

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.05.020

## 重金属镉(Cd)胁迫下4种林木幼苗生长初期的生理生化响应

罗艳<sup>1</sup>,李裕冬<sup>1</sup>,姚民<sup>2</sup>,罗晓波<sup>1,3\*</sup>,王琼瑶<sup>1</sup>

(1.四川省自然资源科学研究院,四川成都 610024;2.四川大学生命科学学院,四川成都 610064;

3.峨眉山生物资源实验站,四川峨眉山 614201)

**摘要:**为研究4种乡土木本植物(五小叶槭 *Acer pentaphyllum*、红椿 *Toona ciliata*、桤木 *Alnus cremastogyne*、云南松 *Pinus yunnanensis*)幼苗生长对Cd胁迫的应对机制,本研究分析了这4种乡土木本植物幼苗在不同镉浓度(分别添加0~100 mg·L<sup>-1</sup>氯化镉溶液)胁迫下的外部形态、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽(GSH)、丙二醛(MDA)和叶绿素(CHL)含量的变化。结果显示:外部形态方面,五小叶槭和桤木的地下部分长度显著下降,红椿地上部分显著下降,云南松地上和地下部分均无显著变化;SOD活性方面,五小叶槭、红椿、桤木和云南松总体均随Cd浓度的增加显著增加;CAT活性方面,五小叶槭、红椿和云南松总体上随Cd浓度的增加显著增加,桤木仅Cd浓度为100 mg·kg<sup>-1</sup>时显著高于对照组;POD活性方面,五小叶槭、红椿、桤木和云南松总体上均随Cd浓度的增加显著增加;GSH方面,随着Cd浓度的增加,五小叶槭和云南松总体呈显著减少趋势,红椿和桤木略有减少;MDA和CHL含量方面,4种林木总体均表现为在高浓度Cd胁迫时显著下降,低浓度时则各有不同。总体上,在镉胁迫环境下这4种林木幼苗在生理生态方面发生了明显变化,并表现出较好的低浓度耐受性。

**关键词:**镉胁迫;林木;幼苗;抗氧化系统

中图分类号:Q14;S723.1 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2018)05-0087-06

## Physiological and Biochemical Responses of Forest Tree Seedlings of 4 Species at the Early Growth Stage under Heavy Metal Cadmium (Cd) Stress

LUO Yan<sup>1</sup> LI Yu-dong<sup>1</sup> YAO Min<sup>2</sup> LUO Xiao-bo<sup>1,3\*</sup> WANG Qiong-yao<sup>1</sup>

(1. Sichuan Provincial Academy of Natural Resource Sciences, Chengdu 610024, China;

2. Emei Mountain Resource Experimental Station, Mount Emei 614201, China;

3. College of Life Sciences Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In order to study the response mechanism in the early stage of seedling growth under Cd stress, the changes of physiological and biochemical indexes were analyzed, which included external morphology, activities of superoxide dismutase (SOD), Peroxidase (POD) catalase (CAT), contents of glutathione (GSH), malondialdehyde (MDA) and chlorophyll (CHL) in 4 kinds of native woody plants (*Acer pentaphyllum*, *Toona ciliata*, *Alnus cremastogyne*, *Pinus yunnanensis*). The results were showed as below. In terms of external morphology, the underground length of *Acer pentaphyllum* and *Alnus cremastogyne* decreased significantly, and the upper part of *T. ciliata* dropped significantly, and there was no significant

收稿日期:2018-07-02

基金项目:四川省基本科研业务费项目“重金属镉污染土壤的植物修复研究(2016YSKY0014)”；四川省科技计划项目“攀西矿区植物与微生物协同修复土壤关键技术研究(2017SZ0087)”；四川省科技计划项目“五小叶槭种质资源抢救性收集、保存、繁育研究(2014NZ0109)”。

