

魏朝丹,周兰英,李嫦平. 2011. 利用观赏植物白雪姬修复铅污染的潜力研究[J]. 环境科学学报, 31(10): 2290-2297

Wei C D, Zhou L Y, Li C P. 2011. Investigation on the reparative potential of Pb pollution by ornamental plant *Tradescantia sillamontana* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(10): 2290-2297

利用观赏植物白雪姬修复铅污染的潜力研究

魏朝丹,周兰英*,李嫦平

四川农业大学风景园林学院,雅安 625014

收稿日期:2010-12-14

修回日期:2011-01-19

录用日期:2011-01-27

摘要:以添加了不同浓度铅的 1/4 Hoagland 营养液为介质,对观赏植物白雪姬(*Tradescantia sillamontana*)进行人工模拟铅胁迫实验,探讨了白雪姬的铅富集性和铅胁迫下其生长、生理的变化。结果显示,在 0~1500 mg·L⁻¹ 铅浓度范围,白雪姬地上部铅含量持续增长($p < 0.05$)。根部铅含量先在 500 mg·L⁻¹ 处有较高值,在 1000 mg·L⁻¹ 处含量反而有所下降,二者的最大值均出现在 1500 mg·L⁻¹ 铅浓度下,含量超过了 1000 mg·kg⁻¹;铅胁迫实验中,所有白雪姬植株在 500~1500 mg·L⁻¹ 铅浓度范围未出现死亡,表现出极高的耐铅性;其叶绿素含量、细胞膜透性、MDA 含量、Pro 值、POD 活性和 NR 活性变化趋势与已报道的铅富集植物的变化趋势相似。由此得出,观赏植物白雪姬可以用于铅污染的植物修复和配植于有铅污染的区域。

关键词:白雪姬;植物修复;铅胁迫;铅富集;生长生理

文章编号:0253-2468(2011)10-2290-08

中图分类号:X171.5

文献标识码:A

Investigation on the reparative potential of Pb pollution by ornamental plant *Tradescantia sillamontana*

WEI Chaodan, ZHOU Lanying*, LI Changping

College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014

Received 14 December 2010;

received in revised form 19 January 2011;

accepted 27 January 2011

Abstract: 1/4 Hoagland nutrient solution with different Pb concentrations were used as medium to cultivate the *Tradescantia sillamontana* in artificial simulation experiment under Pb stress. The enrichment propensity of Lead in *Tradescantia sillamontana* and its change of growth and physiology characteristics under Pb stress were investigated. The results showed that between 0~1500 mg·L⁻¹ concentrations of Pb, the contents of Pb in above-ground part increased continuously ($p < 0.05$), while the contents of Pb in root appeared a peak at 500 mg·L⁻¹ concentration and decreased a bit around 1000 mg·L⁻¹. The maximum contents of Pb in the both parts of *Tradescantia sillamontana* appeared at 1500 mg·L⁻¹ concentration, with the levels exceeding 1000 mg·kg⁻¹. In the Pb stress experiment, there was no *Tradescantia sillamontana* plants died with lead concentrations between 500~1500 mg·L⁻¹, which demonstrated that the Pb-tolerance of *Tradescantia sillamontana* was very high. Additionally, the change trends of chlorophyll content, membrane permeability, content of malondialdehyde (MDA), praline (Pro) value, activity of peroxidase (POD) and nitrate reductase (NR) were similar to the reported Pb enrichment plants. In conclusion, the *Tradescantia sillamontana* can be applied to the phytoremediation of Pb pollution and be planted in the areas with Pb pollution.

Keywords: *Tradescantia sillamontana*; phytoremediation; Pb stress; Pb enrichment; growth and physiology

1 引言(Introduction)

随着经济的快速增长,燃煤、采矿业和工业三废的排放、加铅汽油和农药的使用,使排放到环境中的铅越来越多。近年来的研究表明,土壤铅污染现象已比较普遍,特别是在污灌区和公路两侧(张

磊等 2004; 龚根辉 2009),致使生态环境遭到严重破坏,园林植物的生境也未能幸免。在日益严峻的现实条件下,人们更加关注环境的生态效应,对于观赏植物的运用,要求不只是能美化景观,更重要的是能改善生态环境。因此,探讨园林植物对铅的耐性和富集性,对于铅污染区的植物配植和新的植

基金项目:国家科技支撑计划课题(No. 2007BAD50B01)

Supported by the National Key Technology R&D Program (No. 2007BAD50B01)

作者简介:魏朝丹(1984—)女,E-mail: weichaodan1314@163.com; * 通讯作者(责任作者)E-mail: kelin1234@sina.com

