

# 铅胁迫对滇润楠幼苗生理特性的影响

姜永雷, 鲁红鼎, 黄晓霞, 邓莉兰

(西南林业大学 园林学院, 云南 昆明 650224)

**摘 要:**以 2 a 生滇润楠实生幼苗为试材,研究了对照(CK)、5 mmol/L  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、10 mmol/L  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  铅胁迫处理对其部分生理生化特性的影响。结果表明: $\text{Pb}^{2+}$  胁迫处理下,叶片初始荧光( $F_0$ )呈现上升趋势,PSII 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和 PSII 实际光合效率(Yield)显著受  $\text{Pb}^{2+}$  的影响,且在低浓度的  $\text{Pb}^{2+}$  浓度胁迫下呈现出显著下降趋势,表明在  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  溶液处理下的滇润楠幼苗光系统 II 受到损伤,且 5 mmol/L 浓度处理比 10 mmol/L 浓度处理对其伤害更大。此外, $\text{Pb}^{2+}$  胁迫引起植株叶绿素含量先降后升、可溶性蛋白含量显著下降,导致膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量的增加,且在 5 mmol/L 的处理浓度下的变化较大。同时  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫使过氧化物酶(POD)活性显著提高,在低浓度铅胁迫下脯氨酸含量显著降低,表明该幼苗可以通过启动抗氧化酶系统及渗透调节来抵御铅胁迫。

**关键词:**铅胁迫;滇润楠;叶绿素荧光;生理特性

**中图分类号:**S 687.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)19-0075-05

随着我国城市化和工业化的迅速发展,重金属污染问题越来越严重,大量的重金属通过工业三废排放,进入土壤、水域,严重破坏了生态系统。其中铅(Pb)是重

金属环境污染物中影响最严重的元素之一<sup>[1]</sup>。过量的铅不仅阻滞植物的生长发育、降低植物的品质,而且对人体的危害也不可忽视,尤其对儿童的智力发育危害极其严重<sup>[2]</sup>。铅是植物生长的一种非必需元素,进入到植物体内会影响到植物的生理生化过程,Palavi 等<sup>[3]</sup>认为铅会对植物的光合作用产生不利影响,在植物组织中的大量积累会导致体内活性氧代谢失调,活性氧水平上升,从而引起细胞膜脂过氧化,并最终影响植物的生长与发育。因此开展植物对铅胁迫生理特性反应的研究,可以进一步了解铅的毒害效应以及为植物对铅的抗性机制提供一定的试验依据。滇润楠(*Machilus*

**第一作者简介:**姜永雷(1988-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为园林植物。E-mail:10-29jyl@163.com.

**责任作者:**邓莉兰(1962-),女,本科,教授,现主要从事树木学与园林植物学等方面的科研与教学工作。E-mail:lilandeng1962@yahoo.com.cn.

**基金项目:**省部级重点学科、省高校重点实验室及校实验室共享平台资助项目;云南省应用基础面上资助项目(2010ZC267)。

**收稿日期:**2013-05-17

## Study on Scavenging Activities of Different Parts Extracts from *Arundina graminifolia* on DPPH Radical

LIU Ping<sup>1,2</sup>, GAO Yun-tao<sup>1,2</sup>, YANG Lu<sup>1</sup>, WANG Shu-hui<sup>2</sup>, SHAO Jun-jie<sup>2</sup>, FENG Jin-feng<sup>1</sup>

(1. The Engineering Laboratory of Polylactic Acid-Based Functional Materials of Yunnan, Yunnan University of Nationalities, Kunming, Yunnan 650500; 2. Key Laboratory of Ethnic Medicine Resource Chemistry, State Ethnic Affairs Commission & Ministry of Education, Yunnan University of Nationalities, Kunming, Yunnan 650500)

**Abstract:** Taking *Arundina graminifolia* as material, the scavenging activities of different part extracts from it on DPPH free radical was investigated. The results showed that different parts of *Arundina graminifolia* all had strong antioxidant activity. The  $\text{IC}_{50}$  values of root, stem, leaves were 0.03869, 0.04976, 0.02966 mg/mL, respectively; the maximum scavenging rate was 85.26% for root, 84.75% for stem and 90.41% for leaves; the antioxidant capacity was observed in the following order: leaves > root > stem.