作者简介:罗艳(1979-),女,湖南黔阳人,副研究员,研究方向为生态系统生态学。

\*通讯作者:罗晓波(1971-),男,研究员,主要从事野生动植物保护、园林植物与观赏园艺、资源植物开发与利用等方面研究。e-mail:aaaaluoxiaobo@163.com。

change for the ground and underground parts of *P. yunnanensis*. In SOD activity, *Acer pentaphyllum*, *T. ciliata*, *Alnus cremastogyne* and *P. yunnanensis* increased significantly with the increase of Cd concentration. As for CAT activity, *Acer pentaphyllum*, *T. ciliata* and *P. yunnanensis* increased significantly with the increase of Cd concentration, while *Alnus cremastogyne* was significantly higher than that of control group only when Cd concentration was  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . In POD activity, *Acer pentaphyllum*, *T. ciliata*, *Alnus cremastogyne* and *P. yunnanensis* increased significantly with the increase of Cd concentration. On the GSH side, with the increase of Cd concentration, the contents of *Acer pentaphyllum* and *P. yunnanensis* decreased significantly, and *T. ciliata* and *Alnus cremastogyne* were not significantly reduced. In terms of MDA and CHL content, these 4 kinds of forest trees showed a significant decrease in high concentration Cd stress, but varied in low concentration. In general, under the stress of cadmium, the seedlings of these 4 kinds of trees changed significantly in terms of physiology and ecology, and showed good tolerance in low concentration.

**Key words:** Cadmium stress, Forest trees, Seedling, Antioxidant system

矿物开采、煤和原油的燃烧以及农业施肥等是土壤重金属镉(Cd)的主要来源<sup>[1-3]</sup>。镉会引起水环境恶化,土壤肥力退化和农作物产量及品质下降,也能通过食物链进入人体,直接影响和危及人类的健康<sup>[4]</sup>。当镉以  $\text{Cd}^{2+}$  及其络合物形式存在时,极易被植物吸收并积累<sup>[5]</sup>。利用生长迅速、生物量大、根系发达的木本植物来进行镉污染土壤修复,具有价格低廉、无二次污染等优点,是镉污染土壤修复的研究热点之一<sup>[4-10]</sup>。

Cd是四川省土壤重金属污染的主要特征污染物,尤以攀西地区、成都平原区和川南地区等部分区域污染为重。研究发现,4种乡土木本植物(云南松 *Pinus yunnanensis*、桤木 *Alnus cremastogyne*、红椿 *Toona ciliata*、五小叶槭 *Acer pentaphyllum*)的种子及其幼苗生长初期均表现出较高的低浓度Cd耐受性<sup>[11]</sup>,但它们对Cd胁迫的生理生化响应机制仍未明确。活性氧(ROS)是植物代谢过程中的毒副产品,在稳定条件下,可以通过各种抗氧化防御机制清除<sup>[12]</sup>。在逆境胁迫下,ROS的过多积累会对植物产生伤害<sup>[13]</sup>,而植物体内存在的抗氧化机制可以在一定程度上减缓这种伤害。植物体内具有清除ROS的抗氧化系统,包括抗氧化酶和抗氧化剂系统。抗氧化酶主要包含超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等<sup>[14]</sup>,而抗氧化剂以谷胱甘肽为代表<sup>[15]</sup>。因此,本研究分析了4种乡土木本植物幼苗叶片生长初期抗氧化系统对Cd胁迫的响应,并分析了Cd胁迫下其膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)和叶绿素(CHL)含量的变化,以期从生理生态学角度进一步探讨Cd胁迫下这4种乡土木本植物的应对机制。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料

研究实验于2017年10—11月在成都进行,4种林木的幼苗由其种子萌发而来<sup>[11]</sup>,培养于装有灭菌蛭石的大小规格一致的培养容器中,培养时间为2个月。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验设计

4种林木的幼苗在光照培养箱(光周期12 h/12 h,  $20^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$ (光/暗比),湿度80%)培养。每周1次给幼苗加入  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (标记为5Cd,下同)、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (标记为25Cd,下同)、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (标记为50Cd,下同)、 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (标记为75Cd,下同)、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (标记为100Cd,下同)的氯化镉溶液,该溶液用分析纯  $\text{CdCl} \cdot 22.5\text{H}_2\text{O}$  配制,以等量蒸馏水培养作对照(标记为CK,下同)。

