

铅胁迫后旱柳无性系 3 种抗氧化酶的变化分析

曹继敏,何 德\*

(西南林业大学 生命科学院,云南 昆明 650224)

**摘 要:**为探究旱柳对铅胁迫的耐受性,以同一株旱柳的无性系为材料,探究在土壤铅浓度 0、500、800、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000 mg/kg 情况下不同时期旱柳叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的酶活生理变化。结果表明,旱柳无性系在短期内就可以对铅胁迫作出反应。随着土壤铅胁迫浓度的增加,旱柳叶片中的 SOD、POD、CAT 活性均是先升后降的变化趋势。800 mg/kg 的土壤铅胁迫浓度下旱柳叶片表现出最佳的耐受性,其 SOD、POD、CAT 活性基本达到最大,分别为 1 516.3 u/g、6 158.93、90.66 u/g · min;1 800 mg/kg 为旱柳无性系的耐受限度;2 000 mg/kg 超越旱柳无性系自身耐受能力。以上结果表明,旱柳无性系对铅有很强的耐受性和具有修复铅造成污染的潜力。

**关键词:**旱柳;铅胁迫;SOD;POD;CAT

**中图分类号:**S792.12      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)04-0007-06

Variations of Three Antioxidant Enzymes of *Salix matsudana* Seedlings under Lead Stress

CAO Ji-min, HE De\*

(College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to understand the tolerance of *Salix matsudana* to lead stress, seedlings bred from the same *S. matsudana* tree were cultured in potted soils with different lead contents (0, 500, 800, 1000, 1 200, 1 500, 1 800 mg/kg and 2 000 mg/kg) to study the physiological variations of the enzyme activities in the leaves, including SOD, POD, and CAT. The results showed that *S. matsudana* could respond to the lead stress in a short time. The activities of three enzymes increased first and then decreased with the increase of the lead content in soils. The best tolerance ability appeared when the soil lead content was 800 mg/kg, manifested by the maximum values of SOD, POD and CAT activities: 1 516.3 u/g, 6 158.93 u/g · min and 90.66 u/g · min, respectively. The tolerance limitation was 1 800 mg/kg, and when the soil lead content was 2 000 mg/kg, it surpassed the capacity of the self-tolerance of *S. matsudana*. These results indicated that *S. matsudana* had strong tolerance to lead and high potential for remediation of lead contamination.

**Key words:** *Salix matsudana*; lead stress; SOD; POD; CAT

随着工业的发展,城市交通运输、工业废物排放等向周围环境排放重金属铅(Pb)。Pb 成为造成全球污染最主要的重金属之一,土壤中的铅不仅能够通过植物根系进入植物机体,在机体内积累到一定

量时就会显示出毒性,从而影响植物正常的生长发育<sup>[1]</sup>。铅也会随着我们摄入含铅的植物进入人体,对人体的心血管系统、生殖系统<sup>[2]</sup>、神经系统<sup>[3]</sup>等造成伤害。重金属污染问题亟待解决,但是传统的物

收稿日期:2019-11-06 修回日期:2019-12-09  
基金项目:国家自然科学基金(31260041);云南省优势特色重点学科生物学一级学科建设项目(50097505);云南省高校林下生物资源保护及利用科技创新(51400605)。  
作者简介:曹继敏。研究方向:植物抗逆性。E-mail:765493003@qq.com  
\*通信作者:何 德,博士,副教授。研究方向:分子细胞生物学。E-mail:1419615009@qq.com

理、化学修复的方法存在不可避免的缺陷。同时由此带来的土壤自身结构破坏问题也不容忽视。电动修复、土壤淋洗等方法操作复杂,可行性较差<sup>[4]</sup>。植物修复以其成本低、安全可靠、对环境干扰小且改善生态环境等优点备受关注<sup>[5]</sup>,木本植物因其生物量大的特点被应用于植物修复,成为环境污染治理的重要方向<sup>[6]</sup>。旱柳(*Salix matsudana*)作为一种常见的木本植物,具有生长快、易繁殖、生物量大、根系发达、再生能力强和对多种重金属耐受的特点,在世界各地均有栽种,在重金属污染治理方面具有较大的潜力<sup>[7]</sup>。

