

## Pb 胁迫条件下狭叶香蒲种子的萌发特性及其幼苗的生理响应

徐金波, 徐迎春<sup>①</sup>, 赵 慧, 陈叶清

(南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 对 0、30、150、300、450 和 600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下狭叶香蒲 (*Typha angustifolia* Linn.) 种子的萌发特性进行了研究, 并分析了 0、450、900、1 800 和 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片及根系中部分生理生化指标的影响。结果表明, 随 Pb 浓度提高, 狭叶香蒲种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数以及下胚轴长度均逐渐下降且低于对照, 而其下胚轴长度抑制指数则逐渐增大, 但在 30  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下各项萌发指标均与对照无显著差异。叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 及总叶绿素含量随 Pb 浓度提高呈逐渐下降趋势, 但在 450 和 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下与对照无显著差异, 而在 1 800 和 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下显著低于对照。在 Pb 胁迫条件下叶片和根中 SOD 活性均显著高于对照但变化趋势不同; 随 Pb 浓度提高, 叶片 SOD 活性呈波动但整体上升的趋势, 而根中 SOD 活性则呈逐渐降低的趋势。叶片和根中 POD 活性均随 Pb 浓度提高呈持续上升的趋势, 其中, 在 450 和 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下叶片的 POD 活性低于对照、根的 POD 活性高于对照, 但均与对照无显著差异; 而在 1 800 和 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下叶片和根的 POD 活性均显著高于对照。在 Pb 胁迫条件下叶片和根中 AsA 和 MDA 含量均高于对照。随 Pb 浓度提高, 叶片的 AsA 含量总体上逐渐增加但在 450 和 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下与对照无显著差异; 而根的 AsA 含量则呈先增加后降低的趋势且均与对照差异显著。随 Pb 浓度提高, 叶片的 MDA 含量先增后降但均与对照无显著差异; 而根的 MDA 含量呈“高一低—高”的波动趋势且仅在 450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下与对照差异显著。综合分析结果显示: 狭叶香蒲幼苗根系对 Pb 胁迫的敏感性可能强于叶片; 狭叶香蒲种子可在轻度 Pb 污染水体中萌发和生长; 其幼苗对 Pb 胁迫具有一定的耐性, 可用于中度 Pb 污染水体的修复。

**关键词:** 狭叶香蒲; Pb 胁迫; 种子萌发特性; 生理响应; 污染水体修复

中图分类号: Q945.78; S564+.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)03-0074-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.10

**Seed germination characteristics and seedling physiological response of *Typha angustifolia* under Pb stress** XU Jinbo, XU Yingchun<sup>①</sup>, ZHAO Hui, CHEN Yeqing (College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(3): 74-80

**Abstract:** Seed germination characteristics of *Typha angustifolia* Linn. under Pb stress with concentrations of 0, 30, 150, 300, 450 and 600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  were studied, and effects of Pb stress with concentrations of 0, 450, 900, 1 800 and 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  on some physiological and biochemical indexes in leaf and root of seedling were analyzed. The results show that with rising of Pb concentration, germination rate, germination energy, germination index and vigor index and hypocotyl length of *T. angustifolia* seed all decrease gradually and are lower than those of the control, while inhibition index of hypocotyl length increases gradually, but under 30  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress, there is no significant difference in each germination index with the control. Contents of chl<sub>a</sub>, chl<sub>b</sub> and total chlorophyll in leaf appear the trend of decreasing gradually with rising of Pb concentration, but those under 450 and 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress have no significant differences comparing with those of the control, while those under 1 800 and

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011640)

作者简介: 徐金波(1987—),男,内蒙古锡林郭勒人,硕士研究生,主要从事观赏植物生理生态学研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: xyc@njau.edu.cn