Biography: WEI Chaodan (1984—) female, E-mail: weichaodan1314@163.com; * Corresponding author E-mail: kelin1234@sina.com

物修复植物的开发等都具有积极地现实指导意义。

植物修复技术作为一种新兴的、高效的生物修复途径现已被科学界及政府部门认可和选用(伍钧等 2005)。国内外关于铅耐性植物或铅富集植物的研究虽较多,但其供试植物多为野生杂草,所报道的铅富集植物均是生长于富含 Pb 和 Zn 的矿化土壤、采矿区及冶炼厂废弃物等处的本土植物,不具有观赏性(Reeves *et al.*, 1983; 吴双桃等 2004)。近年来,由于人居环境铅污染问题的日益凸显,我国已开始探讨利用园林植物修复重金属污染土壤的可行性(刘家女等 2007)。虽也有研究证实了花卉植物紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)、凤仙(*Impatiens Balsamina*)、金盏菊(*Calendula officinalis*)、波斯菊(*Cosmos bipinnatus*)等对铅有较强耐性和积累性(王晓飞 2005; 崔爽等 2009),但所报道的观赏植物种类有限,要满足实际运用的需求还远远不够,且多数研究内容较单一,只着重于探讨研究对象对铅累积的量,少有涉及不同浓度的铅对观赏植物生长生理的影响。因此,本研究选择具有较强抗逆性的鸭跖草科观赏植物白雪姬(*Tradescantia sillamontana*)为铅胁迫试验材料,通过水培的方法探讨白雪姬对铅的富集性和其生长生理特征在不同浓度铅胁迫下的变化,并由此判断其可否用于铅污染的植物修复,为铅污染的治理提供技术参考。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 供试材料

本研究供试材料为鸭跖草科观赏植物白雪姬,预先从苗圃购得,种植于四川农业大学林学楼植物园。试验时取长势均匀一致,长度 6~8 cm,带叶 4~6 片的新发嫩枝,插入清水中培养水生根,培根期间每 5 d 换水 1 次。

2.2 试验方法

待水培嫩枝长出稳定根系,选择根长一致,株高 10~12 cm,带叶 7~8 片的健壮植株转入 1/4 Hoagland 营养液(pH≈6.0,用 1 mol·L⁻¹的 HNO₃ 或 NaOH 调节)进行过渡培养。15 d 后,材料 5 株为 1 组,移入相应浓度的含铅 1/4 Hoagland 营养液中,进行人工模拟铅胁迫实验,每个浓度梯度设置 3 个重复,实验期间每 10 d 换营养液 1 次,试验期为 60 d。铅浓度(以 Pb²⁺ 计)梯度的设定参照刘秀梅等(2002)的研究,经预实验筛选后确定,分别为:0、500、1000、1500 和 2000 mg·L⁻¹。

2.3 指标测定

铅含量测定:参照罗于洋等(2010)的方法,略有改动。样品用量为 0.20000 g,样品消化所用混酸体积比为 HNO₃:HClO₄=4:1。测铅仪器选用 M 系列火焰原子吸收光谱仪(Thermo 公司)。测铅后,再分别计算白雪姬的地上部铅富集系数,根部铅富集系数及转运系数。公式分别为:

$$A_{x1} = S/L \quad (1)$$

$$A_{x2} = R/L \quad (2)$$

$$T_c = S/R \quad (3)$$

式中 A_{x1} 为地上部富集系数, A_{x2} 为根部富集系数, T_c 为转运系数; S 为地上部铅累积量; R 为根部铅累积量; L 为营养液中铅含量。

生长指标测定:所测生长指标包括叶片数量、株高变化量、地上部鲜重及根部鲜重。株高变化量由铅胁迫前和胁迫 60 d 后所测各处理植株的株高之差所得,其余各指标在铅胁迫 60 d 后分别测定。

生理指标测定:采用混合采样法,叶片剪碎混合均匀后称取所需克数。参照高俊凤(2006)编写的方法,叶绿素测定采用丙酮-乙醇-水混合液直接浸提法、细胞膜透性测定采用相对电导率法(DDS-42A 型电导率仪测定)、丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法、硝酸还原酶活性测定采用磺胺比色-活体内源基质法、过氧化物酶活性测定采用愈创木酚法、游离脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法。

2.4 数据分析

实验数据采用 Excel 进行整理,并利用 SPSS (17.0 版) 分析软件进行单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 检验。

3 结果(Results)

