓度增加,SOD 和 POD 活性先升高后降低,与严重玲等研究结果一致^[15],而 CAT 活性在 $0\sim 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间无显著差异($P>0.05$),但在高浓度($200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时其值显著升高(图 3),表明随 Cd 浓度升高,SOD 和 POD 酶系统平衡可能被破坏,累积的 H_2O_2 诱导 CAT 活性上升,同时 H_2O_2 与 O_2^- 反应生成 $\cdot OH$,导致细胞膜脂的过氧化,使得 MDA 含量增加(图 4),从而加速膜脂过氧化作用,使 MDA 含量和膜透性增加^[16]。

生物体在正常代谢过程中,可通过有机渗透效应调节物质的积累和分解来调节细胞渗透平衡以缓解重金属胁迫导致的伤害^[17]。在高浓度重金属胁迫下,植物会产生活性氧类物质(ROS),可通过提高体内脯氨酸含量来进行保护^[18],在 Cd 胁迫下,脯氨酸含量明显升高(图 4),说明脯氨酸的积累是麻疯树渗透调节的重要物质。而糖是调节渗透胁迫的小分子物质,在植物对胁迫的适应性调节中,是增加渗透性溶质的重要组成成分,同时糖为脯氨酸的合成提供碳骨架和能量来源^[17]。因此,随 Cd 浓度的增加,引起脯氨酸的积累和糖合成的增加(图 5)。

可溶性蛋白质大多是参与植物体内各种代谢的酶类,其含量可以反映植物体的总代谢状况^[19]。在胁迫情况下,游离脯氨酸和可溶性蛋白同步增加,在游离脯氨酸和蛋白质代谢损伤之间不存在任何相关性^[20]。本研究中随 Cd 浓度增加,可溶性蛋白质含量也增加(图 5),这与 Zhu 等报道结果相似^[21],可能是诱导了胁迫蛋白,提高了麻疯树对 Cd 胁迫的抗性。

植物对重金属的耐性与巯基和谷胱甘肽浓度相关^[22]。本研究酸性巯基和谷胱甘肽含量随 Cd 浓度增加而增加,且与麻疯树叶中 Cd 含量呈显著正相关

性(表 2),表明巯基和谷胱甘肽在 Cd 解毒中起着关键作用。

4 结论

(1)土壤中的 Cd 浓度 $\leq 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树的生长未受到明显影响($P>0.05$),当 Cd 浓度 $\geq 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其生长受到明显抑制($P<0.05$);同时,麻疯树叶叶绿素含量随 Cd 浓度的增加而下降,而叶绿素 a/b 没有显著变化。

(2)麻疯树叶、茎和根中的 Cd 含量随土壤中 Cd 浓度的升高而增加,并呈现根>茎>叶的富集特征。

(3)随 Cd 浓度增加,SOD、POD 的活性呈先升高后降低趋势,而 CAT 活性仅在 Cd 浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时才显著增加($P<0.05$);麻疯树叶中 MDA、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白、酸性巯基和谷胱甘肽含量呈现增加趋势,这可在一定程度上缓解重金属 Cd 对麻疯树的毒性。

参考文献:

- [1] 李清飞,仇荣亮,石宁,等. 矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦条件研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1733-1739.
LI Qing-fei, QIU Rong-liang, SHI Ning, et al. Remediation of strongly acidic mine soils contaminated by multiple metals by plant reclamation with *Jatropha curcas* L. and addition of limestone[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1733-1739.
- [2] 李清飞,周小勇,仇荣亮,等. 麻疯树复垦酸性矿山废弃地及其生长影响因子研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 172-176.
LI Qing-fei, ZHOU Xiao-yong, QIU Rong-liang, et al. Phytoremediation of acid mining wasteland with *Jatropha curcas* L. and factors affecting growth of the plant[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 172-176.
- [3] 杜瑞英,柏珺,王诗忠,等. 多金属污染土壤中微生物群落功能对麻疯树-化学联合修复的响应[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 575-582.
DU Rui-ying, BAI Jun, WANG Shi-zhong, et al. Response of soil microbial community function to chemical-aided remediation of multi-metal contaminated soils using *Jatropha curcas*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 575-582.
- [4] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie, et al. Plant physiological and biochemical principles and techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [5] 吴灵琼,成水平,杨立华,等. Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对美人蕉的氧化胁迫及抗性机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1365-1369.
WU Ling-qiong, CHENG Shui-ping, YANG Li-hua, et al. Stress responses and resistance mechanism of *Canna indica* Linn. to cadmium and copper[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):