2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress are significantly lower than those of the control. Under Pb stress, SOD activity in leaf and root is significantly higher than that of the control but their variation trend is different. With rising of Pb concentration, SOD activity in leaf appears a fluctuant but totally increasing trend, while that in root appears a gradually decreasing trend. POD activity in leaf and root appears a continually increasing trend with rising of Pb concentration. In which, under 450 and 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress, POD activity in leaf is lower and that in root is higher than that of the control but with no significant difference to the control, while POD activity in leaf and root under 1 800 and 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress is significantly higher than that of the control. Under Pb stress, contents of AsA and MDA in leaf and root are higher than those of the control. With rising of Pb concentration, overall, AsA content in leaf increases gradually but that under 450 and 900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress has no significant difference comparing with the control, while AsA content in root appears the trend of firstly increasing and then decreasing with a significant difference to the control. With rising of Pb concentration, MDA content in leaf firstly increases and then decreases but with no significant difference to the control, while MDA content in root appears the fluctuant trend of “high–low–high” and only that under 450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb stress has a significant difference comparing with the control. The comprehensive analysis result indicates that the sensitiveness of root of *T. angustifolia* to Pb stress is probably stronger than that of leaf. And *T. angustifolia* seed can germinate and grow in light Pb polluted water and its seedling has a certain tolerance to Pb stress, so it can be used for repairing middle Pb polluted water.

**Key words:** *Typha angustifolia* Linn.; Pb stress; seed germination characteristics; physiological response; polluted water restoration

目前全球的水体重金属污染问题日益严重,并已对环境、食品安全、人体健康和农业可持续发展构成巨大威胁,其中Pb毒害尤为严重,亟待治理。运用吸附Pb能力较强的水生植物对Pb污染水体进行生态修复是修复Pb污染水体的有效途径之一。

相关研究结果表明:香蒲属(*Typha* Linn.)的一些植物种类对Pb具有较强的耐性及吸附能力。叶志鸿等<sup>[1-2]</sup>和阳承胜等<sup>[3]</sup>的研究结果均表明:宽叶香蒲(*T. latifolia* Linn.)具有较强的忍耐、吸收和积累Pb的能力,其对铅锌矿废水中Pb的去除率达到90%;李永丽等<sup>[4]</sup>的研究结果表明:东方香蒲(*T. orientalis* Presl)对Pb有很强的富集作用,其地上部分平均Pb富集量为 $619 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、地下部分平均Pb富集量为 $1\,233 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;王凤永等<sup>[5]</sup>也认为东方香蒲对Pb重度污染土壤具有较强的耐受能力,并且其根部是Pb累积的主要器官。

狭叶香蒲(*T. angustifolia* Linn.)又名水烛、蒲菜等,为香蒲属多年生水生植物<sup>[6]</sup>,繁殖能力较强;其果穗(蒲棒)形状奇特、叶色浓绿,宜作花境、水景背景材料等,常用于点缀园林水池和构筑水景;蒲棒上的蒲黄还可入药<sup>[7]</sup>。研究结果表明:狭叶香蒲对Cd和Cu等重金属胁迫具有较强的耐性<sup>[8-11]</sup>,但狭叶香蒲对Pb胁迫是否具有相似的耐性尚缺乏研究报道。另外,在净化重金属污染水体的过程中,了解植物种子在高浓

度重金属污染水体中的萌发状况,对于污染环境的植物修复也具有重要意义。

鉴于以上原因,作者对不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲的种子萌发状况及幼苗部分生理生化指标的变化展开研究,以期对运用狭叶香蒲长期修复Pb污染水体提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验用狭叶香蒲的蒲棒(种子)和当年生幼苗分别于2013年10月和4月采自江苏省南京市中山陵下马坊公园池塘。

### 1.2 方法

1.2.1 种子的Pb胁迫处理方法及种子萌发指标的测定 挑选健康均一的种子,去除表面附着物,用质量体积分数2% NaClO溶液浸泡5 min后用自来水冲洗数次,并用蒸馏水冲洗3次;吸干种子表面水分,分别放入铺有2层滤纸的培养皿(直径9 cm)中,用滴管分别滴加浓度为30、150、300、450和600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液至完全浸没种子,对照(CK)则滴加等量蒸馏水。每个培养皿50粒种子,每处理4个培养皿,每皿视为1个重复。将种子置于昼温( $35 \pm 1$ ) $^\circ\text{C}$ 、夜温( $25 \pm 1$ ) $^\circ\text{C}$ 、光照时间 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的光照培养

