

Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗生长和生理生化特性的影响

朱旭东^{1,2}, 原海燕², 黄苏珍^{2,①}, 田松青¹, 杨敬敏²

[1. 苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215008; 2. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

摘要: 采用液体培养法研究了 0(CK)、200、400、600 和 800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下路易斯安那鸢尾(Louisiana Iris) 品种‘Professor Neil’ 幼苗生长, 叶片叶绿素含量, 叶片和根系的丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量、超氧阴离子自由基(O₂⁻)产生速率以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化。结果表明: 随 Pb 质量浓度的提高, 幼苗的株高、根长、叶片和根系干质量以及耐性指数总体呈逐渐下降的趋势, 且总体上显著低于对照($P < 0.05$), 但各处理组间差异不显著。幼苗叶片的叶绿素 a 和 b 含量均随 Pb 质量浓度提高而缓慢下降, 但仅在 800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下叶绿素 a 含量显著低于对照($P < 0.05$), 其余处理组的叶绿素 a 和 b 含量及叶绿素 a/b 比值均与对照无显著差异。叶片和根系的 MDA 和 Pro 含量及 POD 活性均随 Pb 质量浓度提高逐渐增加, 根系的 SOD 活性则随 Pb 质量浓度提高逐渐降低; 而叶片的 SOD 活性以及叶片和根系的 CAT 活性和 O₂⁻ 产生速率均在 200 ~ 600 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下随 Pb 质量浓度提高逐渐增加, 但在 800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫下均不同程度降低, 表明路易斯安那鸢尾可通过体内抗氧化酶和相关物质的诱导及合成缓解低浓度 Pb 胁迫对其造成的毒害作用, 而高浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾的伤害较重。综合分析结果表明: 路易斯安那鸢尾具有一定的耐 Pb 特性和修复 Pb 污染水体的潜能。

关键词: Pb 胁迫; 路易斯安那鸢尾; 生长指标; 生理生化特性; 植物修复

中图分类号: Q945.78; X53; S682.1+9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)04-0062-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.04.09

Effect of Pb stress on growth and physiological-biochemical characteristics of Louisiana Iris seedling ZHU Xudong^{1,2}, YUAN Haiyan², HUANG Suzhen^{2,①}, TIAN Songqing¹, YANG Jingmin² (1. Suzhou Polytechnical Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(4): 62-67

Abstract: Changes of seedling growth, chlorophyll content in leaf, contents of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro), superoxide anion free radical (O₂⁻) production rate and activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in leaf and root of Louisiana Iris ‘Professor Neil’ seedling under stress condition with 0(CK), 200, 400, 600 and 800 mg · L⁻¹ Pb were researched by solution culture method. The results show that with enhancing of Pb concentration, generally, height, root length, dry weights of leaf and root and tolerance index of seedling appear gradually decreasing trend, and are significantly lower than those of the control ($P < 0.05$) as a whole, but there is no significant difference among treatment groups. With enhancing of Pb concentration, contents of Chla and Chlb in leaf of seedling decrease gradually but only Chla content under 800 mg · L⁻¹ Pb stress is significantly lower than that of the control ($P < 0.05$), differences in contents of Chla and Chlb and ratio of Chla/Chlb between other treatment groups and the control all are not significant. With enhancing of Pb

收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 江苏省教育厅青蓝工程项目(2014-24; 2012-246); 江苏省农业三新工程项目(SXGC[2013]088); 苏州市科技支撑计划项目(SNG201209)

作者简介: 朱旭东(1972—),男,安徽合肥人,博士研究生,副教授,主要从事观赏植物资源与环境修复等方面的研究。

①通信作者 E-mail: hsz1959@163.com

concentration, contents of MDA and Pro and POD activity in leaf and root all increase, and SOD activity in root decreases. While SOD activity in leaf and CAT activity and O_2^- production rate in leaf and root all increase with enhancing of Pb concentration under 200–600 $mg \cdot L^{-1}$ Pb stress, but those decrease with different degrees under 800 $mg \cdot L^{-1}$ Pb stress, meaning that Louisiana Iris can relieve the toxic action caused by low concentration of Pb stress via induction and synthesis of antioxidant enzymes and related substances *in vivo*, while damage of high concentration of Pb stress to Louisiana Iris is serious. The comprehensive analysis result indicates that Louisiana Iris possesses a certain resistance to Pb and the potential ability to repair water polluted by Pb.