随机采取新鲜叶片0.5 g放入研钵,加入2 mL  $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH值7.8的磷酸缓冲液冰浴研磨,匀浆倒入10 mL离心管中,再加3 mL于研钵中冲洗研钵后倒入离心管,  $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  冷冻离心20 min,上清液倒入试管中置于  $0 \sim 4^\circ\text{C}$  下保存待用。然后,将幼苗植株与土壤分离,去离子水洗净晾干,用直尺测量幼苗地上和地下部分长度。

#### 1.2.2 测定指标与方法

SOD活性采用氮蓝四唑法<sup>[16]</sup>;CAT活性采用紫外分光光度法<sup>[17]</sup>;POD活性采用愈创木酚法<sup>[18]</sup>;MDA采用硫代巴比妥酸(TBA)加热比色法<sup>[18]</sup>;还原型谷胱甘肽(GSH)用分光光度计法<sup>[16]</sup>;

叶绿素(CHL)含量采用分光光度计法<sup>[18]</sup>。

### 1.2.3 数据处理及方差分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 进行数据处理和图表分析,并采用 SPSS13.0 软件进行统计。利用真实显著性差异(Tukey's HSD,方差具有齐次性时)和塔姆黑尼检验(Tamhane's T2,方差不齐时)进行差异显著性检验。显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd 对幼苗形态的影响

由表 1 可知,随着 Cd 浓度的升高,不同物种具

有不同的表现:(1)五小叶槭的地上长度略增,在 100Cd 时其平均值为对照组的 117.6% ( $P > 0.05$ );地下长度在 25Cd 时则显著降低 ( $P < 0.05$ ),在 100Cd 时其平均值仅为对照组的 31.0% ( $P < 0.05$ )。(2)红椿的地上长度显著下降,在 100Cd 时其平均值为对照组的 77.8% ( $P < 0.05$ );地下长度无明显变化。(3)桤木的地上长度略有增加,在 100Cd 时其平均值为对照组的 111.5% ( $P > 0.05$ );地下长度显著减少,在 100Cd 时其平均值为对照组的 41.4% ( $P < 0.05$ )。(4)云南松的地上和地下部分在不同浓度的镉胁迫下有所波动,但总体影响不大。