箱中培养;每天补充适量蒸馏水以保证种子完全浸没在处理液中,每 2 d 更换 1 次  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  溶液。

从种子露白时开始每天记录种子的发芽数,5 d 后结束实验;每处理随机选取 10 粒种子,用游标卡尺测量下胚轴长度。根据观察结果计算各处理种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数及下胚轴长度抑制指数,计算公式分别为:发芽率=(实验结束时正常发芽的种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ ;发芽势=(发芽 3 d 时正常发芽的种子数/供试种子总数) $\times 100\%$ ;发芽指数( $GI$ )= $\sum(Gt/Dt)$ ,  $Gt$  为  $t$  天的种子发芽数,  $Dt$  为种子发芽天数;活力指数( $VI$ )= $GI \times S$ , 其中  $S$  为实验结束时幼苗的芽长度;下胚轴长度抑制指数=[(对照组下胚轴长度-处理组下胚轴长度)/对照组下胚轴长度] $\times 100\%$  [12]。

1.2.2 幼苗的 Pb 胁迫处理方法及生理生化指标的测定 将狭叶香蒲幼苗移植于塑料周转箱内,用自来水驯化 6 d(每 2 d 更换 1 次自来水)后移入温室内,用 1/2 Hoagland 营养液进行预培养,每 2 d 更换 1 次营养液,每个周转箱植入 3 株幼苗,并用电动气泵连续通气;待幼苗长出新根后,选取长势一致的植株,分别换用含有 0、450、900、1 800 和 2 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  的 1/2 Hoagland 营养液对幼苗进行胁迫培养,每处理 3 个周转箱,每箱视为 1 个重复。持续胁迫培养 15 d 后,取出各处理组幼苗并将植株分成叶和根两部分,分别用蒸馏水冲洗后置于液氮中处理并于  $-40^\circ\text{C}$  条件下保存,用于各项生理生化指标的测定。

采用乙醇提取法 [13] 测定叶绿素含量,乙醇体积

分数为 95%;采用氮蓝四唑(NBT)法 [14-15] 测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法 [16-17] 测定过氧化物酶(POD)活性;采用二联吡啶比色法 [18] 测定抗坏血酸(AsA)含量;采用硫代巴比妥酸(TBA)法 [19] 测定丙二醛(MDA)含量。

### 1.3 数据处理和统计方法

采用 EXCEL 2007 和 SPSS 17.0 统计分析软件对实验数据进行统计及差异显著性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 Pb 胁迫对狭叶香蒲种子萌发特性的影响

2.1.1 对种子发芽特性的影响 在不同浓度 Pb 胁迫条件下狭叶香蒲种子的萌发状况见表 1。由表 1 可见:随 Pb 胁迫浓度提高,狭叶香蒲种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均逐渐降低。在低浓度 ( $30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Pb 胁迫条件下,种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均与对照无显著差异 ( $P > 0.05$ );当 Pb 浓度达到  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,各指标均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ),分别较对照降低了 16.9%、15.2%、16.8% 和 55.4%,说明在  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下狭叶香蒲种子的萌发受到抑制;当 Pb 浓度达到  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数也均显著低于对照,且降低幅度更大,分别比对照降低了 57.6%、56.1%、59.2% 和 93.1%,说明高浓度 Pb 胁迫对狭叶香蒲种子发芽具有明显的抑制作用。

表 1 不同浓度 Pb 胁迫对狭叶香蒲种子萌发特性的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of Pb stress with different concentrations on seed germination characteristics of *Typha angustifolia* Linn. ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination energy	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
0 (CK)	88.50 $\pm$ 3.10a	85.50 $\pm$ 2.63a	28.00 $\pm$ 1.39a	231.28 $\pm$ 11.49a
30	84.50 $\pm$ 2.87ab	83.00 $\pm$ 2.08ab	25.17 $\pm$ 1.09ab	208.91 $\pm$ 24.91a
150	73.50 $\pm$ 2.22bc	72.50 $\pm$ 2.63bc	23.30 $\pm$ 1.08b	103.06 $\pm$ 4.46b
300	73.33 $\pm$ 5.46bc	71.30 $\pm$ 6.69bc	22.56 $\pm$ 1.56b	39.32 $\pm$ 6.21c
450	70.00 $\pm$ 2.00c	66.67 $\pm$ 2.40c	22.50 $\pm$ 1.25b	27.18 $\pm$ 5.39c
600	37.50 $\pm$ 4.92d	37.50 $\pm$ 4.92d	11.42 $\pm$ 1.25c	15.98 $\pm$ 3.16c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示经 LSD 检验差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) by LSD test.