Pb 的利用具有剂量效应,低浓度 Pb 能够促进植物生长,但超过一定值之后,Pb 就会对植物产生毒害作用,使得植物叶片发生卷曲从而扰乱植物水分和养分的吸收平衡<sup>[8]</sup>。此外高浓度的 Pb 会使植物的叶与茎黄化,最后使得叶片脱落<sup>[9]</sup>,尤其容易发生在植物茎叶的幼嫩期。SOD 与 POD 在植物中的主要作用是清除氧自由基以及产生的多种氧化物抗氧化植物<sup>[10]</sup>。同样 CAT 也是一种重要的氧化还原酶,通过清除植物体过多的过氧化氢而维持活性氧代谢的平衡。在正常的生理状况下,多种保护酶能够维持植物体内的活性氧代谢平衡,从而防止自由基累积的损害。而植物在重金属胁迫条件下,通过调动各种酶来保护自身机体,因此植物体抗氧化酶活是植物生理状态与抗逆性的重要指标。通过观察旱柳幼苗叶片在不同浓度的 Pb 胁迫期间的 3 种抗氧化酶的活性变化来评估旱柳对 Pb 胁迫的耐受性以及自我修复的潜力,为广泛利用木本植物修复土壤重金属污染提供初步的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

所用的旱柳源于云南省昆明市北京路延长线附近的旱柳植株,所有旱柳植株均来自于同一株旱柳树,截取长度为 25 cm 的旱柳枝条用改良的霍格兰德营养液<sup>[10]</sup>进行水培,水培期间每 3 d 更换一次营养液。

### 1.2 试验方法

水培一段时间后,待旱柳无性系水培根系较发达时,将其移栽到含有大约 15 kg 土壤的花盆中。旱柳在土中生长 2 个月确保成活后,旱柳无性系用  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  进行处理,使盆中土壤  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度分别为 0、500、800、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000 mg/kg,每个含量设置 3 盆,每盆 3 棵旱柳。为防止 Pb 流失,每个花盆下放塑料盆,将浇水时流出的溶液倒回花盆中,处理时间 1 个月(仅加 1 次

Pb)。分别采取胁迫第 0 天、第 1 天、第 7 天、第 25 天的叶片进行 SOD、POD、CAT 的酶活生理测定。

### 1.3 酶活测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氯化硝基氮蓝四唑(NBT)光化还原抑制法<sup>[11]</sup>,叶片添加 1.6 mL 的 0.05 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.8)充分研磨后,4℃离心后取上清制成粗酶提取液,将粗酶提取液加入到反应体系为 162 mL 的 14.5 mmol/L 甲硫氨酸、0.6 mL 的 30  $\mu\text{mol/L}$  EDTA- $\text{Na}_2$ 、6 mL 的 60  $\mu\text{mol/L}$  核黄素和 6 mL 的 2.25 mmol/L NBT 的溶液之中,之后在室温反应 20 min 并在 OD560nm 检测吸光值。SOD 总活性= $[(A_{\text{CK}} - A_{\text{E}}) \times V] / (1/2A_{\text{CK}} \times W \times V_{\text{t}})$ ,式中, $A_{\text{CK}}$  为对照光(阳光下)的吸光值, $A_{\text{E}}$  为样品管的吸光值, $W$  为样品重量, $V$  为样品研磨液的体积(1.6 mL), $V_{\text{t}}$  为反应体系中粗酶提取液的体积(50  $\mu\text{L}$ ),SOD 总酶活力用鲜重每单位克表示(u/g)。