**Key words:** *Arundina graminifolia*; parts; extract; DPPH free radical; scavenging rate

*yunnanensis*)属樟科(Lauraceae)润楠属(*Machilus*)的常绿乔木,高达20 m以上,由于其生长较快,树形优美,对污染有一定的抵抗力,在改善环境和提高居民生活方面有很大的作用。在昆明城市园林绿化规划中已经被作为乡土树种应用,并入选为昆明市民最喜爱的10种园林绿化树种之一。目前国内外对滇润楠的研究主要集中在观赏、组织培养、快速繁殖和光合速率等方面<sup>[4-5]</sup>,而对其耐重金属胁迫的报道较为少见。现以滇润楠为试材,研究测定了铅胁迫下植株的叶绿素荧光参数、叶绿素含量、生理指标参数的变化,初步揭示了不同浓度铅胁迫对滇润楠生理特性的影响,以期对滇润楠的栽培及园林应用提供理论依据和科学指导,对于扩大种植云南乡土树种有积极意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以滇润楠2 a生实生苗为试材,选取健康并生长一致的苗木于2012年8月中旬移栽到5 L塑料盆中,基质为红土+珍珠岩+腐殖土(3:3:2)的混合基质。

### 1.2 试验方法

试验分别用5 mmol/L  $Pb(NO_3)_2$  溶液( $Pb^{2+}$  A)和10 mmol/L  $Pb(NO_3)_2$  溶液( $Pb^{2+}$  B)进行处理,每处理组10盆,每盆1株,每株隔天均匀浇灌10 mL处理溶液,对照组(CK)用清水代替,再补充至水分充足,共3组处理。

试验大棚内白天温度范围为20~30℃,夜间温度范围为9~18℃,相对湿度为35%~80%。处理时间从2012年9月中旬至10月中旬,共1个月。所有指标测定在处理结束时进行,每株选取从上到下的第3~5片完全展开的叶作为荧光参数及生理生化指标的测定样品,每处理至少5株重复。

### 1.3 项目测定

叶绿素荧光参数的测定:用Imaging-PAM M-series调制叶绿素荧光成像系统(德国WALZ公司)测定叶绿素荧光参数。植物材料经充分暗适应后,先用测量光( $0.5 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )测定初始荧光( $F_0$ ),饱和光脉冲( $2700 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  (脉冲时间0.8 s)诱导 $F_m$ ,作用光强度为 $186 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。将待测叶片置于样品

台上,选定多个直径1 cm的AOI后,在软件的Kinetics窗口检测各叶绿素荧光参数的动力学变化曲线,相应数据直接从Report窗口导出。每处理至少5次重复。叶片初始荧光( $F_0$ )、反应中心PS II潜在最大光合效率( $F_v/F_m$ )、PS II实际光合效率(Yield)、荧光淬灭( $qP$ )、非光化学淬灭( $qN$ )等参数的计算,由仪器自动给出。

丙二醛(MDA)含量测定参照Hodges等<sup>[6]</sup>的方法。

抗氧化酶活性的测定:取0.2 g叶片材料于5 mL提取缓冲溶液(50 mM  $Na_2HPO_4$ - $NaH_2PO_4$  缓冲液,pH 7.0,含1 mM EDTA,0.05% (V/V) Triton X-100,2% (W/V) 不溶性聚乙烯吡咯烷酮)中研磨成匀浆。经过10 000 r/min离心20 min,取上清液进行酶活性测定。过氧化物酶(POD, EC 1.11.1.7)活性测定:参照Lin等<sup>[7]</sup>的方法,用愈创木酚被 $H_2O_2$ 氧化来测定POD酶活。根据消光系数( $26.6 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),计算酶活性。超氧化物歧化酶(SOD, EC 1.15.1.1)活性测定:参照Giannopolitis等<sup>[8]</sup>的方法,利用SOD抑制氮蓝四唑(NBT)在光下被 $O_2$ 还原的反应,在波长560 nm处检测吸光度值。SOD活性以1 mg蛋白抑制NBT光化还原的50%为1个酶活性单位(U)。