Key words: Pb stress; Louisiana Iris; growth index; physiological-biochemical characteristics; phytoremediation

环境中的铅(Pb)易被植物吸收和富集,并可通过食物链进入人体。目前,部分耕地和河流湖泊受到不同程度的Pb污染,对民众的生命和身体健康具有一定的危害性,因此,对环境Pb污染进行治理刻不容缓。植物修复技术是治理重金属污染的生物修复技术之一,而从观赏植物中筛选有效的Pb富集植物并加以改良,不但可以美化环境,还具有修复Pb污染环境的作用。

鸢尾属(*Iris* Linn.)的许多种类具有积累重金属的能力,并对重金属污染环境具有一定的修复作用。如:溪荪(*I. sanguinea* Donn ex Horn.)对Pb胁迫的耐性较强,并对Pb和Cd等重金属元素具有一定的积累能力,可用于Pb污染环境的植物修复^[1];而马蔺(*I. lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.)对Pb-Cu复合胁迫环境具有一定的耐受能力^[2]。路易斯安那鸢尾(Louisiana Iris)隶属于鸢尾属的一个分类系(Ser. *Hexagonae*),由原产于美国东南部路易斯安那州及其周边地区的5个鸢尾属种类*I. fulva* Ker-Gawl.、*I. hexagona* Walter、*I. brevicaulis* Raf.、*I. giganticaerulea* Small和*I. nelsonii* Randolph及其杂交种组成,是一类观赏性状优良且易于栽培的水生观赏植物,在水体绿化和环境污染治理方面具有突出优势^[3-5],并且在苏州地区其地上部分在冬季仍能保持绿色,观赏性较强。路易斯安那鸢尾的适生性较强,其野生种群已在盐胁迫环境中存活2 000 a以上,而其杂交品种则能适应旱地和湿地等不同环境^[6],但有关路易斯安那鸢尾对Pb等重金属胁迫的耐性研究尚未见报道。

作者研究了液体培养条件下不同质量浓度Pb胁迫对路易斯安那鸢尾品种‘Professor Neil’幼苗生长、叶片叶绿素含量及叶片和根的部分生理生化指标的影响,以期初步阐明路易斯安那鸢尾的耐Pb性,为深入研究其耐Pb机制以及筛选重金属污染环境植物修

复种类提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验材料为引自美国并在江苏省·中国科学院植物研究所鸢尾种质圃栽培20 a的路易斯安那鸢尾品种‘Professor Neil’的幼苗。

1.2 方法

1.2.1 Pb胁迫方法 于2012年3月在温室内选择长势和株高均较一致的路易斯安那鸢尾幼苗,使用1/2 Hoagland营养液预培养4周,至幼苗根长达3 cm以上时进行Pb胁迫实验。Pb以 $Pb(NO_3)_2$ 形式加入1/10 Hoagland营养液中,使 Pb^{2+} 的最终质量浓度分别为0、200、400、600和800 $mg \cdot L^{-1}$ 。处理液分别装入高15 cm、直径20 cm的不透光塑料盆(盆外包裹黑色塑料薄膜)中,每盆中放入用塑料泡沫板和海绵支撑种植的大小一致的幼苗3株,每处理5盆,共25盆75株幼苗。每周更换1次处理液,处理4周后取样测定各生长及生理生化指标。每个指标均重复测定3次。