- 1365-1369.
- [6] 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[J]. 植物生理学报, 2001, 27(2): 109-113.
- ZHANG Zong-shen, LI Rong-qian, WANG Jian-bo. Effects of oxalate treatment on the membrane permeability and Calcium distribution in pepper leaves under heat stress[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2001, 27(2): 109-113.
- [7] 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.
- [8] Kabata-pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [9] 曾 斌, 赵 鹏, 朱 诚, 等. 水稻突变体对土壤汞胁迫耐性机理的初步研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(1): 57-64.
- ZENG Bin, ZHAO Peng, ZHU Cheng, et al. Preliminary research on tolerance mechanisms of rice mutant to soil Hg stress[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2008, 34(1): 57-64.
- [10] Liu N, Peng C L, Lin Z, et al. Changes in photosystem II activity and leaf reflectance features of several subtropical woody plants under stimulated SO₂ treatment[J]. *Journal of Integrative Biology*, 2006, 48(11): 1274-1286.
- [11] 刘可慧, 于方明, 李明顺, 等. 镉胁迫对小白菜 (*Brassica campestris* L.) 抗氧化机理的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1466-1470.
- LIU Ke-hui, YU Fang-ming, LI Ming-shun, et al. Responses and resistance mechanism of *Brassica campestris* L. to cadmium stress[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1466-1470.
- [12] 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 镉对白菜活性氧代谢及 H₂O₂ 清除系统的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 2012-2015.
- SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi. Effects of different cadmium levels on active oxygen metabolism and H₂O₂-scavenging system in *Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 2012-2015.
- [13] 方晓航, 曾晓雯, 于方明, 等. Cd 胁迫对白菜生理特征及元素吸收的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 25-29.
- FANG Xiao-hang, ZENG Xiao-wen, YU Fang-ming, et al. Physiological characteristic and uptake of Cd, nutritious elements in cabbage grown on Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 25-29.
- [14] 于方明, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等. 不同 Cd 水平对小白菜叶片抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 950-954.
- YU Fang-ming, QIU Rong-liang, HU Peng-jie, et al. Effects of different cadmium levels on the antioxidative enzymes activities of leaf in *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 950-954.
- [15] 严重玲, 洪业汤. Cd, Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-492.
- YAN Chong-ling, HONG Ye-tang. Effect of Cd, Pb Stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecological Sinica*, 1997, 17(5): 488-492.
- [16] Romero-Puertas M C, McCarthy I, Sandalio L M. Cadmium toxicity and oxidative metabolism of pea leaf peroxisomes[J]. *Free Radical Research*, 1999, 31: 25-31.
- [17] 肖 强, 郑海雷, 陈 瑶, 等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 373-376.
- XIAO Qiang, ZHENG Hai-lei, CHEN Yao, et al. Effects of salinity on the growth and proline, soluble sugar and protein contents of *Spartina alterniflora*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 373-376.
- [18] 周 青, 黄晓华, 刘小林. 酸雨对 3 种木本植物的胁迫效应[J]. 环境科学, 2002, 23(5): 42-46.
- ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua, LIU Xiao-lin. Stress effects of simulant acid rain on three woody plants[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(5): 42-46.
- [19] 王 欣, 刘云国, 艾比布·努扎艾提, 等. 苧麻对镉毒害的生理耐性机制及外源精胺的缓解效应 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 487-493.
- WANG Xin, LIU Yun-guo, Aibibu·Nuzhaaiti, et al. Endurance mechanism of ramie to Cd and the alleviating effect of exogenous spermine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 487-493.
- [20] Pedrol N, Ramos P, Reigosa M J. Phenotypic plasticity and acclimation to water deficits in velvet-grass: A long-term greenhouse experiment. Changes in leaf morphology, photosynthesis and stress-induced metabolites[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2000, 157(4): 383-393.
- [21] Zhu Y L, Pilon-Smits E A H, Tarun A S, et al. Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing γ -Glutamylcysteine synthetase[J]. *Plant Physiology*, 1999, 121: 1169-1177.
- [22] Pérez-Rama M, Alonso J A, López C H, et al. Cadmium removal by living cells of the marine microalga *Tetraselmis suecica*[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84: 265-270.
- [23] Chandra R, Bharagava R N, Yadav S, et al. Accumulation and distribution of toxic metals in wheat (*Triticum aestivum* L.) and Indian mustard (*Brassica campestris* L.) irrigated with distillery and tannery effluents [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2-3): 1514-1521.