可溶性蛋白含量测定参照Bradford<sup>[9]</sup>的方法。游离脯氨酸(Pro)含量测定参照Bates等<sup>[10]</sup>的方法。

叶绿素含量测定:参照Inskeep等<sup>[11]</sup>的方法,称取0.1 g植物叶片,用冷的二甲基甲酰胺黑暗中4℃下浸提48 h,于663.8 nm和646.8 nm下比色。计算单位叶鲜重的叶绿素a(Chl a)、叶绿素b含量(Chl b)。

### 1.4 数据分析

所有的数据均利用SPSS 11.5 统计分析软件进行一元方差分析(One-way ANOVA),平均数间的多重比较采用Duncan's 检验方法。 $P < 0.05$ 时差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 $Pb^{2+}$ 处理对叶绿素荧光参数的影响

从表1可以看出,与对照组(CK)相比, $Pb^{2+}$ 处理下的滇润楠幼苗叶片 $F_0$ 显著上升趋势,且在5 mmol/L的 $Pb^{2+}$ 处理下 $F_0$ 值最高。此外,不同浓度 $Pb^{2+}$ 处理后,滇润楠幼苗叶片的 $F_v/F_m$ 和Yield均显著下降,在5 mmol/L

表1  $Pb^{2+}$  处理对叶绿素荧光参数的影响

Table 1 Effect of  $Pb^{2+}$  on chlorophyll fluorescence parameters

处理组 Treatment	初始荧光 $F_0$	PSII 最大光化学效率 $F_v/F_m$	PSII 实际光合效率 Yield	非光化学淬灭系数 $qN$	光化学淬灭系数 $qP$
CK	0.1237±0.0047a	0.7088±0.0058c	0.4667±0.0555b	0.6204±0.1374a	0.8321±0.0195b
$Pb^{2+}$ A	0.1517±0.0131b	0.6398±0.0086a	0.2941±0.0605a	0.7599±0.0248a	0.6704±0.1291a
$Pb^{2+}$ B	0.1441±0.0145b	0.6830±0.0028b	0.4123±0.0371b	0.6949±0.0744a	0.8144±0.0325b
P	0.027*	0.000***	0.010*	0.248ns	0.048*

注:同一列中不同字母表示差异显著(邓肯新复极差法), $P < 0.05$ 。每个值代表5次重复的平均值±标准误。下同。

Note: Values followed by the same letter within a column indicate nonsignificant differences at  $P < 0.05$  (Duncan's multiple range test). Each value represents the mean ± SE of five replicates. The same below.

的  $Pb^{2+}$  处理下  $Yield$  的下降比率达到了 37%, 其值远远低于对照组。说明 PSII 反应中心在受到重金属  $Pb^{2+}$  胁迫时受到损伤, 降低其实际原初光能捕获效率及光能转换效率, 叶片的光合能力受到抑制。由表 1 可知, 与对照组相比,  $Pb^{2+}$  处理下滇润楠幼苗  $qN$  值有所增加, 但并不显著, 而  $qP$  值在  $Pb^{2+}$  A 组处理下显著下降。说明在铅胁迫下该树种会倾向于将更多的能量用于热耗散, 对光合器官起到保护作用。

## 2.2 $Pb^{2+}$ 处理对叶绿素含量的影响

由表 2 可以看出, 与对照组(CK)相比,  $Pb^{2+}$  处理下的滇润楠幼苗叶片 Chl a 和 Chl b 均呈现出先降后升的趋势, 且在  $Pb^{2+}$  A 和  $Pb^{2+}$  B 溶液处理组中叶绿素 a 分别下降 24.3% 和上升 3.9%; 而叶绿素 b 下降 22.6% 和上升 3.8%。 $Pb^{2+}$  A 处理下叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均显著低于对照处理。由此可以看出不同浓度的  $Pb^{2+}$  处理下叶绿素的含量变化呈现出不同的变化趋势。叶绿素 b/a 比值是表示植物光合器官生理状况的重要指标<sup>[12]</sup>, 表 2 显示, 与对照相比, 在  $Pb^{2+}$  处理下 Chl b/a 比值有所增加但差异不显著。

表 2  $Pb^{2+}$  处理对叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of  $Pb^{2+}$  on chlorophyll content