2.1.2 对下胚轴伸长生长的影响 在不同浓度 Pb 胁迫条件下狭叶香蒲的下胚轴长度及其抑制指数见表 2。由表 2 可知:随 Pb 胁迫浓度的提高,狭叶香蒲

的下胚轴长度依次减小但其抑制指数却依次增大。在  $30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下,下胚轴长度与对照无显著差异,下胚轴长度抑制指数仅为 0.36%,说明

在较低浓度 Pb 胁迫下狭叶香蒲下胚轴的伸长生长几乎没有受到抑制;当 Pb 浓度达到  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,下胚轴长度显著低于对照,下胚轴长度抑制指数达到 50.36%,说明在该浓度 Pb 胁迫下其下胚轴的伸长生长受到明显抑制;随 Pb 浓度的提高,下胚轴长度明显减小且其抑制指数大幅增加,当 Pb 浓度达到  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,下胚轴长度仅为对照的 14.9%,而下胚轴长度抑制指数则最高(达到 85.11%)。说明狭叶香蒲下胚轴的伸长生长对低水平 Pb 胁迫有一定耐性。

表2 不同浓度 Pb 胁迫对狭叶香蒲下胚轴长度及其抑制指数的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Effect of Pb stress with different concentrations on hypocotyl length and its inhibition index of *Typha angustifolia* Linn. ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	下胚轴长度/mm Hypocotyl length	抑制指数/% Inhibition index
0 (CK)	8.26±0.37a	0.00
30	8.23±0.34a	0.36
150	4.10±0.17b	50.36
300	1.93±0.15c	76.63
450	1.38±0.09cd	83.29
600	1.23±0.05d	85.11

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示经 LSD 检验差异显著 ( $P < 0.05$ )  
Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) by LSD test.

## 2.2 Pb胁迫对狭叶香蒲幼苗生理特性的影响

2.2.1 对叶片叶绿素含量的影响 在不同浓度 Pb 胁迫条件下狭叶香蒲幼苗叶片中叶绿素含量的变化见表3。由表3可知:在  $450 \sim 2700 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下,随 Pb 浓度的提高,叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量逐渐下降。在  $450$  和  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量或略低于或略高于对照,但均与对照无显著差异,说明低浓

度 Pb 胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片中的叶绿素含量无明显影响。在  $1800$  和  $2700 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均显著低于对照,说明随 Pb 浓度的提高,狭叶香蒲幼苗叶片中的叶绿素合成受到明显抑制,导致叶片的叶绿素含量大幅降低。

表3 不同浓度 Pb 胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片中叶绿素含量的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Effect of Pb stress with different concentrations on chlorophyll content in leaf of *Typha angustifolia* Linn. seedling ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	叶绿素含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Chlorophyll content		
	Chla	Chlb	合计 Total
0 (CK)	8.12±0.50a	2.98±0.12a	11.11±0.62a
450	8.95±0.66a	3.10±0.22a	12.05±0.88a
900	8.48±0.67a	2.84±0.27a	11.33±0.93a
1800	5.46±0.63b	1.83±0.28b	7.29±0.91b
2700	3.25±0.11c	1.11±0.04c	4.36±0.15c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示经 LSD 检验差异显著 ( $P < 0.05$ )  
Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) by LSD test.