1.2.2 指标测定方法 每个处理组随机选取3株幼苗,用去离子水冲洗干净并吸干表面水分,用直尺分别测量幼苗的株高和根长并计算平均值,按照公式“耐性指数=(处理组幼苗平均根长/对照组幼苗平均根长)×100%”计算幼苗的耐性指数。将每株幼苗的全部叶片和根系分开,分别在105℃下杀青2 h,然后置于60℃烘干至恒质量并称量,分别计算幼苗的单株叶片干质量和单株根系干质量的平均值。

取剩余幼苗相同部位新鲜叶片测定叶绿素a和b含量;取相同部位新鲜叶片和根系测定丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,超氧阴离子自

由基(O_2^-)产生速率。叶绿素含量测定参照李合生^[7]¹³⁴⁻¹³⁷的方法;MDA含量测定采用硫代巴比妥酸法^[7]²⁶⁰⁻²⁶¹;Pro含量测定采用茚三酮比色法^[7]²⁵⁸⁻²⁵⁹;SOD活性测定采用NBT光化还原法^[7]¹⁶⁷⁻¹⁶⁸;POD活性测定采用愈创木酚-过氧化氢法^[7]¹⁶⁴⁻¹⁶⁵;CAT活性测定采用紫外吸收法^[8]; O_2^- 产生速率测定参照Elstner等^[9]的方法。

1.3 数据计算和统计分析

采用EXCEL 2010和SPSS 13.0统计分析软件对相关实验数据进行统计和方差分析,并运用邓肯氏(Duncan's)新复极差法进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗生长的影响

不同质量浓度Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗生长的影响见表1。由表1可见:随着Pb质量浓度的提高,路易斯安那鸚尾幼苗的株高和根长均呈逐渐下降的趋势。在 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下幼苗的株高和根长均最低,分别较对照下降25.87%和40.01%。经Pb胁迫处理后幼苗的株高与对照均存在显著差异($P<0.05$),但幼苗的根长仅在600和 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb

表1 不同质量浓度Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗生长的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of Pb stress with different concentrations on growth of Louisiana Iris seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Pb 质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb concentration	株高/cm Seedling height	根长/cm Root length	单株不同部位的干质量/g Dry weight of different parts per plant		耐性指数/% Tolerance index
			叶片 Leaf	根系 Root	
0(CK)	61.84±6.79a	15.27±2.91a	1.61±0.27a	0.22±0.09a	100.00
200	51.43±7.85b	12.46±4.63ab	0.97±0.25b	0.08±0.03b	81.60
400	51.35±8.68b	12.45±2.80ab	1.06±0.22b	0.09±0.02b	81.53
600	47.88±6.22b	10.27±4.89b	0.95±0.17b	0.08±0.02b	67.26
800	45.84±10.26b	9.16±3.17b	0.87±0.31b	0.07±0.06b	59.99

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

胁迫条件下与对照存在显著差异。

由表1还可见:在Pb胁迫条件下幼苗的单株叶片干质量和单株根系干质量均与对照差异显著,但各处理组间无显著差异($P>0.05$)。在 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下,幼苗的单株叶片干质量和单株根系干质量均最低,分别较对照下降45.96%和68.18%,下降幅度明显高于株高和根长。

各处理组幼苗的耐性指数随Pb质量浓度的提高呈逐渐降低的趋势。在200和 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下幼苗的耐性指数相近,均达到80%以上;但在600和 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下幼苗的耐性指数明显减小,说明在高浓度Pb胁迫条件下,路易斯安那鸚尾幼苗对Pb胁迫的耐性明显降低,植株生长受到较强抑制。

2.2 Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗部分生理生化指标的影响

2.2.1 对叶片叶绿素含量的影响 不同质量浓度Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗叶片叶绿素含量的影响见表2。结果显示:不同质量浓度Pb胁迫条件下路易