处理	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 b/叶绿素 a
Treatment	Chl a/ $\mu g \cdot cm^{-2}$	Chl b/ $\mu g \cdot cm^{-2}$	Chl b/a
CK	1 360.42 $\pm$ 227.89b	664.46 $\pm$ 114.96b	0.4881 $\pm$ 0.0071a
$Pb^{2+}$ A	1 029.98 $\pm$ 102.13a	514.07 $\pm$ 49.31a	0.4996 $\pm$ 0.0237a
$Pb^{2+}$ B	1 413.18 $\pm$ 153.64b	689.70 $\pm$ 61.18b	0.4888 $\pm$ 0.0118a
P	0.021 *	0.023 *	0.590ns

## 2.3 $Pb^{2+}$ 处理对滇润楠叶片 MDA 含量的影响

在受到逆境胁迫后植物体内会产生活性氧, 积累的活性氧导致了膜脂过氧化, 丙二醛是膜上不饱和脂肪酸发生一系列活性氧反应的产物, 膜脂过氧化的强弱可以通过 MDA 含量来判断, MDA 含量越高其膜脂过氧化程度越高。从图 1 可以看出, 滇润楠幼苗在  $Pb^{2+}$  处理下丙二醛(MDA)的含量呈上升趋势, 但差异不显著。说明在  $Pb^{2+}$  处理下, 滇润楠幼苗体内积累的活性氧导致了膜脂过氧化, 对植物已经产生了一定的伤害。

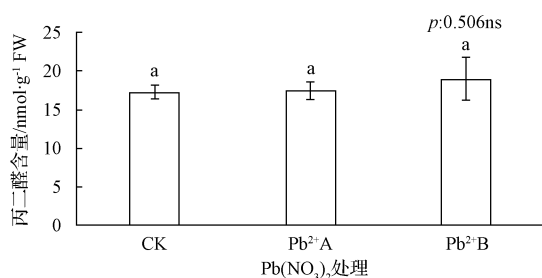


图 1  $Pb^{2+}$  处理对丙二醛(MDA)含量的影响

Fig. 1 Effect of  $Pb^{2+}$  on MDA content

## 2.4 $Pb^{2+}$ 处理对滇润楠叶片可溶性蛋白及脯氨酸含量的影响

可溶性蛋白含量变化可以作为检测植物叶片功能和衰老的一个指标<sup>[13]</sup>。由表 3 可以看出, 在受到  $Pb^{2+}$  胁迫时, 植株体内的可溶性蛋白含量显著下降, 在  $Pb^{2+}$  A 和  $Pb^{2+}$  B 处理间差异不显著。脯氨酸是重要的渗透调节物质, 其在植物体内的累积对细胞的渗透调节、稳定细胞结构、降低细胞氧化具有非常重要的作用。该试验中,  $Pb^{2+}$  处理下植株叶片内脯氨酸含量呈先降后升趋势。表明滇润楠幼苗在遭受高浓度  $Pb^{2+}$  胁迫时, 通过自身脯氨酸的累积来提高细胞的渗透势, 进行渗透调节, 减小逆境胁迫下细胞组织的失水。

表 3  $Pb^{2+}$  处理对叶片可溶性蛋白和脯氨酸含量影响

Table 3 Effect of  $Pb^{2+}$  on soluble protein content and proline content

处理组	可溶性蛋白含量	脯氨酸含量
Treatment	Soluble protein content/ $mg \cdot g^{-1}$ FW	Proline content/ $mg \cdot g^{-1}$ FW
CK	31.75 $\pm$ 2.72b	60.00 $\pm$ 9.07b
$Pb^{2+}$ A	25.71 $\pm$ 2.60a	33.57 $\pm$ 1.43a
$Pb^{2+}$ B	23.42 $\pm$ 1.57a	61.07 $\pm$ 14.21b
P	0.012 *	0.015 *

## 2.5 $Pb^{2+}$ 处理对滇润楠叶片抗氧化酶活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是植物应对逆境伤害的重要的抗氧化酶类, 可以通过二者的活性变化检测植物受重金属胁迫的程度。SOD 是植物体内清除和减少活性氧自由基的保护酶, POD 是植物酶促防御系统的关键酶之一<sup>[14]</sup>。从图 2 可以看出,  $Pb^{2+}$  处理对滇润楠幼苗的 2 种抗氧化酶活性影响显著。与对照相比, SOD 在  $Pb^{2+}$  的处理下呈现出下降趋势。说明在  $Pb^{2+}$  处理下 SOD 的活性受到抑制。而过氧化物酶(POD)随着  $Pb^{2+}$  浓度的增大呈显著性上升, 与对照相比, 在  $Pb^{2+}$  A 和  $Pb^{2+}$  B 处理时分别增加了 3.14 倍和 1.56 倍。说明在  $Pb^{2+}$  处理下植物通过一系列的生理生化反应产生了有害的过氧化物, 滇润楠幼苗通过提高过氧化物酶(POD)的活性来应对  $Pb^{2+}$  的胁迫。