3.1 不同浓度铅胁迫对白雪姬铅累积量的影响

对不同浓度铅胁迫下白雪姬地上部和根部的铅累积量进行测定,结果显示(如图 1 所示),白雪姬地上部和根部对铅均有一定程度的积累,但二者累积趋势略有不同。铅浓度在 0~1500 mg·L⁻¹ 范围,地上部铅含量持续呈显著趋势增加($p < 0.05$);在 1500 mg·L⁻¹ 处有最大值,此时铅含量值为 1394 mg·kg⁻¹,铅富集系数约为 3。根部铅含量先在 500 mg·L⁻¹ 处有较高值,在 1000 mg·L⁻¹ 处含量反而有所下降,二者差异显著($p < 0.05$);而在 1500 mg·L⁻¹ 处根部铅含量也达到最大值,为 1020 mg·kg⁻¹,此时,铅富集系数大于 2,白雪姬转运系数

大于 1. 铅浓度达到 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,白雪姬地上部、根部铅含量均有所下降,但地上部铅含量与最大值差异不显著($p > 0.05$) 根部铅含量值仅次于最大值.

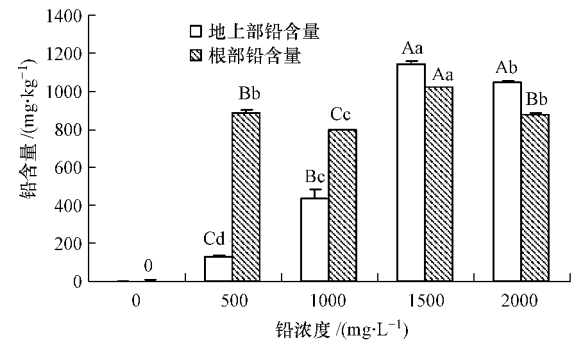


图1 不同浓度铅胁迫对白雪姬铅累积量的影响(图中相同字母表示处理间差异不显著;不同大小写字母表示处理间差异呈显著水平($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$),下同)

Fig. 1 Effect on Pb accumulated dose of *Tradescantia sillamontana* under Pb stress with different strengths(The same letter in the figure indicated that there was no significant difference between the treatments. Different small letters or capital letters in the same column meant significant difference at 0.05 or 0.01 level among treatments. The same as below)

表1 不同浓度铅胁迫对白雪姬各生长指标的影响

Table 1 Effect on growth indices of *Tradescantia sillamontana* under Pb stress with different strengths

铅浓度 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶片数量 /片	株高变化量 /cm	地上部鲜重 /g	根鲜重 /g
0	16.75 ± 0.96^a	7.34 ± 0.28^a	16.02 ± 0.74^a	11.96 ± 0.02^a
500	9.50 ± 0.58^b	2.82 ± 0.71^b	11.77 ± 0.32^b	9.91 ± 0.09^b
1000	7.25 ± 0.50^c	1.70 ± 0.67^c	8.14 ± 0.12^c	8.14 ± 0.04^c
1500	6.75 ± 0.96^c	1.05 ± 0.01^c	5.57 ± 0.15^d	5.18 ± 0.01^d
2000	5.00 ± 0.82^d	0.00 ± 0.00^d	5.32 ± 0.10^d	2.06 ± 0.02^e

注:表中数值为平均值±标准差($n = 3$) ,同列不同字母表示差异呈显著水平($p < 0.05$) ,下同.

Note: Numbers are mean values plus-and-minus standard error ($n = 3$) . Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same as below

3.3 不同浓度铅胁迫对白雪姬生理指标的影响

3.3.1 不同浓度铅胁迫对白雪姬叶绿素含量的影响 白雪姬植株在不同浓度铅处理下从表观上看,叶片普遍存在增绿、变暗和伤坏等现象.由图2可知,其体内的叶绿素含量发生了显著变化,叶绿素总体变化趋势为先上升后下降,且chl a的变化幅度大于chl b.在 $500 \sim 1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度范围,各处理间叶绿素含量变化最为明显,均达到显著水平($p < 0.05$).在 $1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处,Chl a + Chl b和Chl a达到最大值,分别为对照含量的245.92%和262.75%;chl b的最大值则出现在 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处,为对照的242.08%;铅浓度超过 $1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时叶绿素含量显著下降($p < 0.05$) ,但Chl a + Chl b和Chl a值仅次于最大值,分别为对照的204.12%和194.41%.

