

铅胁迫下路易斯安那鸢尾铅吸收量和 非蛋白巯基的变化

田松青^{1,2}, 朱旭东^{1,2}, 原海燕², 黄苏珍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, 江苏 南京 210014)

摘要:以路易斯安那鸢尾为试材,采用营养液培养方法,对铅(Pb)胁迫下路易斯安那鸢尾品种铅吸收量和非蛋白巯基(NPT)的变化等进行了研究。结果表明:路易斯安那鸢尾品种‘Professor Neil’对铅吸收和富集量相对较大且耐性最强。随着 Pb 浓度的升高,叶片、根状茎和根的 Pb 含量增加,增加量依次为根>根状茎>叶片。根在高浓度 1 200 mg/L Pb 时达到最大,其含量为 108 366 mg/kg DW;根状茎在 800 mg/L Pb 时达到最大,其含量为 7 966 mg/kg DW,呈先缓慢上升再下降的趋势;叶片在高浓度 800 mg/L Pb 时达到最大,其含量为 4 011 mg/kg DW。随着 Pb 浓度的升高,根系耐受指数(IT)逐渐下降,在 Pb 含量大于 600 mg/L 后存在显著性差异。根至茎转移率(R/R)呈先上升再下降的趋势,在 800 mg/L Pb 处理时达到最大值 10.02%。茎至叶转移率(R/L)呈先上升再下降的趋势,在 600 mg/L Pb 处理时达到最大值 57.78%。Pb 胁迫下随着 0~600 mg/L 浓度的升高和 1~7 d 的时间推移,GSH 和 Cys 含量呈增加的趋势并产生显著差异,尤其 GSH 起着重要的 Pb 解毒作用。

关键词:路易斯安那鸢尾;铅(Pb)胁迫;富集;非蛋白巯基;谷胱甘肽;半胱氨酸

中图分类号:S 682.1⁺9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)21-0077-06

一些植物在根或叶片中积累高浓度重金属的能力,为修复被重金属污染的环境提供了重要的依据^[1]。重金属主要吸附在根表面,然后进一步转移到植物的其它部分。理想的修复植物是能在污染环境中生长迅速,生物量大且具有旺盛的根系,可以容忍和积累污染环境中的重金属^[2-3]。目前有文献报道的铅(Pb)超富集植物有印度芥菜(*Brassica jouncea*)、圆叶遏蓝菜(*Thlaspi rotundifolium*)、东南景天(*Sedum alfredii*)、狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)、酸模(*Rumex acetosa*)等^[4-5]。而这些铅超富集植物大多为野生种类,由于生物量小等原因而不能广泛应用于植物修复的实际工作中。

鸢尾属(*Iris* L.)植物如马蔺(*I. lactea* var.

Chinensis)^[6-9]、黄菖蒲(*I. pseudacorus*)^[10]和花菖蒲(*I. ensata*)^[11]等,普遍具有观赏效果好、生态适应强和种植方便等特点^[12],同时具有从重金属污染的水体或土壤中富集重金属 Pb、Cd 和 Cu 的能力,SUN 等^[13]和 YUAN 等^[14-15]对其耐重金属机理进行了初步研究和探讨。路易斯安那鸢尾(*Louisiana iris*)原产于美国墨西哥湾沿岸沼泽的一类湿生无髯鸢尾^[16],来源于六角果鸢尾(*I. hexagona*)、高大鸢尾(*I. giganticaerulea*)、短茎鸢尾(*I. brevicaulis*)、暗黄鸢尾(*I. fulva*)和内耳森鸢尾(*I. nelsonii*)等 5 个野生种,均具六棱形的蒴果^[17]。该种类自然栖息地包括在冬季和春季发洪水的湿地、沼泽地区,而在路易斯安那州南部的六角果鸢尾种群已经在盐胁迫下生存了 2 000~5 000 年,具有耐盐特性。路易斯安那鸢尾在长江流域地区叶片冬天保持翠绿,花期在 5 月中下旬,色彩鲜艳,可以在全光照至半阴条件下生长,作为常绿水生花卉应用于水体绿化和环境污染处理等方面前景十分广阔^[18]。但作为吸收和富集修复重金属铅污染土壤方面的相关研究少见报道^[19-20],其铅吸收、转运和生理响应机制尚未完全明确。

植物能通过结合有机酸、氨基酸、谷胱甘肽、植物络合素(PC)来减少重金属进入原生质体,或进入细胞中后再泵出,维持细胞内离子正常的浓度^[21-22]。非蛋白巯基

第一作者简介:田松青(1974-),女,硕士,副教授,高级工程师,现主要从事观赏植物资源与环境修复等研究工作。E-mail:tiansongqing@126.com.