过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚氧化法<sup>[11]</sup>,将叶片用 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 6.0)充分研磨后,再经 4℃离心制成粗酶提取液。反应液的配制:将 0.076 mL 的愈创木酚缓慢溶于 50 mL 加热中的 0.2 mol/L 磷酸缓冲液(pH 6.0),待溶液冷却后加入 0.112 mL 30%的  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,混匀后冷藏备用。将酶液加入反应液中,测定 OD470 nm 吸光值。POD 的活性以 u/g · min 计,每分钟 OD 值变化 0.01 为一个酶活单位(u)。POD 活性= $(\Delta\text{OD}_{470} \times V_{\text{t}}) / (W \times V_{\text{s}} \times 0.01 \times t)$ ,式中, $\Delta\text{OD}_{470}$  表示反应时间内的吸光值变化, $V_{\text{t}}$  表示粗酶提取总体积(1.6 mL), $W$  为样品重量, $V_{\text{s}}$  表示测定时用的粗酶体积, $t$  表示反应时间。

过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用过氧化氢分解法<sup>[12]</sup>,将叶片用 0.15 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)充分研磨后,再经 4℃离心制成粗酶提取液。反应液的配制:在 200 mL 的 0.15 mol 磷酸缓冲液(pH 7.0)中加入 0.309 2 mL 30%的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。将酶液加入反应液中,测定 OD240 nm 吸光值,CAT 的活性以  $\mu\text{g} \cdot \text{min}$  计,每分钟 OD 值变化 0.1 为一个酶活单位(u)。CAT 活性= $(\Delta\text{OD}_{240} \times V_{\text{t}}) / (W \times V_{\text{s}} \times t \times 0.1)$ ,式中, $\Delta\text{OD}_{240}$  表示反应时间内吸光值的变化, $V_{\text{t}}$  表示粗酶提取总体积(1.6 mL), $W$  为样品重量, $V_{\text{s}}$  表示测定时用的粗酶体积, $t$  表示反应时间。

### 1.4 数据分析

使用 SPSS 22 对试验数据进行 ANOVA 单因素方差分析,均值通过  $t$  检验进行多重比较。 $P < 0.05$  为差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同质量浓度的 Pb 胁迫下旱柳无性系的生长状况

结果表明,在<800 mg/kg 的  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫下,旱柳的生长受到的影响较小,当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度达到 1 200 mg/kg 时,虽然其生长不会受到明显的抑制,但是其叶片颜色变浅表明旱柳的正常生长发育已经受到 Pb 的影响;当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 1 800~2 000 mg/kg 时,旱柳的叶片脱水现象严重,并慢慢脱落。

### 2.2 Pb 胁迫下旱柳叶片中 SOD 的活性变化

图 1 反应了旱柳在经不同土壤胁迫浓度处理后叶片中 SOD 酶活性的变化。结果表明随着 Pb 胁迫浓度的增加和处理时间的延长,叶片中 SOD 酶活性呈现上升—下降—上升的趋势。在处理的第 0 d,旱柳没有进行 Pb 胁迫处理,各处理组间 SOD 活性

无显著性差异(表 1)。在处理后的 1、7、25 d 内,  $\text{Pb}^{2+}$  土壤浓度 500、800、1 000、1 200、1 500 mg/kg 下的 SOD 活性都是急剧上升—下降—再缓慢上升,说明在这些铅 Pb 浓度下旱柳对 Pb 胁迫作出响应,在 1 d 内响应强烈,7 d 后旱柳已基本适应 Pb 胁迫,生命活动趋于稳定。800 mg/kg 的  $\text{Pb}^{2+}$  浓度下叶片 SOD 值最大,在第 1 天和第 7 天与除 1 000 mg/kg  $\text{Pb}^{2+}$  浓度外的其他各组差异显著( $P<0.05$ ),第 25 天与其他各组都差异显著,这说明 800 mg/kg  $\text{Pb}^{2+}$  浓度的胁迫下旱柳有最佳的耐受机制,生命响应活动激烈; $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度 1 800、2 000 mg/kg 下的 SOD 活性与对照(0 d)差异不显著,变化情况与第 0 天基本一致,这表明土壤 Pb 胁迫质量浓度超过 1 800 mg/kg 时旱柳植株已受损,生命响应活动大大减弱,已无法对 Pb 胁迫作出响应。

表 1 不同时间随着 Pb 含量变化的 SOD 活性分析

Table 1 Table of SOD activity analysis with lead content at different time durations