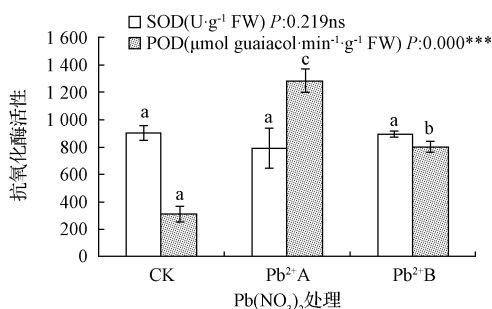


图 2  $Pb^{2+}$  处理对抗氧化酶 SOD 和 POD 活性的影响

Fig. 2 Effect of  $Pb^{2+}$  on antioxidative enzyme SOD and POD activities



### 3 讨论与结论

叶绿素荧光的变化已经成为评价植物叶片受胁迫伤害一个重要指标<sup>[15]</sup>,任何逆境胁迫对光合作用过程产生的影响都可以通过体内叶绿素荧光诱导动力学参数的变化反映出来。钱永强等<sup>[16]</sup>研究认为,植物的初始荧光  $F_0$  和非光化学淬灭系数( $qN$ )是检测早期植物受到胁迫最敏感的参数。植物在受到重金属的胁迫时能够导致  $F_0$  和  $qN$  值的增加。钱永强等<sup>[17]</sup>还发现重金属胁迫下银芽柳幼苗的初始荧光  $F_0$  和非光化学淬灭系数( $qN$ )上升。该试验结果表明,在  $Pb^{2+}$  处理下的滇润楠幼苗叶片初始荧光  $F_0$  显著上升, $qN$  值有所增加但是不显著,且在 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理下  $F_0$  和  $qN$  的值的幅度大于 10 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理,说明在 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理下滇润楠幼苗的 PSII 反应中心活性受到破坏和光抑制的程度较大。

$F_v/F_m$  反映 PSII 反应中心的最大光化学效率,在正常情况下该参数变化很小,一般在 0.80~0.85 之间,不受物种和生长条件的影响。韩张雄等<sup>[18]</sup>研究表明在遭受环境胁迫时潜在最大量子产量  $F_v/F_m$  的值会有明显的下降。该试验结果表明, $F_v/F_m$  显著下降,与韩张雄等<sup>[18]</sup>研究的结果一致,意味着 PSII 的反应中心活性受到了  $Pb^{2+}$  胁迫的影响。实际光合效率( $Yield$ )反映 PSII 反应中心在部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率, $Q_{in}$  等<sup>[19]</sup>研究证明,重金属离子的胁迫会降低光合电子传递效率,从而降低  $Yield$  的转化比例。该试验结果表明,不同  $Pb^{2+}$  浓度处理下的幼苗叶片  $Yield$  值呈降低趋势,且在 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理下  $Yield$  下降的程度大于 10 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理,说明 PSII 反应中心收到了一定程度的伤害。荧光光化学淬灭系数( $qP$ ),反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,它代表 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的比例<sup>[20]</sup>。该试验中, $qP$  的值变化不显著,可能是 PSII 反应中心的开放比例没有受到太大的影响,也说明该参数在  $Pb^{2+}$  胁迫下相对稳定。

光合作用是植物生长的重要能量来源和物质基础,叶绿素作为植物进行光合作用的主要元素,其含量的多少对光合速率有直接的影响。Kupper 等<sup>[21]</sup>认为,植物受到铅胁迫后叶绿素含量下降,是由于叶绿体机构被破坏造成的。在 5 mmol/L  $Pb^{2+}$  胁迫下光合色素含量与 10 mmol/L  $Pb^{2+}$  处理间差异显著,且与对照组相比呈显著下降趋势,说明滇润楠幼苗的新陈代谢明显受到了抑制。这可能是因为铅胁迫使得滇润楠幼苗叶片叶绿素在一定程度上降解,且在 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理下其含量降解的程度较大。