责任作者:朱旭东(1972-),男,博士,教授,现主要从事花卉育种和产业化等研究工作。E-mail:13862130525@163.com.

基金项目:江苏省教育厅‘青蓝工程’科技创新团队资助项目(2014-24);江苏省教育厅‘青蓝工程’中青年学术带头人资助项目(2012-246);苏州市科技支撑计划资助项目(SNG201209)。

收稿日期:2015-07-24

谷胱甘肽(GSH)和半胱氨酸(Cys)等是 Pb 诱导植物体内产生的一类多肽,对 Pb 离子的螯合能力很强,在 Pb 累积和解毒过程中发挥重要作用^[23-24]。Pb 或 Cd 胁迫下 GSH 在马蔺 Pb 或 Cd 解毒和转运中具有重要的作用^[25-26]。谷胱甘肽(GSH)在叶绿体和其它细胞区室中发现浓度高,在植物抵御氧化应激中起着重要的作用^[27]。SCHICKLER 等^[28]研究表明,谷胱甘肽还原酶(GR)在镍(Ni)超富集植物 *Alyssum argenteum* 抗氧化过程中起重要作用。

现通过营养液培养法,研究不同 Pb 浓度胁迫处理下,不同路易斯安那鸚尾品种成年分株苗的 Pb 吸收积累量、分布和转移率,品种‘Professor Neil’根和叶中 GSH 和 Cys 含量的影响,旨在探讨路易斯安那鸚尾的铅富集能力和与非蛋白巯基相关性,为今后进一步研究与利用该植物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料路易斯安那鸚尾(*Louisiana iris*)于 1993 年引自美国,栽培于苏州农业职业技术学院鸚尾种质圃,种苗均为无性繁殖群体当年从根状茎萌发的幼苗。由于美国引进的路易斯安那鸚尾品种较多,从种质圃中共挑出长势良好和观赏性状优良的 9 个品种作为试验材料,见表 1。

表 1 路易斯安那鸚尾品种

Table 1 *Louisiana iris* variety

品种编号 No. of variety	品种名 Name of variety
3	‘Professor Neil’
5	‘Bellevue Siren’
8	‘Geisha Eyes’
9	‘Mentida’
10	‘Colorific’
13	‘Just Helene’
14	‘Delta Dove’
22	‘Acadian Miss’
25	‘Rose Cartwheel’

1.2 试验方法

1.2.1 路易斯安那鸚尾铅耐性品种筛选 供试材料分株苗分别从路易斯安那鸚尾不同品种母株的根茎上分株获得,选择健壮、长势、株高一致的分株苗置于 20 L 塑料周转箱(40 株/箱)中培养。以 50% Hoagland 营养液预培养,每 7 d 换 1 次营养液。预培养 28 d 生根长达 3 cm 以上后,移栽于 2 L 塑料盆,换成 10% Hoagland 营养液。路易斯安那鸚尾吸收铅品种的筛选试验 Pb 浓度为 800 mg/L。Pb 以 $Pb(NO_3)_2$ 的形式加入,每处理 3 次重复,每 3 d 换 1 次营养液。Pb 处理 28 d 后取样烘干,用 HNO_3-HClO_4 消化法测定植株体内各部分 Pb 含量。

1.2.2 Pb 在路易斯安那鸚尾不同器官的富集与分布 路易斯安那鸚尾品种‘Professor Neil’的分株苗选择和预

培养与铅耐性品种筛选试验方法相同。而 Pb 浓度为 0、200、400、600、800、1 000、1 200 mg/L 7 个处理,Pb 以 $Pb(NO_3)_2$ 的形式加入,每处理重复 3 次。Pb 处理 28 d 后取样烘干,用于测定植株体内各部分 Pb 含量。

1.2.3 Pb 胁迫对植株根系和叶片中巯基化合物含量的影响 路易斯安那鸚尾品种‘Professor Neil’的分株苗选择和预培养与铅耐性品种筛选试验方法相同。处理液为 1/10 Hoagland 营养液加入 Pb,Pb 浓度分别为 0、200、400、600 mg/L,Pb 以 $Pb(NO_3)_2$ 的形式加入,共 4 个处理,每处理重复 3 次,在处理后的第 1、4、7 天分别取鲜样测定根系和叶片中巯基化合物含量。