表 1 不同浓度镉胁迫对 4 种林木幼苗形态的影响

| 处理    | 五小叶槭                   |                          | 红椿                      |                         | 桤木                     |                        | 云南松                     |                         |
|-------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|       | 地上长度                   | 地下长度                     | 地上长度                    | 地下长度                    | 地上长度                   | 地下长度                   | 地上长度                    | 地下长度                    |
| CK    | 5.1 ± 0.6 <sup>a</sup> | 24.2 ± 4.2 <sup>a</sup>  | 5.4 ± 0.5 <sup>a</sup>  | 10.6 ± 2.1 <sup>a</sup> | 2.6 ± 0.4 <sup>a</sup> | 2.9 ± 1.0 <sup>a</sup> | 4.0 ± 0.4 <sup>a</sup>  | 2.4 ± 0.6 <sup>a</sup>  |
| 5Cd   | 5.1 ± 0.6 <sup>a</sup> | 20.1 ± 3.4 <sup>ab</sup> | 5.0 ± 0.7 <sup>ab</sup> | 11.0 ± 2.1 <sup>a</sup> | 3.0 ± 0.3 <sup>a</sup> | 2.0 ± 0.6 <sup>b</sup> | 4.6 ± 0.4 <sup>b</sup>  | 2.8 ± 0.9 <sup>ab</sup> |
| 25Cd  | 5.5 ± 0.7 <sup>a</sup> | 19.5 ± 4.1 <sup>b</sup>  | 4.5 ± 0.7 <sup>b</sup>  | 10.7 ± 6.2 <sup>a</sup> | 2.8 ± 0.4 <sup>a</sup> | 1.9 ± 0.6 <sup>b</sup> | 4.3 ± 0.5 <sup>ab</sup> | 3.1 ± 0.8 <sup>ab</sup> |
| 50Cd  | 5.2 ± 1.2 <sup>a</sup> | 13.4 ± 3.7 <sup>c</sup>  | 4.7 ± 0.7 <sup>ab</sup> | 10.9 ± 3.2 <sup>a</sup> | 3.0 ± 0.3 <sup>a</sup> | 1.8 ± 0.3 <sup>b</sup> | 4.3 ± 0.5 <sup>ab</sup> | 3.6 ± 0.9 <sup>b</sup>  |
| 75Cd  | 5.5 ± 0.8 <sup>a</sup> | 8.0 ± 1.0 <sup>d</sup>   | 4.3 ± 0.7 <sup>b</sup>  | 11.5 ± 4.5 <sup>a</sup> | 2.8 ± 0.2 <sup>a</sup> | 1.5 ± 0.5 <sup>b</sup> | 4.0 ± 0.6 <sup>ab</sup> | 3.1 ± 0.8 <sup>ab</sup> |
| 100Cd | 6.0 ± 0.3 <sup>a</sup> | 7.5 ± 2.1 <sup>d</sup>   | 4.2 ± 0.5 <sup>b</sup>  | 11.4 ± 4.8 <sup>a</sup> | 2.9 ± 0.4 <sup>a</sup> | 1.2 ± 0.4 <sup>b</sup> | 4.0 ± 0.2 <sup>a</sup>  | 3.2 ± 0.9 <sup>ab</sup> |

注:表中数据为平均值 ± 标准差, N = 9;每一元素相同列同一字母代表无显著差异 ( $p > 0.05$ ),不同字母代表差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.2 Cd 对幼苗叶片抗氧化系统的影响

随着 Cd 浓度的升高,4 种林木幼苗叶片的 CAT 活性、SOD 活性、POD 活性以及 GSH 活性均有所增加(见图 1),具体表现为:(1)SOD 活性方面,五小叶槭、红椿和桤木均随 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值比对照组分别高 56.8%、253.2% 和 93.3%;云南松在 5Cd 时与对照组差异不显著,此后随 Cd 浓度的增加而显著增高,100Cd 时其平均值比对照组高 66.0%。(2)CAT 活性方面,五小叶槭和红椿随 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值比对照组分别高 41.9% 和 35.1%;桤木仅 100Cd 时显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ),较对照组高 36.1%;云南松在 5Cd 时与对照组差异不显著,此后随 Cd 浓度的增加而显著增加,100Cd 时其平均值比对照组高 93.6%。(3)POD 活性方面,五小叶槭、红椿和桤木均随 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值比对照组分别高 67.7%、88.1% 和 191.4%;云南松在 5Cd 时与对照组差异不显著,此后随 Cd 浓度的增加而显著增加,100Cd 时其平均值比对照组高 40.9%。(4)GSH 方面,随着 Cd 浓度的增加,五小叶槭和云南松总体呈减少趋势 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值比对照组分别减少 31.3% 和 44.3%;红椿和桤木

略有减少 ( $P > 0.05$ ),与对照组相比,减少幅度分别为 22.2% 和 20.9%。

### 2.3 Cd 对幼苗叶片 MDA 含量的影响

随着 Cd 浓度的增加,4 种林木叶片的 MDA 含量均有所增加(见图 2),但具体表现有所不同:(1)五小叶槭的 MDA 含量在 5Cd 时略增 ( $P > 0.05$ ),此后随着 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值比对照组高 11.6%。(2)红椿的 MDA 含量在低于 50Cd 时较对照组略增 ( $P > 0.05$ ),此后随着 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时比对照组高 17.8%。(3)桤木的 MDA 含量在低于 75Cd 时较对照组略增 ( $P > 0.05$ ),此后随着 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时比对照组高 10.1%。(4)云南松的 MDA 含量在低于 25Cd 时较对照组略增 ( $P > 0.05$ ),此后随着 Cd 浓度的增加显著增加 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时比对照组高 35.0%。