表2 不同质量浓度Pb胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗叶片叶绿素含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of Pb stress with different concentrations on chlorophyll content in leaf of Louisiana Iris seedling ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Pb 质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb concentration	含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Content		Chla/Chlb
	Chla	Chlb	
0(CK)	14.77±1.05a	6.36±0.45a	2.32a
200	14.09±0.80a	5.70±1.05a	2.47a
400	12.24±0.96ab	5.50±1.23a	2.04a
600	9.61±1.44ab	4.40±0.77a	2.19a
800	5.83±0.59b	2.52±1.03a	2.32a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

斯安那鸚尾幼苗叶片的叶绿素a和b含量均较对照有所下降。与对照相比,在400和 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫条件下路易斯安那鸚尾幼苗叶片的叶绿素a含量下降不明显,而 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb胁迫处理组幼苗叶片的叶绿素a含量($5.83\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)显著下降($P<0.05$),仅为对照($14.77\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)的39.47%;各处理组幼苗叶片的叶绿素b含量与对照均不存在显著差异($P>$

0.05);各处理组幼苗叶片的叶绿素 a/b 比值也与对照无显著差异。

2.2.2 对叶片和根系丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量的影响 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗叶片和根中 MDA 和 Pro 含量的影响见表 3。在 200~800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下,幼苗根系和叶片的 MDA 含量均随着 Pb 质量浓度提高而上升,表明幼苗遭受的伤害越来越严重。根中的 MDA 含量均低于叶片,但根中 MDA 含量较对照的增幅明显大于叶片。在 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下叶片的 MDA 含量略低于对照且与对照差异不显著 ($P>0.05$),但在 400~800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下叶片的 MDA 含量均显著 ($P<0.05$) 高于对照;而各处理组根系 MDA 含量则均

显著高于对照。600 和 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理组叶片的 MDA 含量分别较对照提高 0.90 和 1.95 倍,而根系 MDA 含量则分别较对照提高 2.45 和 3.34 倍。

由表 3 还可知:各 Pb 胁迫处理组幼苗根系和叶片的 Pro 含量均随 Pb 质量浓度提高而上升。根系中的 Pro 含量明显低于叶片,但叶片中 Pro 含量较对照的增幅明显大于根系。各处理组间以及处理组与对照间的根系 Pro 含量差异均不显著;在 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下叶片的 Pro 含量与对照差异不显著,但在 400、600 和 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下叶片的 Pro 含量均显著高于对照,分别较对照提高 5.15、7.89 和 16.10 倍。

表 3 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗叶片和根系丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of Pb stress with different concentrations on contents of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) in leaf and root of Louisiana Iris seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Pb 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	MDA 含量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content		Pro 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Pro content	
	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0(CK)	13.80±2.25d	4.53±0.56d	66.03±28.77d	18.17±6.96a
200	13.55±0.81d	7.07±1.51c	87.12±14.34d	22.86±10.55a
400	24.00±3.40c	9.22±0.15c	406.33±69.99c	38.59±23.37a
600	26.20±0.94b	15.62±2.28b	586.85±51.04b	65.83±50.63a
800	40.69±4.23a	19.65±1.50a	1 129.15±64.32a	66.37±58.83a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

2.2.3 对叶片和根系抗氧化酶活性的影响 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗叶片和根中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响见表 4。由表 4 可以看出:随 Pb 质量浓度的提高,幼苗叶片和根中的 SOD 和 CAT 活性均呈现低浓度时升高、高浓度时降低的趋势,其中,

200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下幼苗根系的 SOD 活性最高,600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下幼苗叶片的 SOD 活性以及叶片和根系的 CAT 活性均达到最高;而叶片和根的 POD 活性则呈现逐渐升高的趋势。在不同质量浓度 Pb 胁迫条件下叶片 SOD 活性均高于根系,根系 CAT 活性均高于叶片,但 POD 活性则表现为在低于