1.3 项目测定

1.3.1 铅含量测定 将烘干至恒重的路易斯安那鸚尾叶片、根状茎和根分别用玛瑙研钵磨碎后充分混匀,称取一定量后加 $HNO_3:HClO_4$ (V:V=87:13) 混合液 10 mL 在 80~200℃ 条件下消煮提取,消化至近干加体积分数为 5% 的硝酸溶解并定容至 20 mL,用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP,Perkin-Elmer 3300DV)测定 Pb 元素浓度。

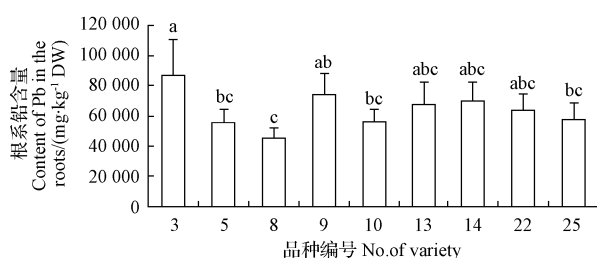
1.3.2 谷胱甘肽和半胱氨酸含量测定 将液氮固定的根和叶片等鲜样组织放于研钵中,加入 2 mL 0.1% TFA(内含 6.3 mmol/L DTPA,pH<1)和少量石英砂,冰浴上充分研磨离心(4℃,12 000 g,10 min),上清液冷藏用于非蛋白巯基化合物的分析测定。为避免巯基化合物接触空气的氧化损失,立即进行柱前衍生化反应。以 0.1% TFA 配制一定浓度的 Cys、GSH 2 种巯基化合物的储备液,用 0.1% TFA 稀释成 1~100 ng/ μ L 的标准系列 4℃ 保存。标准样品和植物组织的衍生化反应相同,即向 250 μ L 标准液或植物组织上清液中加入 450 μ L 200 mmol/L HEPPS(内含 6.3 mmol/L DTPA,pH 8.2)和 10 μ L 25 mmol/L mBBR,充分混合 45℃ 反应,30 min 后加入 300 μ L 1 mmol/L MSA 终止反应,摇匀转移至 Agilent 棕色顶空瓶内,4℃ 保存,直到 HPLC 分析测定。色谱采用二元梯度洗脱系统室温下分离 mBBR 衍生物。荧光检测器条件为 λ_{ex} (激发波长)380 nm, λ_{em} (发射波长)470 nm;流动相 A 为 0.1% 的 TFA,流动相 B 为 100% ACN;流速为 0.5 mL/min;进样量为 1 μ L;梯度洗脱程序:12%~25% B(3 min)、25%~100% B(0.5 min);洗柱:100% B(1.5 min);柱平衡:100%~0% B(0.5 min)和柱后流动时间:1.5 min。由 HP 工作站对峰面积积分,以标样浓度对峰面积作标准曲线,以外标法计算植物样品中巯基化合物的浓度,表示方法为 SH μ g/g FW。

1.3.3 耐性指数和迁移率计算 根据 WILKINS^[29] 公式计算耐性指数(IT): $IT(\%) = \frac{\text{不同 Pb 处理植株的平均根长}}{\text{对照植株的平均根长}} \times 100$ 。根至茎转移率($R/R, \%$)= $\frac{\text{茎 Pb 含量}}{\text{根 Pb 含量}} \times 100$,茎至叶转移

率(R/L,%)=叶 Pb 含量/茎 Pb 含量×100。地上部转移率(TR,%)=地上部 Pb 含量/全株×100。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19 软件对试验数据进行统计和方差分析。所有数据均为重复 3 或 9 次的平均值。数据用邓肯多重比较,a、b、c、d、e 等不同字母的数值表示它们之间有显著差异($P<0.05$)。



2 结果与分析

2.1 路易斯安那鸢尾铅耐性品种筛选

从图 1 可以看出,富集 Pb 最高的一个品种是‘Professor Neil’,吸收 Pb 的主要积累在根系部位,远远大于富集在叶中的含量。根和叶都是品种‘Professor Neil’吸收量最大,品种‘Geisha Eyes’最小,而其它品种均介于 2 个品种之间。

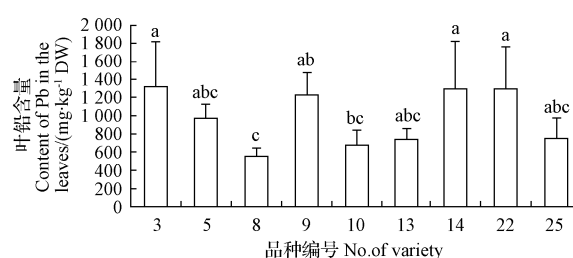


图 1 Pb 处理下不同路易斯安那鸢尾品种根系和叶的富集 Pb 含量

Fig. 1 Pb content of roots and leaves of *Louisiana iris* varieties with Pb treatment