3.2 不同浓度铅胁迫对白雪姬各生长指标的影响

不同铅浓度下白雪姬各生长指标的测定结果如表1所示.所测数据显示:在 $500 \sim 2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度范围,白雪姬生长均受到抑制,各指标较对照组均显著下降.目测下,铅胁迫期间新生叶细小且生长缓慢,枯叶数量则随着铅浓度的升高而有所增加.茎的生长趋势亦不明显.因而,测得白雪姬叶片数量呈现逐渐减少趋势,但 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度处的数量变化不显著($p > 0.05$);株高变化量值较小,铅浓度达到 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时相邻处理间其值的变化已不显著($p > 0.05$),在 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处变化值则为零;各处理下地上部鲜重和根部鲜重值差异较大,尤其是根部鲜重随着铅浓度的增加其值均显著下降($p < 0.05$),地上部鲜重值在铅浓度为 $500 \sim 1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围亦呈显著趋势下降($p < 0.05$).

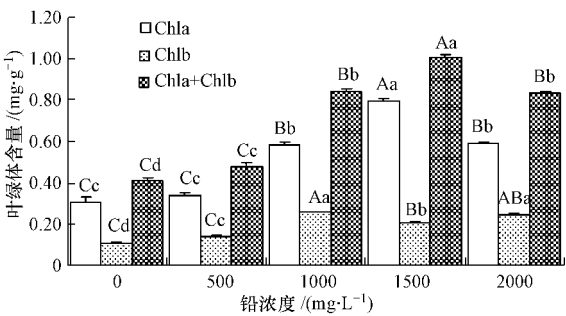


图2 不同浓度铅胁迫对白雪姬叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect on chlorophyll content in leaves of *Tradescantia sillamontana* under Pb with different strengths

3.3.2 不同浓度铅胁迫对白雪姬细胞膜透性、丙二醛(MDA)含量的影响 图3所示为不同铅浓度下白雪姬的相对电导率值.从图中可以看出,不同浓

度铅胁迫下,白雪姬细胞膜透性呈逐渐上升趋势.但其相对电导率值上升极为缓慢,500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处的值与对照相比只分别上升 4.48% 和 4.98%,差异不显著 ($p > 0.05$).铅浓度达到 1500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 才出现显著水平 ($p < 0.05$),此时电导率值上升了 16.59%.铅浓度为 2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,相对电导率值与对照比有较大幅度的上升,呈显著水平 ($p < 0.01$),此时的电导率值增幅为 21.53%.

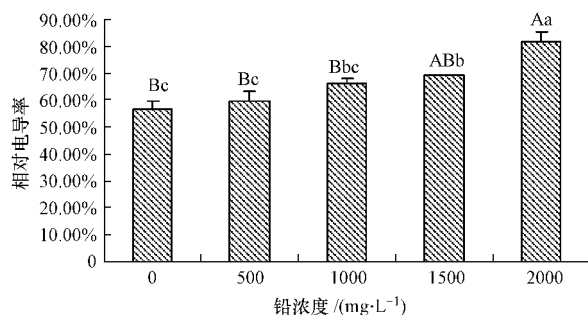


图3 不同浓度铅胁迫对白雪姬细胞膜透性的影响

Fig. 3 Effect on cell membrane of *Tradescantia sillamontana* under Pb with different strengths

白雪姬相对电导率值逐渐上升的同时,其体内的 MDA 含量也发生了相应的变化(图4),其总的变化趋势与电导率变化趋势相同.500 ~ 2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度范围,各处理下的 MDA 值与对照相比分别上升了 4.50%、29.15%、45.73% 和 69.76%.其中 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处的 MDA 值与对照比差异不显著 ($p > 0.05$),2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度下的值与对照比差异达到显著水平 ($p < 0.01$).

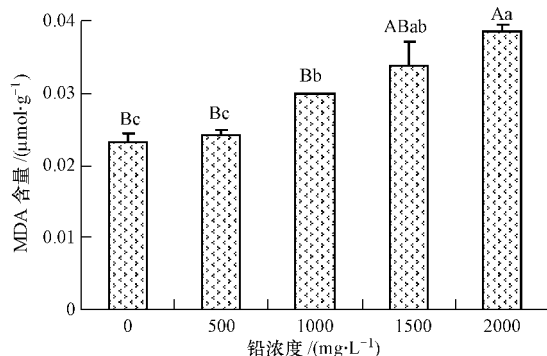


图4 不同浓度铅胁迫对白雪姬 MDA 含量(FW)的影响

Fig. 4 Effect on MDA content of *Tradescantia sillamontana* under Pb with different strengths

由上可知,本研究中不同铅浓度下的白雪姬细胞膜透性和 MDA 含量呈现相同线性变化趋势,表明二者之间及与铅浓度之间有密切关系.相关分析

表明,二者之间呈显著正相关 ($r = 0.951^*$),二者与铅浓度间均呈显著正相关 ($r = 0.959^{**}$, $r = 0.984^{**}$).