酶种类	$\text{Pb}^{2+}$ 质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0 d	1 d	7 d	25 d
SOD/( $\text{u} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0	378.34±3.00d	369.42±7.67d	369.09±15.5d	346.70±10.5d
	500	340.75±6.28d	708.32±3.61c	413.59±5.95d	656.17±3.87b
	800	356.04±2.89d	1516.3±10.8a	952.27±3.19b	1221.6±8.17a
	1 000	297.40±2.16d	1384.6±2.43a	816.55±3.52b	974.78±4.32b
	1 200	302.06±1.50d	1093.6±5.37b	702.76±3.78c	867.10±5.44b
	1 500	423.00±5.82d	817.13±3.76c	604.87±6.37c	703.80±3.48b
	1 800	338.43±6.68d	352.30±3.66d	332.77±11.0d	414.57±7.32d
	2 000	314.07±0.42d	303.89±2.11d	311.47±3.00d	284.28±5.05d

注:数据标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同字母或无字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。表 2、表 3 同。

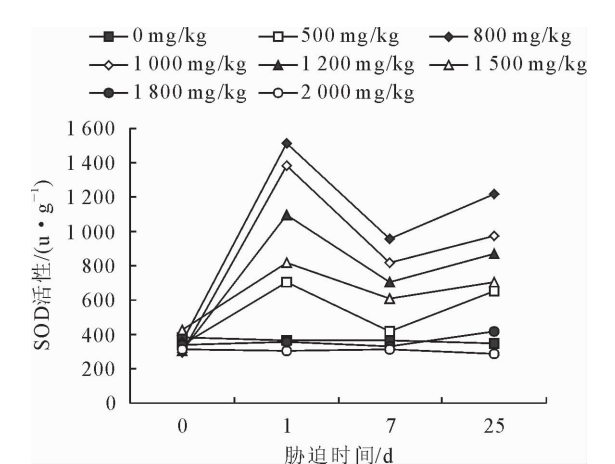


图 1 不同铅胁迫时间与含量对旱柳叶片 SOD 活性的影响  
Fig. 1 Effects of different lead stress time and contents on SOD activity in *Salix matsudana* leaves

### 2.3 Pb 胁迫下旱柳叶片中 POD 的活性变化

图 2 反应了旱柳在经不同  $\text{Pb}^{2+}$  土壤胁迫浓度处理后叶片中 POD 酶活性的变化。结果表明随着土壤 Pb 胁迫浓度的增加和处理时间的延长,POD

活性呈现上升—下降的趋势。在处理的第 0 天,各处理组间 POD 活性无显著性差异( $P>0.05$ )(表 2)。在处理后的 1、7、25 d 内, $\text{Pb}^{2+}$  浓度 500、800、1 000、1 200、1 500 mg/kg 下的 POD 活性都是先急剧上升—再缓慢下降,说明在这些 Pb 胁迫浓度下旱柳对 Pb 胁迫作出了适应性的响应,在 1 d 内响应强烈,7 d 后生命活动趋于稳定。500 mg/kg 的浓度下 POD 值最大,在第 1 天、第 7 天、第 25 天与其他各组差异显著( $P<0.05$ ),这说明 500 mg/kg  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度下旱柳有最佳的耐受机制,生命响应活动激烈; $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度 1 800、2 000 mg/kg 下的 POD 活性显著低于对照组,这表明 Pb 胁迫质量浓度>1 800 mg/kg 时旱柳植株已受损,生命响应活动大大减弱,已无法对铅胁迫作出响应。Pb 胁迫导致旱柳叶片 POD 活性增加,在  $\text{Pb}^{2+}$  500 mg/kg 质量浓度下,POD 活性最高,当土壤  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度>1 800 mg/kg 时,超过了自身的耐受程度,导致 POD 活性低于对照组并且随胁迫时间延长下降。