2.2.2 对叶片和根中 SOD 和 POD 活性的影响 在不同浓度 Pb 胁迫条件下狭叶香蒲幼苗叶片和根中 SOD 和 POD 活性的变化见表4。由表4可知:在不同浓度 Pb 胁迫条件下狭叶香蒲叶片和根中 SOD 活性均显著高于对照,但变化趋势有差异。叶片 SOD 活性随 Pb 浓度提高呈波动但整体上升的趋势,在  $2700 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下达到最高,为对照的 2.93 倍。而根中 SOD 活性则随 Pb 浓度提高逐渐降低,在  $450 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫下最高,达到  $1089.20 \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ,为对照的 5.09 倍;在  $2700 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb 胁迫条件下为  $660.53 \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ,为对照的 3.09 倍。

表4 不同浓度 Pb 胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片和根中 SOD 和 POD 活性的影响 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Effect of Pb stress with different concentrations on SOD and POD activities in leaf and root of *Typha angustifolia* Linn. seedling ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	不同器官中 SOD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ SOD activity in different organs				不同器官中 POD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ POD activity in different organs			
	叶片 Leaf		根 Root		叶片 Leaf		根 Root	
	叶片 Leaf	根 Root	叶片 Leaf	根 Root	叶片 Leaf	根 Root	叶片 Leaf	根 Root
0 (CK)	169.93±5.64b	213.92±34.04c	41.07±5.58c	137.83±23.66b	41.07±5.58c	137.83±23.66b	41.07±5.58c	137.83±23.66b
450	416.96±57.24a	1089.20±37.14a	28.87±4.45c	143.42±7.50b	28.87±4.45c	143.42±7.50b	28.87±4.45c	143.42±7.50b
900	421.61±11.40a	771.61±73.67ab	39.73±2.89c	167.52±12.51b	39.73±2.89c	167.52±12.51b	39.73±2.89c	167.52±12.51b
1800	406.17±10.90a	734.88±76.09ab	65.42±4.09b	244.16±14.96a	65.42±4.09b	244.16±14.96a	65.42±4.09b	244.16±14.96a
2700	498.30±41.95a	660.53±75.21b	80.70±3.11a	260.63±38.20a	80.70±3.11a	260.63±38.20a	80.70±3.11a	260.63±38.20a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示经 LSD 检验差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) by LSD test.



由表4还可见:在不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲叶片和根的POD活性的变化趋势基本一致,均随Pb浓度提高呈持续上升的趋势,但变化幅度略有差异。在450和900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下叶片POD活性低于对照但与对照无显著差异;而在1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下则显著高于对照,分别比对照增加了59.3%和96.5%。在450和900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下根中POD活性均高于对照但与对照无显著差异;而在1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下均显著高于对照,分别较对照增加了77.1%和89.1%。

### 2.2.3 对叶片和根中AsA和MDA含量的影响

不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲幼苗叶片和根中AsA和MDA含量变化见表5。由表5可知:在不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲叶片和根中的AsA含量均高于对照,且均呈波动的变化趋势,但差异幅度及变化范围略有不同。叶片中的AsA含量整体呈逐渐增加的趋势,但在450和900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下与对照无显著差异;而在1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下与对照差异显著,分别比对照增加了70.4%和112.2%。而根中AsA含量均与对照差异显著,且随Pb浓度升高呈先增加后降低的变化趋势,在900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下根中AsA含量最高,为对照的5.35倍。

表5 不同浓度Pb胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片和根中AsA和MDA含量的影响( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 5 Effect of Pb stress with different concentrations on AsA and MDA contents in leaf and root of *Typha angustifolia* Linn. seedling ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Pb 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	不同器官中 AsA 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ AsA content in different organs		不同器官中 MDA 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content in different organs	
	叶片 Leaf	根 Root	叶片 Leaf	根 Root
0(CK)	4.60±0.21c	1.00±0.19c	5.72±0.20a	7.44±0.18b
450	5.85±0.21c	3.39±0.42b	6.63±0.62a	9.39±0.55a
900	5.77±0.17c	5.35±0.43a	6.69±0.72a	7.70±0.43ab
1800	7.84±0.41b	5.06±0.11a	5.94±0.20a	7.81±0.71ab
2700	9.76±0.96a	4.81±0.29a	5.87±0.20a	8.34±0.56ab

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示经LSD检验差异显著( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) by LSD test.