### 2.4 Cd 对幼苗叶片 CHL 含量的影响

随着 Cd 浓度的增加,4 种林木叶片的叶绿素含量均有所下降(见图 3),但具体表现有所不同:(1)五小叶槭的叶绿素含量显著下降 ( $P < 0.05$ ),100Cd 时其平均值仅为对照组的 51.0%。(2)红椿在低于 75Cd 时其叶绿素含量均较对照组略降 ( $P > 0.05$ ),此后随着 Cd 浓度的增加叶绿素含量显著降低 ( $P <$

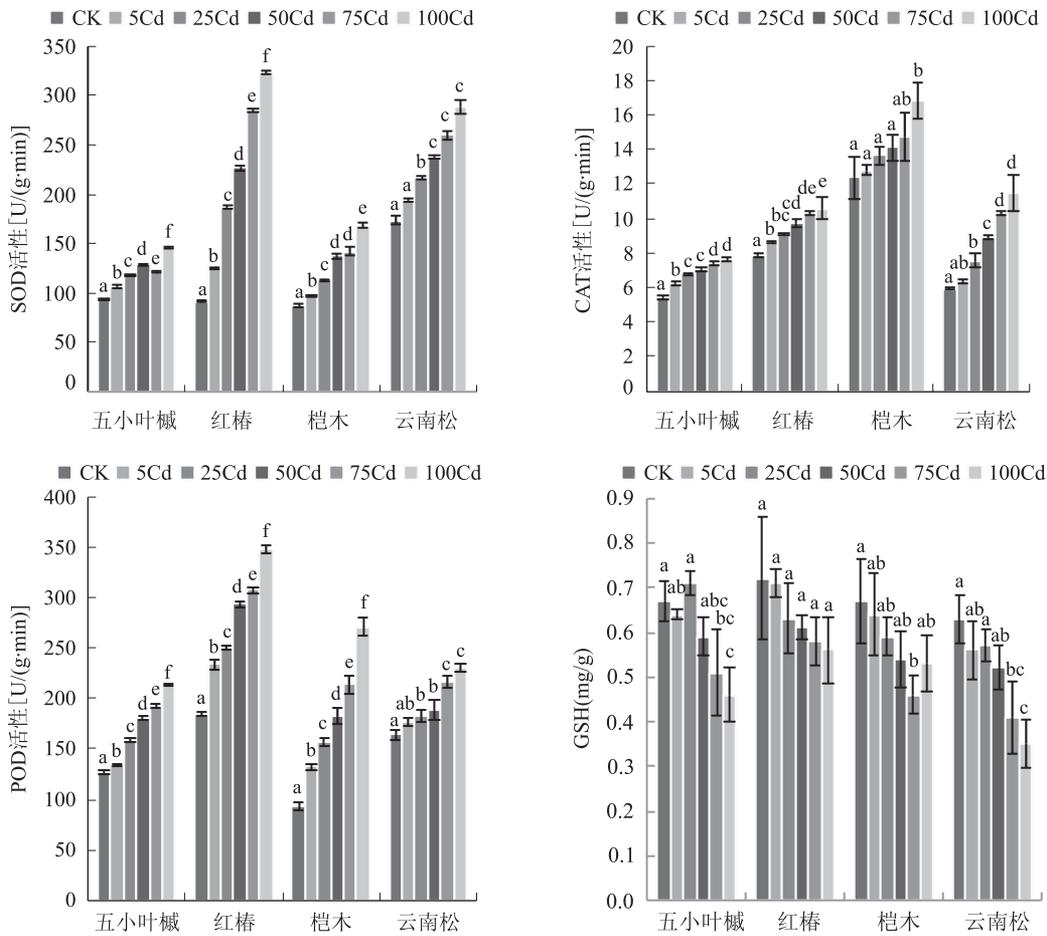


图1 不同浓度镉胁迫下4种林木幼苗的抗氧化系统响应(N=3)