表 2 不同时间随着 Pb 含量变化的 POD 活性分析

Table 2 POD activity variations along with lead content and stress time

酶种类	Pb <sup>2+</sup> 质量浓度 /(mg · kg <sup>-1</sup> )	0 d	1 d	7 d	25 d
POD/(u · g <sup>-1</sup> )	0	1436.80±0.57d	1369.00±123.7d	1461.90±36.12d	1604.40±88.81d
	500	1818.00±16.37d	6158.93±97.10a	4597.46±265.6b	3681.53±84.26c
	800	1135.00±10.78d	5535.20±106.4b	3253.60±54.46c	2386.80±231.9c
	1 000	1174.33±3.28d	4458.40±246.7b	2417.20±147.4c	2136.56±114.1d
	1 200	1381.33±67.02d	3131.80±5.03c	2463.43±177.7c	1555.93±172.4d
	1 500	1449.66±148.6d	2414.40±56.59c	1160.00±81.38d	1189.00±28.79d
	1 800	1113.66±56.85d	885.00±25.1e	870.93±55.08e	348.73±16.89f
	2 000	626.33±47.23d	819.46±38.79e	934.23±22.74e	464.00±17.43f

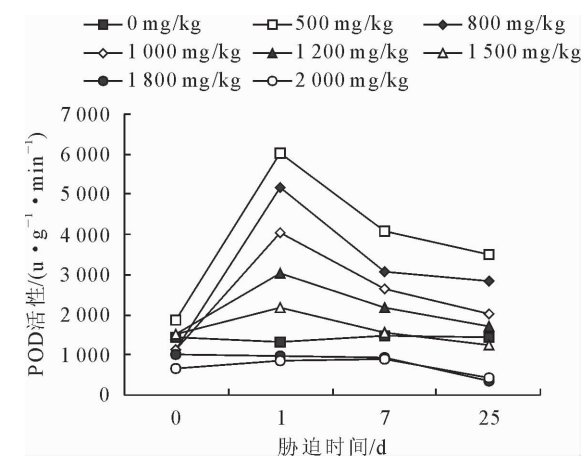


图 2 不同铅胁迫时间与浓度对旱柳叶片 POD 活性的影响

Fig. 2 Effects of different lead stress time and contents on POD activity in *S. matsudana* leaves

2.4 Pb 胁迫下旱柳叶片中 CAT 的活性变化

图 3 反应了旱柳在经不同 Pb<sup>2+</sup> 土壤浓度胁迫处理后叶片中CAT酶活性的变化。结果表明随着

Pb 胁迫浓度的增加和处理时间的延长,CAT 活性呈现上升—下降的趋势。在未经处理的第 0 天,处理组间 CAT 活性无显著性差异( $P>0.05$ )(表 3)。在处理后的 1、7、25 d 内,Pb<sup>2+</sup> 胁迫质量浓度 500、800、1 000、1 200、1 500 mg/kg 下的 CAT 活性都是急剧上升—急剧下降—再缓慢下降,说明在这些胁迫浓度下旱柳对 Pb 胁迫作出了响应,在 1 d 内响应强烈,7 d 后旱柳已基本适应 Pb 胁迫,生命活动趋于稳定。800 mg/kg 的 Pb<sup>2+</sup> 胁迫质量浓度 CAT 值最大,在第 1 天、第 7 天、第 25 天与其他各组差异显著( $P<0.05$ ),这说明 800 mg/kg Pb<sup>2+</sup> 胁迫浓度的旱柳有最佳的耐受机制,生命响应活动激烈;Pb<sup>2+</sup> 质量浓度 1 800、2 000 mg/kg 下的 CAT 活性依然显著高于对照组,与 SOD、POD 不一样,说明 Pb 胁迫导致 CAT 活性增加,在 Pb<sup>2+</sup> 800 mg/kg 浓度下活性最高,在本试验设置的 Pb<sup>2+</sup> 最高胁迫浓度 2 000 mg/kg 时,依然没有低于对照组。