3.3.3 不同浓度铅胁迫对白雪姬游离脯氨酸(Pro)含量的影响 本铅胁迫实验中,白雪姬体内的 Pro 含量变化明显.由图5可知,白雪姬 Pro 值在铅浓度为 0 ~ 2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内呈先上升后下降趋势.在 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度下,Pro 值与对照比已显著上升 ($p < 0.05$),1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值,但与 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处的值差异不显著 ($p > 0.05$).铅浓度大于 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,Pro 值则开始逐渐下降,2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅浓度下的值已回到对照水平 ($p > 0.05$).

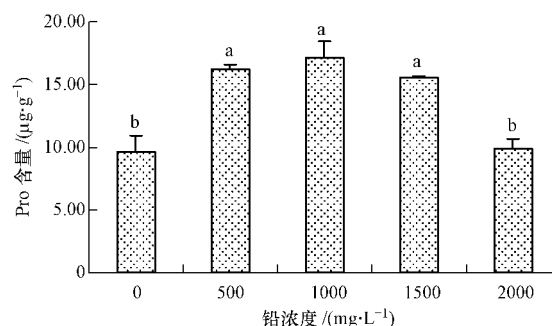


图5 不同浓度铅胁迫对白雪姬 Pro 含量(FW)的影响

Fig. 5 Effect on Pro content of *Tradescantia sillamontana* under Pb with different strengths

3.3.4 不同浓度铅胁迫对白雪姬过氧化物酶(POD)和硝酸还原酶(NR)活性的影响 不同铅浓度下白雪姬 POD 和 NR 活性值如表2所示.各铅浓度下的白雪姬 POD 活性均大于对照,整体变化呈先上升后下降趋势.当铅浓度达到 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 POD 活性急剧上升达到最大值,随着铅浓度的继续增加,各处理 POD 活性虽有所下降但仍维持较高水平,与对照相比均呈显著水平 ($p < 0.05$).

表2 不同浓度铅胁迫对白雪姬 POD 和 NR 活性的影响

Table 2 Effect on POD and NR activities in leaves of *Tradescantia sillamontana* under Pb duress with different strengths

铅浓度 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	POD 活性 /($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	NR 活性 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
0	1.484 ± 0.479^c	12.023 ± 2.013^{Aa}
500	2.297 ± 0.009^c	8.292 ± 0.007^{Bb}
1000	15.396 ± 1.470^a	5.607 ± 0.119^{Bc}
1500	10.850 ± 1.131^b	5.173 ± 0.268^{Bc}
2000	11.015 ± 0.035^b	1.111 ± 0.102^{Cd}

白雪姬硝酸还原酶(NR)活性在各铅处理浓度下逐渐下降,大致可分为3个阶段:在0~1000 mg·L⁻¹铅浓度范围内,NR活性均显著下降($p < 0.05$);1500 mg·L⁻¹处的NR活性值虽有所下降,但仍与1000 mg·L⁻¹处的值处于同一水平,差异不显著($p > 0.05$);2000 mg·L⁻¹铅浓度下的NR活性值与1500 mg·L⁻¹处的值比,变化趋势达到显著水平($p < 0.01$).

4 讨论(Discussion)

本研究结果显示,在500~1000 mg·L⁻¹铅浓度下,白雪姬对铅的累积表现为根部含量高于地上部含量;随着铅浓度的升高,根部铅含量显著下降($p < 0.05$),而地上部铅含量则持续显著升高($p < 0.01$),反映出白雪姬对铅有很强的迁移力.这是由于植物出于自我保护,能把铅滞留于根部,限制其向地上部运输,从而减少铅对植物叶片光合作用及其他重要生理生化过程的干扰和破坏(杜连彩,2007),是植物的抗铅机制之一(江行玉等,2001).但这种作用有一定限度,植物的另一抗铅机制是将根部累积的过量铅随蒸腾流由导管被动运输到地上部,从而减轻过量铅对根的毒害(柳丹等,2007).根据铅超富集植物的判定标准($Pb^{2+} \geq 1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $S/R > 1$)(Baker *et al.*,1983),白雪姬对铅的最大累积值和铅转运系数均达到了铅超富集植物的临界值,且与刘秀梅等(2002)筛选出的铅富集植物羽叶鬼针草和酸模有相似的铅累积特性,这表明白雪姬具备铅超富集植物的一些必要特质.