2.2 Pb 在路易斯安那鸢尾不同器官的富集与分布

从图 2 不同浓度的 Pb 胁迫下路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’叶片、根状茎和根系内积累 Pb 含量的变化可以看出,叶片、根状茎和根系 Pb 含量基本上随 Pb 浓度的增加而增加,吸收的 Pb 主要积累在根系部位,顺序为根系>根状茎>叶片。根系在低浓度 200 mg/L Pb 处理时积累量为 39 705.5 mg/kg DW,与对照产生显著性差异,在高浓度 1 200 mg/L Pb 时达到最大值 108 366 mg/kg DW,比 200 mg/L Pb 处理增加 272.9%。根状茎在 200 mg/L 与对照产生显著性差异,低浓度对铅积累较小,在

Pb 时达到最大值 7 966 mg/kg DW,呈先缓慢上升再下降的趋势。叶片与根状茎相似,低浓度也对铅积累非常小,在 200 mg/L Pb 时铅含量仅为 161.0 mg/kg DW,在高浓度 800 mg/L Pb 时达到最大值 4 011 mg/kg DW,与对照产生显著性差异,也呈先缓慢上升再下降的趋势。

根系耐性指数(Index of Tolerance, IT)是反映植物体对重金属耐性能力差异一个非常重要的指标。从表 2 可以看出,不同 Pb 处理浓度下,路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’耐性指数呈递减趋势,说明低浓度 Pb 胁迫下耐性较强。随着 Pb 浓度的升高,根系耐受能力下降,但之间存在显著性差异,说明对高浓度 Pb 敏感。不同 Pb 浓度处理叶片、根状茎和根系对 Pb 元素的吸收及分配积累特性也不相同,品种之间 Pb 含量的比值是反映 Pb 在植物体内迁移和运输能力的一个较好的指标。由表 2 可知,在不同浓度 Pb 胁迫下,对 Pb 的吸收和积累分配均有很大差异。根至茎转移率(R/R)呈先上升后下降趋势,在 800 mg/L Pb 时达到最大值(10.02 ± 2.38)%,表现出最好的转移比率。茎至叶转移率(R/L)也呈先上升后下降趋势,在 600 mg/L Pb 时达到最大值(57.78 ± 3.01)%,转移比率比根至茎转移率要高得多。地上部分转移率(TR,%)也呈先上升后下降趋势,在 800 mg/L Pb 时达到最大值(13.09 ± 1.27)%。

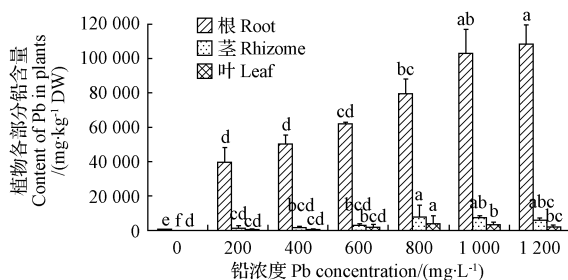


图 2 Pb 胁迫对路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’体内 Pb 含量的影响

Fig. 2 The effect of different treatments on the Pb content of *Louisiana iris* ‘Professor Neil’

表 2 不同 Pb 处理浓度条件下路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’IT 和转移率的变化

Table 2 The values of IT, R/R, R/L and TR for *Louisiana iris* ‘Professor Neil’ with different Pb treatments

IT 和转移率	铅浓度 Pb concentration/(mg · L ⁻¹)					
IT and transport rate/%	200	400	600	800	1 000	1 200
耐性指数 IT	82.79±5.34a	82.00±6.58a	67.37±4.32b	60.05±5.26c	66.65±4.41b	49.04±3.37d
根至茎转移率 R/R	3.32±0.75d	3.75±0.91d	5.21±1.33c	10.02±2.38a	7.26±1.48b	5.49±0.73c
茎至叶转移率 R/L	12.18±1.17e	12.13±2.31e	57.78±3.01a	50.34±6.55b	44.71±5.93c	34.95±4.93d
地上部转移率 TR	3.60±0.59d	4.04±1.38d	7.58±2.42c	13.09±1.27a	9.51±1.37b	6.90±1.48c

2.3 Pb胁迫对植株根系和叶片中巯基化合物含量的影响

2.3.1 不同 Pb 浓度处理下植株体内 GSH 含量变化

从图 3 可以看出,根中的 GSH 含量除了胁迫第 1 天呈上升趋势外,第 4 天和第 7 天均呈现随 Pb 胁迫浓度增加呈先上升后下降的趋势,并均在 400 mg/L Pb 胁迫处理下达到最大值,分别为 SH 192.52 $\mu\text{g/g}$ FW 和 SH 391.05 $\mu\text{g/g}$ FW,分别比对照增加了 1.98 倍和 1.47