表 3 不同时间随着 Pb 含量变化的 CAT 活性分析

Table 3 Variations of CAT activity with lead content and time

酶种类	Pb <sup>2+</sup> 质量浓度 /(mg · kg <sup>-1</sup> )	0 d	1 d	7 d	25 d
CAT/(u · g <sup>-1</sup> )	0	15.26±0.32d	13.46±0.13d	15.33±1.20d	25.53±4.00d
	500	21.26±0.66d	90.66±1.45b	33.26±1.22e	41.53±3.29b
	800	31.63±0.46d	138.06±6.66a	73.60±2.34b	54.23±5.52c
	1 000	18.36±0.37d	124.86±6.13a	65.00±0.34b	51.93±0.63c
	1 200	18.13±0.20d	110.43±6.32b	64.13±2.55b	48.13±9.29c
	1 500	21.50±0.34d	91.33±2.40b	53.26±2.16c	33.06±1.73c
	1 800	31.80±0.51d	52.17±1.47c	48.00±0.92c	25.16±2.31d
	2 000	25.70±0.62d	33.00±2.94c	21.60±2.01d	17.33±1.41d

3 讨论

Pb 胁迫能够影响植物的正常生长代谢,刺激植物体产生的活性氧自由基(ROS),植物为减轻胁迫,会适应性的改变机体内具有清除氧自由基保护酶的活性<sup>[13-14]</sup>。本研究表明,旱柳叶片中 SOD、POD、CAT

这 3 种抗氧化酶在铅胁迫条件下其活性变化趋势基本相同,均随着浓度的升高和时间的延长呈现先升后降的趋势。这可能是由于旱柳在 Pb 胁迫下体内抗氧化酶活性升高,继而 SOD、POD 和 CAT 会清除一部分自由基,从而抑制膜脂过氧化的生理过程,一定程度上减少了 Pb 胁迫对植物的损伤<sup>[15-16]</sup>。

本研究中旱柳叶片在不同土壤  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度处理下,在低含量胁迫下 SOD、POD 和 CAT 活性增加,高含量 Pb 胁迫下抗氧化防御系统遭到破坏,保护酶活性下降。这一结果与李斌彬等<sup>[17]</sup>研究发现低浓度盐胁迫会诱导旱柳 SOD、POD 和 CAT 活性的升高,高含量盐胁迫则会抑制抗氧化酶活性的结论相同;在  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫质量浓度 800 mg/kg 时酶活值最大,高浓度(1 800 mg/kg)时严重破坏生长。

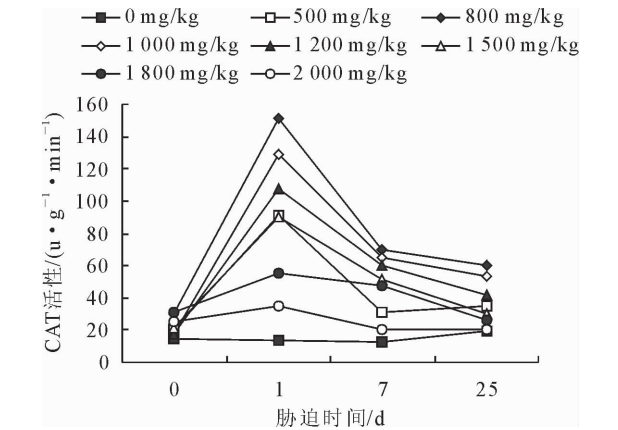


图 3 不同铅胁迫时间与含量对旱柳叶片 CAT 活性的影响  
Fig. 3 Effects of different lead stress time and contents on CAT activity

旱柳叶片中的 3 种保护酶 SOD、POD 和 CAT 活性均随时间呈先升高后降低的趋势,而李享<sup>[18]</sup>的研究发现中活血丹在受铅胁迫后,叶片中上述 3 种保护酶 SOD、POD 和 CAT 种酶的活性同样是呈先升高后降低的趋势。这与杨斌<sup>[19]</sup>和夹书珊<sup>[20]</sup>结果是一致的,5 种速生柳对重金属 Pb 耐受性强弱依次为旱柳>早快柳>竹柳>苏柳 795>苏柳 172,旱柳最强。本研究结果中旱柳的 SOD、POD、CAT 的活性最大值达到了 1 516.3 u/g、6 158.93 u/g · min、90.66 u/g · min,杨斌结果中旱柳的 SOD、POD、CAT 的活性最大值是 1 456.5 u/g、5 215 u/g · min、87.35 u/g · min,与之相比,结果一致。此外根据本试验中 3 种酶活的结果和实际的旱柳生长情况,得到旱柳在土壤  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫质量浓度为 500~800 mg/kg 时 Pb 耐受响应强,生长受到的影响较小,其中 800 mg/kg 时酶活值最大,这与夹书珊文中的 600 mg/kg 略有不同。沙翠云<sup>[21]</sup>的研究发现 Pb 胁迫后彩叶植物叶片中的可溶性糖与可溶性蛋白含量先升后降。