关于重金属铅对植物生长的影响,不少研究表明,低浓度的铅对植物生长有促进作用,但一般超过100 mg·L⁻¹则会抑制植物的生长(Patra *et al.*,1994; Begonia *et al.*,1998; 孙健等,2007).由于铅不是植物生长发育的必需元素,当其被动进入植物的根系,可通过减小细胞有丝分裂速度,阻碍植物体内水分运输,从而影响到植物的生长发育(何翠屏,2004; 闵焕等,2010).本试验中,所有铅处理下白雪姬植株出现了根部颜色变暗、叶片变薄下垂,新叶、幼茎生长迟缓等现象,但500~1500 mg·L⁻¹铅浓度下所有白雪姬植株均未出现死亡,2000 mg·L⁻¹铅浓度下植株死亡率小于1/2.由此看出,白雪姬在高浓度铅的胁迫下虽其生长受到抑制,但却具有极强的耐铅性.同时也显示出白雪姬具有极强的应对外界环境剧烈变化的能力,能够通过自身的

一系列应激反应来维持生存.另一方面,过量的铅进入植物体内,可能取代叶绿素分子中的 Mg^{2+} ,抑制叶绿素合成酶的活性,从而使叶绿素的合成和生理功能受到影响,致使光合系统的完整性遭到破坏,电子传递不能正常进行,最终影响到植物的光合作用使其生长发育受到阻碍(Kupper *et al.*,1996; 杨刚等,2005; 刘小阳等,2010).不少研究表明,随着铅浓度的增加,植物体内叶绿素含量呈先上升后下降趋势,且铅对chl a的影响程度大于chl b(Kastori *et al.*,1998; 谢传俊等,2008; 闵焕等,2010).本研究也得出相同结果.铅浓度在0~1500 mg·L⁻¹范围,Chl a + Chl b含量持续升高,可能是白雪姬自身防御机制作用的结果.一定浓度的铅能刺激白雪姬体内发生防御性反应,生成相应的解毒物质(如POD等);铅也可诱导细胞产生金属结合蛋白(如金属硫蛋白),螯合侵入的铅,使叶绿素的伤害减小或其合成速度加快(Stobart *et al.*,1985);而Chl a + Chl b含量在2000 mg·L⁻¹铅浓度下的降低则可能是细胞内过量的铅离子与几种叶绿素合成酶(原叶绿素酯还原酶、 δ -氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)肽链中富含SH的部分结合,抑制酶的活性从而使叶绿素的合成受到阻碍(Shi *et al.*,2000).此外,白雪姬的铅累积最大值和Chl a + Chl b最大值出现在同一铅浓度下,这与周朝彬等(2005)的实验结果相反,出现此种情况的原因,可能是白雪姬与其研究材料对铅的耐受力 and 响应铅胁迫的内部机制存在差异,具体原因还有待进一步试验论证.

重金属铅对植物生理的影响,主要是由铅刺激植物体内产生过量的活性氧自由基引起的.随着铅浓度的增大和胁迫时间的延长,植物产生的过量自由基首先去攻击细胞膜上的不饱和脂肪酸,使细胞膜结构变得松散,选择透性受到严重伤害,导致细胞内溶物的大量外渗(代全林,2006).因此,一般认为细胞膜透性随着铅浓度的增加而增大.植物细胞膜系统是细胞与环境物质交换的界面,其稳定性是细胞进行正常生理功能的基础(李合生,2001).李荣春(2000)认为,铅处理使植物细胞膜透性增大,可能是铅与细胞上的磷脂作用形成的正磷酸盐和焦磷酸盐改变了膜的结构;或是细胞壁的果胶酸对铅的吸附改变了细胞壁的弹性和可塑性,从而使壁的生理功能遭到损害.在本试验结果中,白雪姬叶片的相对电导率值(图3)虽有所增加,但在0~

1000 mg·L⁻¹ 铅浓度范围内其值与对照比差异不显著 ($p > 0.05$) ,而渗透调节物质脯氨酸(图5)的含量与对照比则显著增长($p < 0.05$) ,并在 1000 mg·L⁻¹ 铅浓度下达到最大值,是对照的近 2 倍. 这表明根部铅的转移确实起到了减轻毒害的作用. 同时也表明,即使在 1000 mg·L⁻¹ 的高铅浓度下,白雪姬仍可通过对体内脯氨酸含量的调节来维持自身细胞膜的稳定性,从而增强对铅胁迫的适应. 且如图 4 所示,白雪姬 MDA 含量的变化也证实了其细胞膜的受害程度并不严重. 脯氨酸含量的升高之所以能维持膜的稳定性,是因为其高度的溶解性可降低细胞质中铅的浓度,起着调节细胞渗透平衡,增强细胞结构稳定性和阻止氧自由基产生的重要作用 (Metha *et al.* ,1999) . 张义贤等 (2008) 认为植物叶片中脯氨酸的积累是植物对重金属胁迫的一种生理适应. 而 MDA 作为膜脂过氧化的产物,其量的积累一定程度上也反映了植物体内自由基活动的动态和细胞的受损程度,是衡量植物细胞膜质过氧化损伤的重要指标. 孙小霞 (2006) 、闵焕 (2010) 等的研究均表明 MDA 值会随着铅浓度的增加而增大,且与细胞膜透性呈显著正相关,本试验也有相同结果. 但 MDA 含量的变化趋势虽与细胞膜透性的变化趋势相同,MDA 值的增长幅度却并不剧烈,基本呈阶段性增长,是白雪姬铅耐受力较强的有力佐证.