倍。叶片的 GSH 含量与根的结果基本相似,不同的是在 Pb 胁迫第 1、4、7 天,随 Pb 胁迫浓度增加呈先上升后下降的趋势,且第 4 天和第 7 天在 400 mg/L Pb 胁迫处理下达到最大值,分别为 SH 641.28 $\mu\text{g/g}$ FW 和 SH 786.47 $\mu\text{g/g}$ FW,分别比对照增加了 1.78 倍和 1.49 倍。表明 400 mg/L Pb 浓度的胁迫可能更有利于诱导植物体内对 GSH 物质的产生。

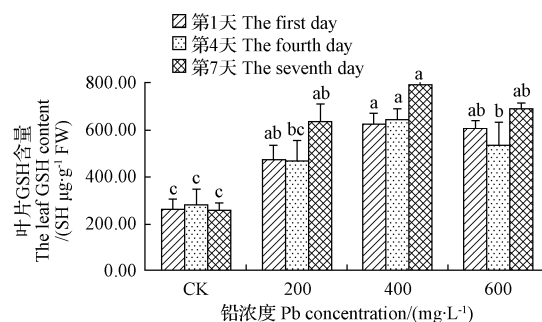
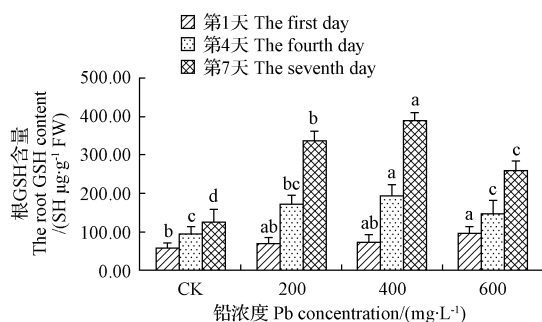


图 3 不同处理下路易斯安那鸢尾根和叶片 GSH 含量的变化

Fig. 3 The change in GSH contents of the root and shoot in *Louisiana iris* under different treatments

2.3.2 不同 Pb 浓度处理下植株体内 Cys 含量变化

由图 4 可知,不同 Pb 处理下路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’根和地上部中的 Cys 含量随胁迫浓度增大和时间延长均呈递增趋势,地上部 Cys 含量普遍高于根部。Pb 随处理浓度的增加在 Pb 胁迫第 1 天,根的 Cys 含量缓慢增加,在 200、400 mg/L Pb 时差异不明显,在 600 mg/L Pb 时达到最大值为 SH 10.91 $\mu\text{g/g}$ FW,与对照 (SH 2.63 $\mu\text{g/g}$ FW)相比增加了 3.15 倍,产生显著差异。在胁迫第 4 天,Cys 含量在 200 mg/L Pb 时便产生显著差异,600 mg/L Pb 时达到最大值为 SH 32.99 $\mu\text{g/g}$ FW,与对照 (SH 5.64 $\mu\text{g/g}$ FW)相比增加了 4.85 倍,差异显著。在 Pb 胁迫第 7 天,Cys 含量在 600 mg/L Pb 时达到最大值为 SH 44.59 $\mu\text{g/g}$ FW,与对照 (SH

600 mg/L Pb 胁迫第 4 天时的 Cys 含量分别较第 1 天增加了 1.14、2.33、2.24、2.02 倍,第 7 天时的 Cys 含量分别较第 1 天增加了 2.34、2.36、3.94、3.09 倍,表明路易斯安那鸢尾根合成 Cys 的能力随着胁迫时间延长而增大。叶片与根有着相似的结果,Pb 随处理浓度的增加在 Pb 胁迫第 1 天,叶片的 Cys 含量缓慢增加然后下降,无明显差异。在胁迫第 4 天,Cys 含量在 200 mg/L Pb 时便产生显著差异,600 mg/L Pb 时达到最大值为 SH 58.28 $\mu\text{g/g}$ FW,与对照 (SH 23.58 $\mu\text{g/g}$ FW)相比增加了 1.47 倍,差异显著。在 Pb 胁迫第 7 天,Cys 含量在 600 mg/L Pb 时达到最大值为 SH 80.40 $\mu\text{g/g}$ FW,与对照 (SH 31.96 $\mu\text{g/g}$ FW)相比增加了 1.52 倍。也表明高浓度 Pb 胁迫更有利于诱导植物体内 Cys 物质的产生。