植物体内活性氧的代谢在受到重金属胁迫后会失调,体内的活性氧会增加,导致膜脂过氧化,MDA 是脂质过氧化产物之一,其含量高低可以反映植物遭受逆境伤害的程度,含量越高其遭受到的伤害越大<sup>[22]</sup>。该试验结果表明,MDA 在受到铅胁迫后含量增加,说明在  $Pb^{2+}$  胁迫下,滇润楠幼苗叶片细胞内活性氧积累过多,导致膜脂过氧化严重,使细胞受到伤害,影响植株的正常代谢。这与陈怀宇等<sup>[23]</sup>研究桐花幼苗在受到铅胁迫后 MDA 的变化结果一致。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是重要的清除活性氧的抗氧化酶,在植物抵抗逆境胁迫过程中起着重要的作用<sup>[24]</sup>。不同的植物种类,其体内的 SOD 和 POD 在重金属胁迫下变化不完全相同<sup>[25]</sup>。金璘等<sup>[26]</sup>的研究表明,随着铅胁迫的增加,小麦的 SOD 活性先升后降,而 POD 活性则一直呈上升趋势。该研究中,在 5 mmol/L  $Pb^{2+}$  处理下,SOD 呈下降趋势,而 POD 含量变化极显著增加,在 10 mmol/L  $Pb^{2+}$  处理下 SOD 和 POD 活性的变化幅度均低于 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理,说明在低浓度铅的胁迫下植物体内产生了过多的活性氧,超出了 SOD 的清除能力,因而对植物造成了氧化伤害,而 POD 活力的增加在一定程度上抑制了活性氧对细胞脂膜造成的损伤。脯氨酸(Pro)是细胞内重要的渗透调节物质,具有调节细胞渗透平衡,增强细胞结构稳定性及阻止超氧自由基产生的作用,它与植物体内活性氧自由基的清除以及膜脂过氧化作用的减轻密切相关<sup>[27]</sup>,脯氨酸在 5 mmol/L  $Pb^{2+}$  胁迫下含量显著降低,说明滇润楠幼苗在 5 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  胁迫下植物体内细胞不能很好的清除氧自由基和降低膜脂过氧化。在 10 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  胁迫下植物体内脯氨酸含量增加,说明通过  $Pb^{2+}$  处理后植物能提高细胞的渗透势来维持细胞正常代谢,提高抗逆性。而游离脯氨酸和可溶性蛋白作为渗透调节物质,在  $Pb^{2+}$  胁迫下表现出不同的趋势,可能是渗透胁迫物质所起的作用和调节机制不同。

综上所述,滇润楠在  $Pb^{2+}$  浓度为 5 mmol/L 时,大部分的生理指标均与对照呈显著差异,而 10 mmol/L 的  $Pb^{2+}$  处理生理指标多数则与对照差异不显著,分析滇润楠植物生理指标是否是在 5 mmol/L  $Pb^{2+}$  处理损伤最大,而随着  $Pb^{2+}$  浓度的增大对其生理指标影响将变小尚有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 张从. 污染土壤生物修复技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000:1-22.
- [2] 姜成,申晓慧,李春丰,等. 凤仙花幼苗对重金属铅和锌的抗性研究[J]. 北方园艺,2012(20):53-55.
- [3] Palavi S, Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. Braz Plant Physiol, 2005,17(1):35-52.