正常情况下,植物体内的活性氧代谢处于平衡状态. 而重金属可作为脂质过氧化的诱导剂,使细胞内自由基的产生和清除之间的平衡遭到破坏,导致大量的·O₂、·OH、·NO、·HOO、·RO、·ROO、O₂·、H₂O₂、ROOH 等活性氧自由基产生,从而使蛋白质和生物大分子变性及细胞膜脂过氧化加剧 (Huang *et al.* ,1997; Korlcheva *et al.* ,1997) . 目前,普遍认为活性氧水平升高导致的膜脂过氧化加剧是膜损伤的重要原因. 但同时,植物自身具有抗氧化的保护酶系统(如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)) ,能够维持自由基在植物体内产生和清除的动态平衡. 通常认为,POD、SOD、CAT 活性的维持和提高是植物耐受重金属胁迫的物质基础之一 (Pawlik-Skowronska, 2002; 何冰等, 2009) . 本试验对 POD 活性的测定结果显示(表 2) ,在所有铅浓度下 POD 活性均显著高于对照 ($p < 0.05$) ,且始终维持在较高水平. 有研究认为,一定浓度下的铅胁迫能诱导植物组织中 POD 活性升高,这是植物对所有污染胁迫的共同响应,其作为活性

较高的适应性酶,能够反映植物生长发育特点、体内代谢状况以及对外界环境的适应性 (Mishra *et al.* ,2006) . 植物体内的 POD 可通过催化 H₂O₂ 氧化酚类的反应,加快植物体内 H₂O₂ 的清除,且 POD 具有催化木质化的作用 (杨居荣等,1996; Renata *et al.* ,1999; Reddy *et al.* ,2005) . 但同时也表明植物已经受到了重金属的伤害 (何冰,2003) . 本实验对硝酸还原酶活性也进行了测定,结果显示硝酸还原酶活性随着铅浓度的增加而递减且趋势显著,这与王林 (2005) 等的研究结果一致,可能是硝酸还原酶对环境变化十分敏感的表现 (张涛等,2004) . 何冰 (2009) 等认为,硝酸还原酶作为植物体内 N 素代谢的关键性酶,可使 NO₃⁻ 还原成 NO₂⁻ ,这种还原作用需要有电子供体和能量,其还原过程与植物的其他生理过程如光合作用、呼吸作用等密切相关. 因此,重金属铅对植物的毒害可间接产生对硝酸还原酶活性的影响. 但大部分有关铅富集植物的报道,对其研究不多.

5 结论 (Conclusions)

1) 在较低浓度铅胁迫下,观赏植物白雪姬根部可以累积大量铅,且随着铅浓度的增长,根部的铅可向地上部迁移,而白雪姬地上部的铅累积量则可随着铅浓度的升高而持续增长.

2) 一定浓度铅胁迫下,白雪姬地上部和根部的铅累积最大值可超过 1000 mg·kg⁻¹ ,且二者的铅富集系数和白雪姬铅转运系数均可达到铅超富集植物的筛选要求.

3) 白雪姬植株可通过其自身的一系列生理生化调节来响应较高浓度的铅胁迫,具有极强的耐铅性.

由上述结论可以看出,白雪姬具备在铅污染区域长期生存的生长、生理基础,有极强的耐铅性,也具有一定的铅累积性. 因此,可将白雪姬用于铅污染的植物修复和将其配植于有铅污染的区域如公路两侧,工厂绿化带等.

责任作者简介:周兰英 (1960—) ,女,博士,教授,研究生导师,主要从事林木遗传育种的相关研究. E-mail: kelin1234@sina.com.