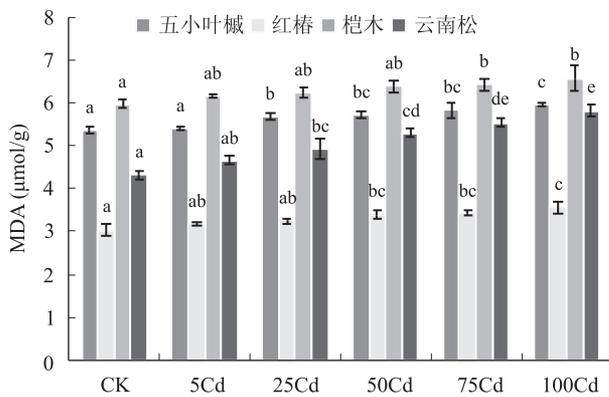


图2 不同浓度镉胁迫下4种林木幼苗叶片的MDA量(N=3)

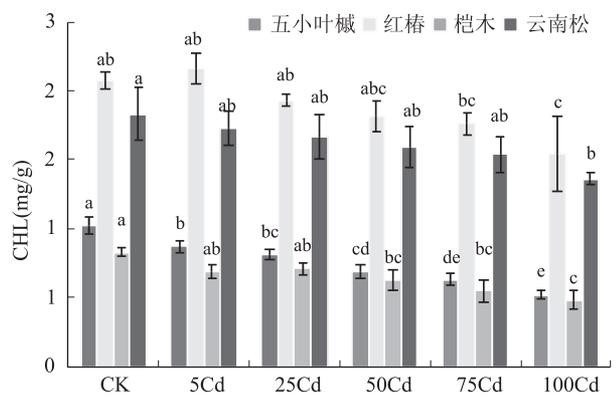


图3 不同浓度镉胁迫下4种林木幼苗叶片的CHL含量(N=3)

0.05), 100Cd 时叶绿素含量为对照组的 74.0%; (3) 桉木在低于 50Cd 时其叶绿素含量均较对照组略降 ( $P > 0.05$ ), 此后随着 Cd 浓度的增加叶绿素含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 100Cd 时叶绿素含量为对照组的 57.8%; (4) 云南松在低于 100Cd 时, 其叶绿素含量均较对照组略降 ( $P > 0.05$ ), 此后随着 Cd 浓

度的增加叶绿素含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 100Cd 时叶绿素含量为对照组的 74.3%。

### 3 讨论与结论

为了适应镉胁迫的环境, 保证体内产生与清除

活性氧自由基的物质平衡,本研究中4种乡土树木(五小叶槭、红椿、桉木和云南松)幼苗植物从外部形态到内部的生理生化过程均发生了变化。

外部形态上,镉胁迫下五小叶槭和桉木均表现出地下部分受毒害,长度显著下降的现象。为了弥补地下部分的损失,这两种植物的地上部分可能存在代偿性的增长。红椿的表现与之相反,推测可能有大量的镉进入红椿的地上部分并对其造成一定的毒害。云南松表现出良好的耐受性,地上和地下的长度均未出现显著变化。

抗氧化系统方面,从原理上来说,环境胁迫使植物体内产生与清除活性氧自由基的平衡机制被打破,形成抗氧化胁迫(antioxidative stress),植物细胞能利用抗氧化酶来调节氧化还原平衡。抗氧化系统越活跃则抗性越强<sup>[19,20]</sup>。SOD作为植物体内清除活性氧自由基的关键酶,能将细胞中产生的歧化为H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>[21]</sup>,其活性增加能增强植物在逆境下的抵抗力<sup>[22]</sup>,可能在保护系统中处于核心位置;而POD和CAT两种酶反映了植物生理生化代谢及生长发育情况,也可作为植物抗性大小的标志之一<sup>[23]</sup>。在本研究中,总体上SOD、CAT和POD的活性均随Cd浓度的增加而增加,显示出镉胁迫下抗氧化酶系统产生了积极的响应,有利于植物适应镉胁迫环境;SOD活性、CAT活性和POD活性分别以红椿、桉木和云南松的增加为最多,表明4种林木体内的抗氧化酶系统对于镉胁迫的响应机理可能存在差异。GSH能与 $\alpha$ -生育酚协同作用于清除细胞中的自由基<sup>[24]</sup>,在植物细胞清除活性氧的过程中具有重要作用<sup>[15]</sup>。本研究中4种林木叶片的GSH总体均随Cd浓度的增加而减少,表明对于4种林木而言,内源GSH对其逆境适应性可能未起到积极作用。