表 4 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗叶片和根系 SOD、POD 和 CAT 活性的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Effect of Pb stress with different concentrations on activities of SOD, POD and CAT in leaf and root of Louisiana Iris seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Pb 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration	SOD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ SOD activity		POD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ POD activity		CAT 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ CAT activity	
	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0(CK)	376.82±18.10b	373.96±4.97a	429.38±208.12c	1 098.75±128.69b	16.23±0.94c	20.33±7.70c
200	397.58±19.52ab	374.74±46.66a	990.45±267.00bc	1 228.68±248.53ab	25.97±10.81bc	44.94±12.53b
400	406.14±4.45a	364.05±21.51a	1 237.50±160.37b	1 359.75±135.33ab	32.12±16.48bc	52.10±4.77b
600	414.45±7.74a	348.01±17.36a	1 561.88±573.12ab	1 610.63±561.67ab	51.61±13.70a	92.12±13.36a
800	412.63±2.13a	321.83±31.13a	2 010.81±483.08a	1 741.88±177.01a	39.82±9.35ab	57.32±1.79b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) by Duncan's new multiple range test.

800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下根系高于叶片、而在 800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下则为叶片高于根系。各处理组的根系 SOD 活性无显著差异 ($P > 0.05$); 而 400 ~ 800 mg · L⁻¹ Pb 处理组叶片的 SOD 活性均与对照有显著差异 ($P < 0.05$), 但各处理组间差异不显著。400 ~ 800 mg · L⁻¹ Pb 处理组叶片中的 POD 活性以及 800 mg · L⁻¹ Pb 处理组根中的 POD 活性均与对照有显著差异。

2.2.4 对叶片和根系 O₂⁻ 产生速率的影响 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗叶片和根系中 O₂⁻ 产生速率的影响见表 5。随 Pb 胁迫浓度的提高, 路易斯安那鸚尾幼苗叶片和根系的 O₂⁻ 产生速率均呈现低浓度时上升、高浓度时下降的趋势, 并均在 600 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下达到最大。分析结果表明: 600 和 800 mg · L⁻¹ Pb 处理组叶片和根系的 O₂⁻ 产生速率均显著 ($P < 0.05$) 高于对照, 并且, 各处理组根系的 O₂⁻ 产生速率均高于叶片。

表 5 不同质量浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸚尾幼苗叶片和根系 O₂⁻ 产生速率的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Effect of Pb stress with different concentrations on O₂⁻ production rate in leaf and root of Louisiana Iris seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Pb 质量浓度/mg · L ⁻¹ Pb concentration	O ₂ ⁻ 产生速率/μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹ O ₂ ⁻ production rate	
	叶片 Leaf	根系 Root
	0 (CK)	16.23 ± 0.97c
200	25.97 ± 10.83bc	44.94 ± 12.52bc
400	32.12 ± 16.39bc	52.10 ± 4.69bc
600	51.61 ± 13.75a	92.12 ± 13.35a
800	39.82 ± 9.21ab	51.10 ± 1.79ab

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经邓肯氏新复极差检验差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$) by Duncan's new multiple range test.

3 讨论和结论

Pb 是植物的毒性元素之一, 不同植物对 Pb 的敏感性和响应过程依赖于其自身的基因型和生理特性。Pb 胁迫会引起植物叶绿体超微结构发生变化, 抑制叶和根的生长以及叶片的光合作用, 导致细胞膜受损^[10]。相关研究结果^[11-12]表明: Pb 胁迫时间和水平与其对植物光合作用的抑制效应呈正相关, 与叶绿素含量呈负相关。本实验中, 不同质量浓度 Pb 胁迫条件下路易斯安那鸚尾幼苗叶片叶绿素 a 和 b 的含量

也与 Pb 质量浓度呈负相关, 即随着 Pb 质量浓度升高其叶绿素 a 和 b 含量均逐渐下降。这可能与“Pb 胁迫条件下植物的光合系统和一些光合酶活性以及叶绿素合成受到抑制^[13]”或者“Pb²⁺ 取代叶绿素分子中的 Mg²⁺ 从而破坏叶绿素结构并抑制光合作用^[14]”有关。