由表5还可知:在不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲幼苗叶片和根中的MDA含量均高于对照,仅差异幅度及变化趋势略有不同。叶片中的MDA含量随Pb浓度升高呈先增加后降低的变化趋势,在900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下最高,但各处理组叶片中的MDA含量与对照均无显著差异,说明Pb胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片细胞膜没有明显的过氧化伤害。根中的MDA含量随Pb浓度升高呈现“高一低—高”的波动变化趋势,在450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下最高,较对照增加了26.2%,且差异显著;而其他处理组根中的MDA含量与对照无显著差异,这可能是由于在受到较低浓度Pb胁迫时狭叶香蒲幼苗产生的应激反应导致MDA含量升高。

## 3 讨论和结论

实验结果表明:随Pb胁迫浓度的提高,狭叶香蒲种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均逐渐

降低,这与曾祥玲等<sup>[20]</sup>对Pb胁迫条件下沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)种子萌发特性的研究结论一致。本研究中,在较低浓度(150  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )Pb胁迫条件下,狭叶香蒲种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均显著低于对照,但其发芽率仍然达到73.50%,说明虽然较低浓度的Pb胁迫对其种子萌发的各项指标均有一定的抑制作用,但对狭叶香蒲种子萌发的综合抑制作用不明显。而在600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数也均显著低于对照,发芽率仅为37.50%,说明高浓度Pb胁迫对狭叶香蒲种子的萌发有较强的抑制作用。随着Pb胁迫浓度的提高,狭叶香蒲的下胚轴长度逐渐减小、抑制指数依次增大,这与王锦文等<sup>[21]</sup>对Pb胁迫下水稻(*Oryza sativa* Linn.)的相关研究结论一致。30  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫对狭叶香蒲下胚轴伸长生长的抑制作用较小;150  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫对其下胚轴伸长生长有显著抑制作用,下胚轴长度抑制指数达到50.36%;当Pb浓度达到600  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其下胚

轴长度抑制指数高达85.11%,说明高浓度Pb胁迫严重破坏了狭叶香蒲种子萌发过程中下胚轴的伸长生长。综上所述,狭叶香蒲种子在较低浓度(30~150  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Pb胁迫条件下能萌发并且下胚轴能进行伸长生长,表现出一定的耐性;而随Pb胁迫浓度的提高,对狭叶香蒲种子萌发的毒害作用越来越明显,这与Zhang等<sup>[22]</sup>对水稻种子的相关研究结果类似。

随Pb胁迫浓度的提高,狭叶香蒲叶片中的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均下降;在450和900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下,狭叶香蒲叶片中叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量与对照均无显著差异,而在1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下均显著低于对照,说明较低浓度Pb胁迫对狭叶香蒲幼苗叶片的叶绿素合成并没有明显的影响,而较高浓度Pb胁迫则对狭叶香蒲幼苗叶片的叶绿素合成有明显的抑制作用。这与何冰等<sup>[23]</sup>的相关研究结论一致。

超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是植物细胞内抗氧化系统的重要组成部分,具有可抑制活性氧产生、清除超氧阴离子自由基、控制脂质过氧化和减少质膜系统损伤等作用<sup>[24-25]</sup>。在不同浓度Pb胁迫条件下,狭叶香蒲幼苗叶片和根的SOD活性均显著高于对照,说明Pb胁迫可提高狭叶香蒲幼苗体内细胞清除超氧阴离子自由基的能力,并在一定程度上降低细胞受毒害的程度,提高幼苗耐Pb胁迫的能力;在450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下,狭叶香蒲根和叶片的SOD活性分别比对照增加409.2%和145.4%,可见其根系对Pb胁迫的生理响应强于叶片,可能与水培实验中根系是Pb胁迫的直接受害器官有关。在1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下,狭叶香蒲叶片和根的POD活性显著增加,且在1800  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下分别较对照增加59.3%和77.1%,表明较高浓度的Pb能够刺激狭叶香蒲幼苗体内POD活性增强,并且根系对Pb胁迫的敏感性强于叶片。