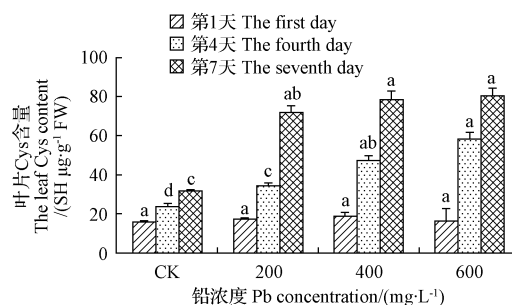
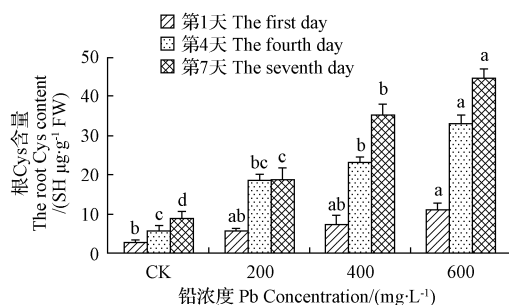


图 4 不同处理下路易斯安那鸢尾根和叶片 Cys 含量的变化

Fig. 4 The changes in Cys contents of the root and leaf in *Louisiana iris* under different treatments

3 讨论

路易斯安那鸢尾品种‘Professor Neil’在 9 个供试品种中,对铅的吸收、富集和耐性能力相对最强。路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’在 1 200 mg/L 的高浓度 Pb 处

理 28 d 植株并没有完全死亡,充分说明其具有较强的耐 Pb 能力。HAN 等^[6]提出鸢尾属不同种间可能有着不同的吸收和耐铅机制,如在植物体内的积累前与重金属结合方式、细胞内区域化和对重金属抵御代谢途径等。

铅富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)野生型在 160 mg/L 铅处理下,地上部和根吸收最大铅含量分别为 514 mg/kg 和 13 922 mg/kg^[30]。在菜豆(*Phaseolus vulgaris*)添加 1 mmol/L Pb 的水培营养中根能积累铅达 75 000 mg/kg DW^[31]。马蔺(*Iris lactea* var. *chinensis*)在 10 mmol/L Pb 胁迫下,地上部和根含铅量分别达到 3 332 mg/kg 和 8 844 mg/kg,表现出较强的耐受和富集能力,是一种潜在的铅超富集植物^[6]。原海燕等^[8]采用 300 mg/L Pb 处理马蔺播种幼苗 2 个月后,测定叶片和根系铅含量为 591 mg/kg 和 14 616 mg/kg。但在马蔺地上部和根系 Pb 含量在单 Pb 胁迫下为 340.6 mg/kg 和 1 700.02 mg/kg,100%尾矿污染土壤处理下为 126.9 mg/kg 和 1 725 mg/kg,表现富集较低^[8]。王鸿燕等^[32]在 500 mg/L Pb 对溪荪(*I. sanguinea*)幼苗单一胁迫条件下,地上部分和地下部分的 Pb 含量分别为 671.384 mg/kg 和 835.773 mg/kg。在水培加 Pb 胁迫条件下,路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’的根、茎和叶最大吸收和富集 Pb 浓度分别达到 108 366、7 966、4 011 mg/kg DW,满足了植物叶片或地上部(干重)中含 Pb 达到 1 000 $\mu\text{g/g}$ 以上的条件。不同种植物对不同重金属、培养条件有着不同的吸收、转运和富集机制。花菖蒲、喜盐鸢尾和马蔺等鸢尾试验材料都是种子萌发的播种苗,生物量小,而该试验的路易斯安那鸢尾为成年分株苗,生物量大,特别是具有粗壮的根状茎,积累了一定的营养,可能对植株生长发育、繁殖、逆境抗性等方面起着十分重要的作用。因此出现路易斯安那鸢尾各部分富集铅含量远远大于喜盐鸢尾、花菖蒲和马蔺等鸢尾种类的结果,可能跟植物本身种类特性、试验材料、试验培养条件和处理方法等有着密切关系。

路易斯安那鸢尾‘Professor Neil’对 Pb 的吸收和积累分配有着很大的差异。吸收的主要积累在根系部位,顺序为根系>根状茎>叶片。根至茎转移率(R/R)在 800 mg/L Pb 时达到最大值也仅为 10.02%。茎至叶转移率(R/L)呈上升趋势,在 600 mg/L Pb 时达到最大值 57.78%,远远大于根至茎转移率的最大值。PANICH-PAT 等^[3]在研究水烛(*Typha angustifolia*)时得到同样的结果,认为 Pb 在根的含量远远高于在根状茎和叶中,Pb 在根状茎的浓度不依赖于铅的处理浓度,可能存在着 Pb 由根转运到根状茎有着限制因素。