本实验中, 200 mg · L⁻¹ Pb 处理条件下路易斯安那鸚尾幼苗叶片的丙二醛 (MDA) 含量与对照相比无显著变化, 表明该 Pb 胁迫水平并未导致路易斯安那鸚尾叶片细胞发生明显的膜脂过氧化反应, 细胞未受到明显伤害, 说明路易斯安那鸚尾对 200 mg · L⁻¹ Pb 胁迫具有一定的耐性。但是, 400、600 和 800 mg · L⁻¹ Pb 处理条件下路易斯安那鸚尾根和叶片的 MDA 含量均较对照显著增加, 并且 Pb 胁迫水平越高, 叶片和根系的 MDA 含量也越高, 说明此时其体内活性氧水平较高, 细胞受到氧化胁迫的伤害。这一研究结果与原海燕^[15]对 Pb 胁迫下同属植物马蔺以及朱广慧等^[16]对 Cd 和 Cu 胁迫下路易斯安那鸚尾的相关研究结果一致。然而, 本研究中根系的 MDA 含量均低于叶片, 这与原海燕^[15]对马蔺的相关研究结果不一致。推测这可能与本研究中 Pb 处理时间过长 (4 周) 有关。Pb 胁迫首先伤害路易斯安那鸚尾的根系, 并导致根系的生理活性下降, 然后才对地上部分的生理特性产生影响。随着 Pb 胁迫浓度的提高, 路易斯安那鸚尾叶片的脯氨酸含量均显著高于对照, 这与姜永雷等^[17]的研究结果一致。而在各浓度 Pb 胁迫条件下路易斯安那鸚尾根系脯氨酸含量与对照无显著差异, 说明其根系清除氧自由基以及降低细胞膜脂过氧化能力较弱。

本实验中, 200 和 400 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下路易斯安那鸚尾体内的 O₂⁻ 产生速率与对照无显著差异, 而在 600 和 800 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下却显著高于对照, 表明高浓度 Pb 胁迫可导致路易斯安那鸚尾根和叶的细胞脂质过氧化程度加剧, 这一现象与 Pb 胁迫条件下 MDA 和脯氨酸含量的变化规律一致, 在 Cd 和 Cr 等其他重金属对植物的胁迫过程中也有相似的现象^[18-19]。

低浓度 Pb 胁迫条件下路易斯安那鸚尾幼苗根和叶的 SOD、POD 和 CAT 活性均有所上升, 表明它们在清除活性氧过程中起重要作用, 这种作用在其他植物上也有所体现, 如: Pb 胁迫可以诱导玉米 (*Zea mays* Linn.) 产生活性氧 (ROS) 并提高细胞的脂质过氧化水

平,导致抗氧化酶活性相应增强^[20]。路易斯安那鸢尾根系和叶片 POD 活性随 Pb 胁迫浓度提高而上升,二者呈明显的正相关,这可能与“POD 活性与植物组织中重金属含量水平紧密相关^[21]”有关。然而,高水平(800 mg · L⁻¹)Pb 处理条件下路易斯安那鸢尾根系和叶片的 SOD 和 CAT 活性均有所下降,说明二者清除活性氧的作用大为削弱,也说明 CAT 与 SOD 的作用机制可能存在一定的相关性^[15,22]。

综上所述,在水培条件下,虽然不同浓度 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾幼苗的生长和干物质积累及光合作用均有一定的抑制作用,对幼苗的抗氧化系统也有一定的损伤,但各处理组间生长指标的差异并不显著。在 200 和 400 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下培养 4 周,路易斯安那鸢尾幼苗各生长和生理生化指标大多与对照无显著差异,说明低浓度 Pb 胁迫下路易斯安那鸢尾可通过自身的抗氧化系统缓解 Pb 胁迫对机体的毒害作用,从而保证植株的生长和发育,说明路易斯安那鸢尾具有一定的耐 Pb 特性,并具有一定的修复重金属污染水体的潜能。