抗坏血酸(AsA)是植物细胞中的重要抗氧化剂<sup>[26]</sup>。随Pb胁迫浓度提高,狭叶香蒲幼苗叶片中的AsA含量大体呈增高趋势,但仅在较高浓度(1800和2700  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Pb胁迫条件下显著高于对照;而在低浓度(450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Pb胁迫条件下根中的AsA含量就显著高于对照,并且在900  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb胁迫条件下达到最高,说明低浓度Pb胁迫对狭叶香蒲根系细胞有明显的伤害作用,也说明其根系对Pb胁迫的敏感性较强。

丙二醛(MDA)是逆境条件下植物体内膜脂过氧化作用的产物,其在植物组织中的积累量可反映膜脂过氧化的程度<sup>[27]</sup>。在不同浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲幼苗叶片的MDA含量与对照均无显著差异;根的MDA含量仅在低浓度(450  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Pb胁迫条件下显著高于对照,而在其他浓度Pb胁迫条件下均与对照无显著差异,这可能是由于低浓度Pb胁迫条件下根系的应激反应导致MDA含量显著上升,也表明狭叶香蒲根系对Pb胁迫比较敏感。

综上所述,在低浓度Pb胁迫条件下狭叶香蒲种子具有较高的发芽率并且下胚轴能进行伸长生长,说明其种子能忍受较低浓度(30  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的Pb胁迫,可以在轻度Pb污染水体中正常萌芽和生长;在不同浓度Pb胁迫条件下,幼苗叶片和根总体上表现出一定的耐性,可用于中度Pb污染水体的修复。本实验中,在同一浓度Pb胁迫条件下,狭叶香蒲根系的SOD和POD活性以及MDA和AsA含量变化幅度均大于叶片,一方面可能与其根系对Pb胁迫较敏感有关,另一方面也可能因为根部是水体Pb胁迫的直接受害器官、受伤害程度大于叶片。许卫锋<sup>[9]</sup>认为:狭叶香蒲主要在根部累积Cd,叶片中Cd的累积量较低。据此推测,狭叶香蒲也可能通过根部积累Pb并减少叶片中Pb的积累量,以此减轻Pb胁迫对叶片的损伤,这一作用的机制及普遍性还有待进一步研究证实。

#### 参考文献:

- [1] 叶志鸿,陈桂珠,蓝崇钰,等. 宽叶香蒲净化塘系统净化铅/锌矿废水效应的研究[J]. 应用生态学报, 1992, 3(2): 190-194.
- [2] 叶志鸿,陈桂珠,蓝崇钰,等. 铅锌矿废水中重金属在宽叶香蒲(*Typha latifolia*)的积累与分布[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992(1): 72-79.
- [3] 阳承胜,蓝崇钰,束文圣. 重金属在宽叶香蒲人工湿地系统中的分布与积累[J]. 水处理技术, 2002, 28(2): 101-104.
- [4] 李永丽,李欣,李硕,等. 东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对铅的富集特征及其EDTA效应分析[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 555-558.
- [5] 王凤永,郭朝晖,苗旭峰,等. 东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对重度污染土壤中As、Cd、Pb的耐性与累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 1966-1971.
- [6] 袁宜如,李晓云,高光林. 狭叶香蒲及其开发利用研究进展[J]. 现代农业科技, 2012(9): 112-113, 115.
- [7] 陈佩东,严辉,丁安伟. 不同产地蒲黄中总黄酮的含量测定[J]. 江苏中医药, 2007, 39(6): 55-56.
- [8] 吴晓丽,罗玉明,徐迎春,等. 镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标