巯基(-SH)与重金属离子有着很强的亲和力,含有巯基的如 GSH 和 Cys 等非蛋白巯基物质的代谢和生理作用与植物重金属解毒关系密切而受到广泛关注^[33]。该研究中,单 Pb 胁迫下随着 0~600 mg/L 浓度的升高和 1~7 d 的时间推移,路易斯安那鸢尾地上部和根的 GSH 和 Cys 含量均表现出增加的趋势和产生显著差异,这与孙琴等^[23]、GUPTA 等^[24]对东南景天(*Sedum*

alfredii)的研究结果一致,表明 Pb 胁迫下路易斯安那鸢尾可能通过大量合成非蛋白巯基化合物,以降低 Pb 胁迫对其的毒害程度。原海燕等^[25]也提出了 Pb 胁迫诱导 GSH 大量合成,且通过对不同胁迫时间、不同 Pb 处理下马蔺地上部和根系 Pb 含量与 GSH 和 Cys 含量的相关性分析,发现 Pb 含量与相应部位 GSH 含量存在着显著的正相关,表明 GSH 起着重要的 Pb 解毒作用。但也提出 Pb 胁迫下 Pb 的积累与 Cys 含量的相关性不大,可能 Cys 作为合成 GSH 的底物被大量消耗,导致 Cys 水平出现不高,通过 GSH 间接地降低重金属铅的伤害。所以有关 GSH 和 Cys 物质转化以及相关的非蛋白巯基物质代谢途径和解毒机理之关系需要进一步研究。

参考文献

- [1] YU X Z, GU J D, HUANG S Z. Hexavalent chromium induced stress and metabolic responses in hybrid willows[J]. *Ecotoxicology*, 2007, 16(3): 299-309.
- [2] MARCHIOL L, SACCO P, ASSOLARI S, et al. Reclamation of polluted soil: phytoremediation potential of crop-related *Brassica* species[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 158(1): 345-356.
- [3] PANICH-PAT T, POKETHITHIYOOK P, KRUAETRACHUE M, et al. Removal of lead from contaminated soils by *Typha angustifolia* [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 155(1-4): 159-171.
- [4] 何冰, 杨肖娥, 倪吾钟. 一种新的铅富集植物: 富集生态型东南景天[J]. *植物学报*, 2002, 44(11): 1365-1370.
- [5] CHEHREGANI A, NOORI M, YAZDI H L. Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: screening for new accumulator plants in *Angouran mine* (Iran) and evaluation of removal ability[J]. *Ecotoxicology Environment Safety*, 2009, 72(5): 1349-1353.
- [6] HAN Y L, HUANG S Z, GU J G, et al. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. [J]. *Ecotoxicology*, 2008, 17(8): 853-859.
- [7] YUAN H Y, HUANG S Z, GUO Z, et al. Effects of Zn on the growth, Cd accumulation and physiological resistance of *Iris lactea* var. *chinensis* under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2111-2116.
- [8] 原海燕, 郭智, 黄苏珍. Pb 污染对马蔺生长、体内重金属元素积累以及叶绿体超微结构的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(12): 3350-3357.
- [9] 王鸿燕, 佟海英, 黄苏珍, 等. 柠檬酸和草酸对 Pb 胁迫下马蔺生长和生理的影响[J]. *生态学杂志*, 2010(7): 1340-1346.
- [10] ZHOU Y Q, HUANG S Z, YU S L, et al. The physiological response and sub-cellular localization of lead and cadmium in *Iris pseudacorus* L. [J]. *Ecotoxicology*, 2010, 19(1): 69-76.
- [11] FU J J, HAN Y L, LI Y Y, et al. Effects of single and combined stresses of Pb, Cd on growth and some physiological indexes of *Iris ensata* var. *hortensis* seedling[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2010, 19(3): 23-27.
- [12] 黄苏珍, 韩玉林, 谢明云, 等. 中国鸢尾属观赏植物资源的研究与利用[J]. *中国野生植物资源*, 2003, 22(1): 4-7.
- [13] SUN Y, HUANG S, HAN Y, et al. Cu uptake and distribution in two species of *Iris* L. grown on abandoned tailings[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, 21(2): 357-363.
- [14] YUAN H, HUANG S, HAN Y, et al. The growth, lead accumulation and oxidative stress response of *Iris lactea* var. *chinensis* under lead stress[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(7): 1887-1894.
- [15] YUAN H, HUANG S, HAN Y, et al. The effect of planting *Iris lactea*