- [4] 林萍, 普晓兰. 滇润楠的组织培养及快速繁殖研究[J]. 园艺学报, 2003, 30(2): 239-241.
- [5] 吴海波, 涂璟. 云南绿化树种滇润楠光合速率的研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(2): 444-448.
- [6] Hodges D M, Delong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. *Planta*, 1999, 207: 604-611.
- [7] Lin J, Wang G. Doubled CO<sub>2</sub> could improve the drought tolerance better in sensitive cultivars than in tolerant cultivars in spring wheat[J]. *Plant Science*, 2002, 163: 627-637.
- [8] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutase in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59: 309-314.
- [9] Bradford K J, Sharkey T D, Farquhar G D. Gas exchange, stomatal behavior, and  $\delta^{13}\text{C}$  values of the flacca tomato mutant in relation to abscisic acid[J]. *Plant Physiology*, 1983, 72: 245-250.
- [10] Bates C J, Waldren R P, Teare I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies[J]. *Plant Soil*, 1973, 39: 205-207.
- [11] Inskeep W P, Bloom P R. Extinction coefficients of chlorophyll a and b in N,N-Dimethyl formamide and 80% acetone[J]. *Plant Physiology*, 1985, 77: 483-485.
- [12] 谷魏, 施新固, 杜开和, 等. 汞、镉复合污染对轮叶狐尾藻的毒害影响[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 75-79.
- [13] 俞慧娜, 徐根娣, 样卫韵, 等. 锰处理对大豆生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2005(7): 35-38.
- [14] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2006, 32(6): 1207-1209.
- [15] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51: 659-668.
- [16] 钱永强, 周晓星, 韩蕾, 等. Cd<sup>2+</sup>胁迫对银芽柳 PSII 叶绿素荧光光响应曲线的影响[J]. 生态学报, 2011, 20(31): 6134-6142.
- [17] 钱永强, 周晓星, 韩蕾, 等. 3 种柳树叶片 PSII 叶绿素荧光参数对 Cd<sup>2+</sup>胁迫的光响应[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 8-14.
- [18] 韩张雄, 李利, 徐新文, 等. NaCl 胁迫对 3 种荒漠植物幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(9): 1843-1849.
- [19] Qin T C, Wu Y S, Wang H X, et al. Effect of cadmium, lead and their interaction on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 320-325.
- [20] Wang K B, Xu C H, Zhao F H, et al. The effects of water stress on some in vivo chlorophyll a fluorescence parameters of wheat flag leaves[J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1997, 13(2): 273-278.
- [21] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. *Exp Bot*, 1996, 47: 259-266.
- [22] 李海亮, 赵庆芳, 王秀春, 等. 兰州市大气污染对绿化植物生理特性的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(1): 55-60.
- [23] 陈怀宇, 李裕红, 韦炜, 等. Pb<sup>2+</sup>对桐花幼苗抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响[J]. 泉州师范学院学报(自然科学版), 2006, 24(2): 94-99.
- [24] Guo T R, Zhang G P, Zhou M X, et al. Effects of aluminum and cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activities of two barley genotypes with different Al resistance[J]. *Plant Soil*, 2004, 258: 241-248.
- [25] 何冰, 何计兴, 何新华, 等. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1263-1268.
- [26] 金璵, 袁金萍. 铅对小麦保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2007(2): 225-232.
- [27] 彭志红, 彭克勤, 胡家金. 渗透胁迫下植物脯氨酸积累的研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(4): 80-83.

## Effect of Plumbum Stress on Physiological Characteristics of *Machilus yunnanensis* Seedlings

JIANG Yong-lei, LU Hong-ding, HUANG Xiao-xia, DENG Li-lan

(Faculty of Landscape Architecture, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224)

**Abstract:** Taking two-year old seedlings of *Machilus yunnanensis* as experiment material, the effect of some physiological and biochemical characteristics under three stress treatment groups control (CK), 5 mmol/L Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 10 mmol/L Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> were studied. The results showed that under the Pb<sup>2+</sup> treatment, the initial fluorescence ( $F_0$ ) increased, while the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) and the actual photochemical efficiency of PSII ( $Yield$ ) decreased significantly in the low Pb<sup>2+</sup> concentration, which indicating the PSII of *Machilus yunnanensis* seedlings was damaged by Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> treatment, especially by the 5 mmol/L concentration of Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> treatment. Furthermore, the contents of chlorophyll dropped and then increased as Pb<sup>2+</sup> concentration raised continually. Soluble protein contents declined obviously, and significantly stimulated the increase of MDA content; moreover, these changes were more evident under the 10 mmol/L concentration treatment. On the other hand, the Pb<sup>2+</sup> stress promoted the POD activity and decreased the accumulation of praline significantly in low concentration of Pb<sup>2+</sup>, which suggested the *Machilus yunnanensis* seedlings could resist Pb<sup>2+</sup> stress by its antioxidative enzyme and osmotic regulation system.

**Key words:** plumbum(Pb) stress; *Machilus yunnanensis*; chlorophyll fluorescence; physiological characteristics