4 结论

超氧化物歧化酶(SOD)的活性在土壤  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度为 800 mg/kg 时达到最大值,1 800 mg/kg 浓度与对照组一致,2 000 mg/kg  $\text{Pb}^{2+}$  浓度低于对

照组。过氧化物酶(POD)的活性在  $\text{Pb}^{2+}$  质量浓度为 500 mg/kg 达到最大值,在 1 800 mg/kg 和 2 000 mg/kg  $\text{Pb}^{2+}$  浓度低于对照组。过氧化氢酶(CAT)的活性在  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 800 mg/kg 达到最大值,  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度为 2 000 mg/kg 时仍高于对照组,本试验设置的浓度范围不低于对照组。总的来说旱柳在 500~800 mg/kg 土壤  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度时,植株生长未受明显影响,且 3 种抗氧化酶有相对较高的活性,说明该浓度下旱柳耐 Pb 能力已达最大值,浓度增大旱柳耐 Pb 性下降;在 1 800~2 000 mg/kg 土壤  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度时达到最大耐受程度,但仍没有致死。

参考文献:

[1] 卢信,罗佳,高岩,等. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J]. 江苏农业学报,2014,30(3):671-681.  
LU X,LUO J,GAO Y,*et al.* A review in ecotoxic effect of antibiotics and heavy metals co-contamination in livestock and poultry breeding wastewater and its remediation[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2014,30(3):671-681. (in Chinese)  
[2] 李泽晖,李明杰,刘晨明,等. 氮掺杂氧化石墨烯修饰玻碳电极检测水中痕量 Pb(II) 研究[C]//中国环境科学学会,中国化学会. 第八届全国环境化学大会论文集. 广州,2015:1-2.  
[3] 环境污染对人体的伤害——凤翔“儿童血铅超标事件”说铅中毒[J]. 环境教育,2009(9):55-56.  
[4] 罗玉虎. 植物修复土壤重金属污染的研究进展[C]//《环境工程》编委会.《环境工程》2019 年全国学术年会论文集.下册. 北京,2019:874-881.  
[5] 柴宝玲,邵云,李春喜,等. 碳酸钙和粉煤灰对铅胁迫下小麦毒害的缓解效应[J]. 环境污染与防治,2008,30(9):6-10,16.  
CHAI B L,SHAO Y,LI C X,*et al.* Calcium carbonate and fly ash as remediation agents for reducing lead toxicity to wheat [J]. Environmental Pollution & Control,2008(9):6-10,16. (in Chinese)  
[6] 张红萍. 铅对植物的毒害及植物对铅的抗性机制[J]. 农业装备技术,2007,33(3):19-20.  
[7] 袁浏欢,万鹏伟,李强,等. 富营养条件下水培旱柳对锌和铜的富集特性[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(3):491-500.  
YUAN L H,WAN P W,LI Q,*et al.* Accumulation characteristics of Zn and Cu in cuttings of *Salix matsudana* Koidz under hydroponic eutrophication condition[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,2019,25(3):491-500. (in Chinese)  
[8] 杨艳琴,王莉霞,张宏忠,等. 盐碱化土壤对铅的吸附特性[J]. 江苏农业学报,2015,31(5):1031-1036.  
YANG Y Q,WANG L X,ZHANG H Z,*et al.* Adsorption of lead by saline-sodic soil[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2015,31(5):1031-1036. (in Chinese).  
[9] 林晓燕,许闯,龚亚龙,等. 不同植物物种及其组合对铅锌尾矿库修复效果研究[J]. 环境工程,2016,34(Supp. 1):983-987.