参考文献:

- [1] 王鸿燕,黄苏珍,原海燕,等. Pb 和 Cd 单一及复合胁迫条件下溪荪(*Iris sanguinea*)生长及金属离子积累特征分析[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(3): 24-28.
- [2] 韩玉林. Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗生长和生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(4): 24-30.
- [3] 胡永红,肖月娥. 湿生鸢尾——品种赏析、栽培及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 61-65.
- [4] 郭晋燕,张金政,孙国峰,等. 根茎鸢尾园艺学研究进展[J]. 园艺学报, 2006, 33(5): 1149-1156.
- [5] 朱旭东,田松青,蔡曾煜. 水生常绿杂种鸢尾新品种[J]. 中国花卉园艺, 2007(12): 46-47.
- [6] Van ZANDT P A, MOPPER S. Delayed and carryover effects of salinity on flowering in *Iris hexagona* (Iridaceae) [J]. American Journal of Botany, 2002, 89(11): 1847-1851.
- [7] 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.
- [8] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 45-75.
- [9] ELSTNER E F, HEUPEL A. Inhibition of nitrite formation from hydroxylammoniumchloride: a simple assay for superoxide dismutase [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 70(2): 616-620.
- [10] LIU D, ISLAM E, LI T Q, et al. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2): 114-122.
- [11] 王启明. 铅·镉单一及复合胁迫对玉米幼苗生理生化特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(10): 2036-2037, 2048.
- [12] 林伟,张燕,周娜娜,等. 铅污染对黄瓜幼苗脯氨酸及叶绿素含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2006, 12(11): 86-87.
- [13] 彭鸣,王焕校,吴玉树. 镉、铅诱导的玉米(*Zea mays* L.)幼苗细胞超微结构的变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6): 426-431.
- [14] KÜPPER H, KÜPPER F, SPILLER M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(2): 259-266.
- [15] 原海燕. 马蔺 Pb 耐性机理及其对 Pb 污染土壤根际微环境的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学园艺学院, 2013: 36.
- [16] 朱广慧,唐蓉,高莉,等. 镉、铜胁迫对路易斯安那鸢尾生理生化的影响[J]. 北方园艺, 2011(24): 84-86.
- [17] 姜永雷,鲁红鼎,黄晓霞,等. 铅胁迫对滇润楠幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2013(19): 75-79.
- [18] ZHANG F Q, ZHANG H X, WANG G P, et al. Cadmium-induced accumulation of hydrogen peroxide in the leaf apoplast of *Phaseolus aureus* and *Vicia sativa* and the roles of different antioxidant enzymes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1): 76-84.
- [19] CHOUDHURY S, PANDA S K. Toxic effects, oxidative stress and ultrastructural changes in moss *Taxithelium nepalense* (Schwaegr.) Broth. under chromium and lead phytotoxicity [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 167(1/4): 73-90.
- [20] GUPTA D K, NICOLOSO F T, SCHETINGER M R C, et al. Antioxidant defence mechanism in hydroponically grown *Zea mays* seedlings under moderate lead stress [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(1): 479-484.
- [21] Van ASSCHE F, CARDINAELS C, CLIJSTERS H. Induction of enzyme capacity in plants as a result of heavy metal toxicity: dose-response relations in *Phaseolus vulgaris* L., treated with zinc and cadmium [J]. Environmental Pollution, 1988, 52(2): 103-115.
- [22] TANYOLAC D, EKMEKCI Y, UNALAN S. Changes in photochemical and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) leaves exposed to excess copper [J]. Chemosphere, 2007, 67(1): 89-98.

(责任编辑: 佟金凤)