- var. *chinensis* on Pb fractionations and activities of enzymes in artificial Pb contaminated soils[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, 21(6):1486-1492.
- [16] 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.
- [17] CAILLET M. The Louisiana iris; the taming of a native American wildflower [M]. Portland: Timber Press, 2000:57.
- [18] 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.
- [19] ZHU X, TIAN S, HUANG S, et al. Effects of Pb on growth and subcellular structure of *Louisiana iris*, and its localization in the plant[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, 23(10):2395-2400.
- [20] 朱旭东,原海燕,黄苏珍,等. 铅(Pb)胁迫对路易斯安那鸢尾生长和生理生化特性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(4):62-67.
- [21] HALL J L, WILLIAMS L E. Transition metal transporters in plants [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(393):2601-2613.
- [22] MALECKA A, JARMUSZKIEWICZ W, TOMASZEWSKA B. Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells[J]. *Acta Biochimica Polonica*, 2001, 48(3):687-698.
- [23] 孙琴,王超. 土壤外源 Cd 和 Pb 复合污染对小麦 (*Triticum aestivum* L.) 根系植物络合素和谷胱甘肽合成的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(5):1833-1838.
- [24] GUPTA D K, HUANG H G, YANG X E, et al. The detoxification of lead in *Sedum alfredii* H. is not related to phytochelatin but the glutathione [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1-3):437-444.
- [25] 原海燕,郭智,佟海英,等. Pb 胁迫下外源 GSH 对马蔺体内 Pb 积累和非蛋白巯基化合物含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):212-216.
- [26] 原海燕,黄钢,佟海英,等. Cd 胁迫下马蔺根和叶中非蛋白巯基含量的变化[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7):1214-1219.
- [27] NOCTOR G, FOYER C H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49:249-279.
- [28] SCHICKLER H, CASPI H. Response of antioxidative enzymes to nickel and cadmium stress in hyperaccumulator plants of the genus *Alyssum* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 105:39-44.
- [29] WILKINS D A. A technique for the measurement of lead tolerance in plants [J]. *Nature*, 1957, 180(1):37-38.
- [30] HE B, YANG X, NI W, et al. *Sedum alfredii*: a new lead-accumulating ecotype [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 44(11):1365-1370.
- [31] PIECHALAK A, TOMASZEWSKA B, BARALKIEWICZ D, et al. Accumulation and detoxification of lead ions in legumes [J]. *Phytochemistry*, 2002, 60(2):153-162.
- [32] 王鸿燕,黄苏珍,原海燕,等. Pb 和 Cd 单一及复合胁迫条件下溪荊 (*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.
- [33] 高可辉,葛滢,张春华. 缺硫对镉胁迫下水稻幼苗非蛋白巯基物质含量和谷胱甘肽硫转移酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7):1796-1802.

Effect of Pb stress on Pb Accumulation and Non-protein Thiol Content in *Louisiana Iris*

TIAN Songqing^{1,2}, ZHU Xudong^{1,2}, YUAN Haiyan², HUANG Suzhen²

(1. Suzhou Polytechnical Institute of Agriculture, Suzhou, Jiangsu 215008; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Science, Nanjing, Jiangsu 210014)

Abstract: Taking *Louisiana iris* as material, the effects of lead (Pb) stress on Pb content and the contents of non-protein thiols (NPT) in roots, rhizomes and leaves of *Louisiana iris* were studied by hydroponic culture. The results showed that *Louisiana iris* variety 'Professor Neil' accumulated and enriched relatively large amount of Pb and was the highest Pb tolerant variety. Pb contents in leaves, rhizomes and roots increased with the Pb level enhanced in the liquid and the content order from highest to the least were root > rhizome > leaf. Pb content in the leaves of 'Professor Neil' under 800 mg/L Pb treatment were the maximum and reached to 4 011 mg/kg DW. Pb transfer rate (R/R) from root to rhizome showed a trend of rise first and then dropped and in 800 mg/L Pb treatment maximum and reached 10.02%, and Pb transfer rate (R/L) from rhizome to leaf showed similar trend with R/R, in 600 mg/L Pb reached the maximum and was 57.78%. As the Pb concentrations (0—600 mg/L) increased and the stress time prolonged, the contents of GSH and Cys were significantly increased, showing these biochemical compounds might play an important role in Pb detoxification.

Keywords: *Louisiana iris*; Pb stress; accumulation; non-protein thiol; GSH; Cys