LIN X Y,XY C,GONG Y L,*et al.* Repairing effect of different plant species and their combination on lead-zinc tailings[J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (Supp. 1): 983-987. (in Chinese)

[10] 覃华勇,裴明建,崔强旺,等. 菜用甘薯水培营养液配方与品种筛选[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 161-167.

[11] 梁郸娜,胡其靖,曹磊,等. 蚜虫侵染对黄瓜叶片中丙二醛含量及保护酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 278-284.

LIANG D N,HU Q J,CAO L,*et al.* Effects of aphid (*Aphis gossypii* Glover) infestation on MDA content and protective enzymes activities in cucumber[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(2): 278-284. (in Chinese)

[12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-169.

[13] 张娜,杨双,童非,等. 铅污染对不同生境芦苇体内抗氧化酶系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(2): 333-339.

ZHANG N,YANG S,TONG F,*et al.* The effects of Pb pollution on the antioxidant enzyme system of *Phragmites australis* (common reed) in different habits[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(2): 333-339. (in Chinese)

[14] 宋波,曾炜铨,徐婷. 工程修复铅污染土壤的植物筛选与分类[J]. 环境工程, 2015, 33(9): 144-147, 73.

SONG B,ZENG Y Q,XU T,*et al.* Review on engineering application of plants for phytoremediation of lead-contaminated soil[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(9): 144-147, 73. (in Chinese)

[15] 梁贝,高芳磊,郭宏宇,等. 不同淹水梯度对芦苇实生苗生长和部分生理特性的影响[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2015, 35(4): 62-66.

LIANG B,GAO F L,GUO H Y,*et al.* Influence of different submergence gradients on growth and some physiological characteristics of *Phragmites communis* seedlings[J]. Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition, 2015, 35(4): 62-66. (in Chinese)

[16] 李亚宁,张丽红,殷艳艳,等. 典型磺胺类抗生素对油菜叶片叶绿素、可溶性蛋白及抗氧化酶的影响[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(11): 1209-1212.

LI Y N,ZHANG L H,YIN Y Y,*et al.* Effects of typical sulfonamides on the chlorophyll, soluble protein contents and peroxidases activity of *Brassica campestris*[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(11): 1209-1212. (in Chinese)

[17] 李斌彬,欧阳洁,王嘉玥,等. NaCl 对旱柳生长发育及部分生理特性的影响[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2017, 37(6): 37-42.

LI B S,OU Y J,WANG J Y,*et al.* Effects of NaCl on seedling growth and some physiological characteristics of *Salix matsudana* Koidz[J]. Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition, 2017, 37(6): 37-42. (in Chinese)

[18] 李享,宋红. 铅胁迫对活血丹叶片部分酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 43-48.

LI X,SONG H. Effects of Lead stress on some enzymes of *Glechoma longituba* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 43-48. (in Chinese)

[19] 杨斌,张文辉,高建欣. 5 种速生柳无性系对 Pb<sup>2+</sup> 胁迫的生理抗性比较[J]. 西北植物学报, 2015, 35(6): 1182-1189.

YANG B,ZHANG W H,GAO J X. Physiological resistance of five fast-growing willow clones to lead (Pb) stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(6): 1182-1189. (in Chinese)

[20] 夹书珊,王平,朱健,等. Pb 胁迫条件下旱柳扦插苗生长过程生理生化响应机制研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(16): 18-23.

JIA S S,WANG P,ZHU J,*et al.* Physiological and biochemical response mechanism in growth process of *Salix matsudana* cutting seedlings under lead stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(16): 18-23. (in Chinese)

[21] 沙翠芸,孟庆瑞,王静,等. 两种彩叶植物对铅胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 36-40.

SHA C Y,MENG Q R,WANG J,*et al.* Physiological responses of two colored-leaf species to Pb stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(4): 36-40. (in Chinese)