- 的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 74-76.
- [9] 许卫锋. 狭叶香蒲耐镉的生理生化机制及其修复镉污染环境的潜力[D]. 扬州: 扬州大学生物科学与技术学院, 2004.
- [10] 张弛, 袁亚光, 钦佩, 等. 香蒲对重金属镉的耐性及吸收途径研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 506-511.
- [11] 赵艳, 徐迎春, 柴翠翠, 等. 铜胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响[J]. 广西植物, 2010, 30(3): 367-372.
- [12] 任安芝, 高玉葆. 铅、镉、铬单一和复合污染对青菜种子萌发的生物学效应[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1): 19-22.
- [13] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.
- [14] BEAUCHAMP C, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase; improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. Analytical Biochemistry, 1971, 44(1): 276-287.
- [15] ZHOU W J, ZHAO D, LIN X. Effects of waterlogging on nitrogen accumulation and alleviation of waterlogging damage by application of nitrogen fertilizer and mixtalol in winter rape (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1997, 16(1): 47-53.
- [16] QUINTANILLA-GUERRERO F, DUARTE-VÁZQUEZ M A, GARCÍA-ALMENDAREZ B E, et al. Polyethylene glycol improves phenol removal by immobilized turnip peroxidase [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8605-8611.
- [17] MUÑOZ-MUÑOZ J L, GARCÍA-MOLINA F, GARCÍA-RUIZ P A, et al. Enzymatic and chemical oxidation of trihydroxylated phenols [J]. Food Chemistry, 2009, 113: 435-444.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 125.
- [19] 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: 260-263.
- [20] 曾祥玲, 曹成有, 高菲菲, 等. 镉、铅对沙打旺种子萌发及早期生长发育的毒性效应[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 71-77.
- [21] 王锦文, 边才苗, 陈珍. 铅、镉胁迫对水稻种子萌发、幼苗生长及生理指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2009(4): 77-79.
- [22] ZHANG S, HU J, CHEN Z H, et al. Effects of Pb pollution on seed vigor of three rice cultivars[J]. Rice Science, 2005, 12(3): 197-201.
- [23] 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.
- [24] 刘素纯, 萧浪涛, 廖柏寒, 等. 铅胁迫对黄瓜幼苗抗氧化酶活性及同工酶的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 300-304.
- [25] 谢传俊, 杨集辉, 周守标, 等. 铅递进胁迫对假俭草和结缕草生理特性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 65-70.
- [26] 周希琴, 莫灿坤. 植物重金属胁迫及其抗氧化系统[J]. 新疆教育学院学报, 2003(2): 103-108.
- [27] 孙天国, 沙伟, 刘岩. 复合重金属胁迫对两种藜类植物生理特性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2332-2339.

(责任编辑: 佟金凤)

## 《生物质化学工程》2015年征订启事

《生物质化学工程》是由国家林业局主管、中国林业科学研究院林产化学工业研究所主办, 国内外公开发行的全国生物质化工行业的技术类刊物。被美国《化学文摘》和《乌利希国际期刊指南》收录, 是 RCCSE 中国核心学术期刊(A)和2010年中国农业核心期刊, 也是中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、万方数据——数字化期刊群和 CEPS 中文电子期刊服务的全文收录期刊, 并为“中国学术期刊综合评价数据库”统计刊源期刊和《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。

报道范围: 可再生的木质和非木质生物质资源的化学加工与利用, 包括生物质能源、生物质化学品、生物质新材料、生物质天然活性成分和制浆造纸等。报道内容: 松脂化学、生物质能源化学、生物质炭材料、生物基功能高分子材料、胶黏剂化学、森林植物资源提取物化学利用、环境保护工程、木材制

浆造纸为主的林纸一体化和林产化学工程设备研究设计等。主要栏目: 研究报告、综述评论、行业热点、国内外信息等。读者对象: 在生物质化学工业、林产化学工业、林业、农业、森工、能源、轻工、化工、环保、医药、食品、土产、商检、外贸等行业从事科研、教学、生产、经营、设计等相关工作的人士。

双月刊, A4 开本, 56 页, 单月月底出版。邮发代号 28-205, 每期定价 10.00 元, 全年定价 60.00 元; 国外发行代号 BM2743, 国外年定价 60 美元。编辑部地址: 江苏省南京市锁金五村 16 号林化所内(邮编 210042); 电话和传真: 025-85482492; E-mail: bce@vip.163.com; 网址: http://www.bce.ac.cn。

欢迎投稿和订阅! 欢迎来电来函联系广告业务!