MDA是膜脂过氧化的产物,是反映膜伤害和细胞膜脂过氧化的重要指标<sup>[25,26]</sup>。本研究结果显示,低浓度的Cd胁迫下这4种幼苗适应良好,MDA含量未发生显著变化;较高浓度Cd胁迫下,云南松受到的影响最大,其它3种幼苗受到的影响较小。

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,其含量变化与光合作用密切相关<sup>[27,28]</sup>。Cd<sup>2+</sup>一方面可能通过与叶绿体中蛋白质的巯基(-SH-)结合,破坏叶绿体的结构和功能,最终导致叶绿素的降解<sup>[29]</sup>;另一方面,Cd<sup>2+</sup>还可以通过抑制卡尔文循环相关的酶活性和使气孔部分关闭等途径,直接或间

接影响植物的光合作用<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,五小叶槭的叶绿素对Cd胁迫最为敏感,其次是桉木,而红椿和云南松叶片的叶绿素含量在低浓度的Cd胁迫下无显著变化。

总体上,在镉胁迫环境下这4种林木幼苗在生理生态方面发生了明显变化,并表现出较好的低浓度耐受性;在高浓度Cd胁迫下,红椿和云南松的耐受能力可能更好。

#### 参考文献:

- [1] 刘翠华,依艳丽,张大庚,等. 葫芦岛锌厂周围土壤镉污染现状研究[J]. 土壤通报,2003,34(4):326~329.
- [2] 刘玉机,房聚燕,刘绮等. 辽宁省环境重金属研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [3] 王济,王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2005,23(2):113~120.
- [4] 李彦奇,关东明,陈陆霞,等. 镉污染植物修复技术[J]. Bioprocess,2014,04(04):61~66.
- [5] 向涛. 草本花卉对镉污染土壤修复研究[D];重庆大学,2014.
- [6] 陈良华,徐睿,杨万勤,等. 镉污染条件下香樟和油樟对镉的吸收能力和耐性差异[J]. 生态环境学报,2015,2):316~322.
- [7] 黄会一,蒋德明. 木本植物对土壤中镉的吸收,积累和耐性[J]. 中国环境科学,1989,9(5):323~330.
- [8] 李橙. 利用绿化苗木修复Cd污染土壤研究[D];河北农业大学,2011.
- [9] 李金花,何燕,段建平,等. 107杨对土壤重金属的吸收和富集[J]. 林业科学研究,2012,25(1):65~70.
- [10] 杨园,王良梅. 杨树对镉胁迫的响应及抗性机制研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(4):29~34.
- [11] 罗艳,李裕冬,罗晓波,等. 重金属镉对4种林木种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 四川林业科技,2018,39(2):7~12.
- [12] 吴永波,叶波. 高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J]. 生态学报,2016,36(2):403~410.
- [13] Low P, Merida J. The oxidative burst in plant defense: Function and signal transduction[J]. Physiologia Plantarum,2010,96(3):533~542.
- [14] 刘家忠,龚明. 植物抗氧化系统研究进展[J]. 云南师范大学学报:自然科学版,1999,6):1~11.
- [15] 陈少裕. 植物谷胱甘肽的生理作用及其意义[J]. 植物生理学通讯,1993,29(3):210~214.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 高等教育出版社,2006.
- [17] 赵世杰,史国安,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [18] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 四川出版集团,2003.
- [19] Younis M, Hasaneen M, Tourky S. Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress conditions. XXIV. Salinity-biofertility interactive effects on proline, glycine and various antioxidants

- in *Lactuca sativa* [J]. *Protoplasma*, 2009, 2(5):197~205.
- [20] 邓旭,王娟,谭济才.外来入侵种豚草对不同环境胁迫的生理响应[J].植物生理学报,2010,46(10):1013~9.
- [21] 王敬华,张立芳,施国新,等.镍添加对水鳖(*Hydrocharis dubia*)叶片镍和营养元素含量以及氧化胁迫和抗氧化系统的影响[J].湖泊科学,2016,28(3):599~608.
- [22] Prashanth S, Sadhasivam V, Parida A. Over expression of cytosolic copper/zinc superoxide dismutase from a mangrove plant *Avicennia marina* in indica rice var Pusa Basmati - 1 confers abiotic stress tolerance [J]. *Transgenic Research*, 2008, 17(2):281~91.
- [23] 谢亚军,王兵,梁新华,等.干旱胁迫对甘草幼苗活性氧代谢及保护酶活性的影响[J].农业科学研究,2008,29(4):19~22.
- [24] 陈少裕.膜脂过氧化与植物逆境胁迫[J].植物学报,1989,6(4):211~217.
- [25] 田治国,王飞.不同品种万寿菊对镉胁迫的生长和生理响应[J].西北植物学报,2013,33(10):2057~2064.
- [26] 蒋明义,杨文英,徐江,等.渗透胁迫诱导水稻幼苗的氧化伤害[J].作物学报,1994,(6):733~738.
- [27] 刘柿良,杨容子,马明东,等.土壤镉胁迫对龙葵(*Solanum nigrum* L.)幼苗生长及生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2015,(2):240~247.
- [28] 苏明洁,廖源林,叶充,等.镉胁迫下苦楝(*Melia azedarach* L.)幼苗的生长及生理响应[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2086~2093.
- [29] 简敏菲,杨叶萍,余厚平,等.不同浓度Cd<sup>2+</sup>胁迫对苎麻叶绿素及其光合荧光特性的影响[J].植物生理学报,2015,(8):1331~1338.
- [30] 贾中民,王力,魏虹,等.垂柳和旱柳对镉的积累及生长光合响应比较分析[J].林业科学,2013,49(11):51~59.

(上接第12页)

- [14] 孔宪辉,韩焕勇,宁新柱,等.不同水分处理对棉花叶片叶绿素含量、光合速率及产量的影响研究[J].现代农业科技,2008(5):131~132.
- [15] 刘晓军,唐晓波,李春华.不同绿茶品种秋季叶绿素与光合效率比较及相关性研究[J].西南农业学报,2008,21(4):975~978.
- [16] 和世平,王荔,陈疏影,等.半夏无糖组培苗营养生长和光合生理对增施CO<sub>2</sub>的响应[J].云南农业大学学报,2009(2):204~209.
- [17] 付传明,黄宁珍,赵志国,等.光质与补光对水稻幼苗生长及光合速率的影响[J].广西植物,2007,27(2):255~259.
- [18] 徐凯,郭延平,张上隆.不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J].中国农业科学,2005,38(2):369~375.
- [19] IPCC. Climate Changes 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK/New York, USA: Cambridge University Press, 2002. 239~287.
- [20] Karnosky D F, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Tropospheric O<sub>3</sub> moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO<sub>2</sub>: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17:289~304.
- [21] 甘德欣,王明群,龙岳林,等.3种彩叶植物的光合特性研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2006,32(6):607~610.
- [22] 李鸣光,成秀媛,刘斌,余华.金钟藤的快速生长和强光合能力[J].中山大学学报(自然科学版),2006,45(3):70~72.
- [23] 靳忠英,彭正松,李育明,等.半夏的光合特性[J].作物学报,2006,32(10):1542~1548.
- [24] 方开泰,马长兴.正交设计与均匀设计的关联和比较[C].均匀设计理论及其应用研讨会论文集,香港,1999:8~40.