参考文献 (References) :

Baker A J M , brooks R R , Pease A J , *et al.* 1983. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus

- Science L. from Zaire[J]. Plant and Soil, 73: 377-385
- Begonia G B, Davis C D, Begonia M F, *et al.* 1998. Growth responses of Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern) and its phytoextraction of lead from a contaminated soil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 61(1): 38-43
- 崔爽, 周启星, 李萍, 等. 2009. 几种观赏花卉对土壤铅的吸收特性和抗性能力研究[J]. 江西科学, 2(1): 157-160
- Cui S, Zhou Q X, Li P, *et al.* 2009. Pb-endurance and accumulative characteristics of several varieties of ornamental flowers [J]. Jiangxi Science, 2(1): 157-160 (in Chinese)
- 代全林. 2006. 重金属对植物毒害机理的研究进展 [J]. 亚热带农业研究, 2(2): 49-53
- Dai Q L. 2006. A review of toxicant mechanisms of heavy metals against plants [J]. Subtropical Agriculture Research, 2(2): 49-53 (in Chinese)
- 杜连彩. 2007. 植物耐铅生态型及对铅胁迫的耐性机理 [J]. 生物学教学, 32(2): 2-3
- Du L C. 2007. Ecological adaptation and resistant mechanism of plant to lead pollution [J]. Biology Teaching, 32(2): 2-3 (in Chinese)
- 龚根辉. 2009. 城市土壤重金属污染研究现状与展望 [J]. 安徽农学通报, 15(15): 148-149
- Gong G H. 2009. Situation and prospect research of heavy-metal contamination in urban soils [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 15(15): 148-149 (in Chinese)
- 高俊凤. 2006. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社. 61-228
- Gao J F. 2006. Guide for Plant Physiology Experiments [M]. Beijing: Higher Education Press. 61-228 (in Chinese)
- 何冰, 何计兴, 何新华, 等. 2009. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 28(6): 1263-1268
- He B, He J X, He X H, *et al.* 2009. Effects of lead on physiological characteristics of bayberry (*Myrica rubra*) seedlings [J]. Journal of Agro-Environment Science, 28(6): 1263-1268 (in Chinese)
- 何冰, 叶海波, 杨肖娥. 2003. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较 [J]. 农业环境科学学报, 22(3): 274-278
- He B, Ye H B, Yang X E. 2003. Effects of Pb on chlorophyll contents and antioxidant enzyme activity in leaf for Pb-accumulating and non-accumulating ecotypes of *Sedum. alfredii* (Hance) [J]. Journal of Agro-environment Science, 22(3): 274-278 (in Chinese)
- 何翠屏. 2004. 环境中重金属污染及其对植物生长发育的影响 [J]. 青海草业, 13(2): 26-29
- He C P. 2004. Influenced on plant growth and development by heavy metals in environment [J]. Qinghai Prataculture, 13(2): 26-29 (in Chinese)
- Huang Y S, Luo O H, Kwan K M. 1997. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by cadmium to plant [J]. Acta Botanica Sinica, 39: 522-526
- 江行玉, 赵可夫. 2001. 植物重金属伤害及其抗性机理 [J]. 应用与环境生物学报, 7(1): 92-99
- Jiang X Y, Zhao K F. 2001. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 7(1): 92-99 (in Chinese)
- Kastori R, Plesnicar M, Sakac Z, *et al.* 1998. Effect of excess lead on sunflower growth and photosynthesis [J]. Journal of Plant Nutrition, 21(1): 75-85
- Korlecheva J, Roy S, Vraljic J A, *et al.* 1997. Antioxidant responses to simulated acid rain and heavy metal deposition in birch seedlings [J]. Environment Pollution, 95: 249-258
- Kupper H, Kupper F, Spiller M. 1996. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants [J]. Journal of Experimental Botany, 47: 259-266
- 李合生. 2001. 现代植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社. 430-436
- Li H S. 2001. Modern Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press. 430-436 (in Chinese)
- 李荣春. 2000. Pb-Cd 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响 [J]. 植物生态学报, 24(2): 238-242
- Li R C. 2000. Effects of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 24(2): 238-242 (in Chinese)
- 柳丹, 潘凡, 杨肖娥. 2007. 铅富集植物对铅的吸收及其耐性生理机制进展研究 [J]. 池州学院学报, 21(5): 88-91
- Liu D, Pan F, Yang X E. 2007. Progress research on the lead absorption and the patient physiological mechanism of the lead concentrates plants [J]. Journal of Chizhou College, 21(5): 88-91 (in Chinese)
- 刘家女, 周启星, 孙挺, 等. 2007. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究 [J]. 应用生态学报, 18(7): 1617-1623
- Liu J N, Zhao Q X, Sun T, *et al.* 2007. Feasibility of applying ornamental plants in contaminated soil remediation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(7): 1617-1623 (in Chinese)
- 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 2002. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究 [J]. 植物生态学报, 26(5): 533-537
- Liu X M, Nie J H, Wang Q R. 2002. Research on lead uptake and tolerance in six plants [J]. Acta Phytocologica Sinica, 26(5): 533-537 (in Chinese)
- 刘小阳, 徐礼生. 2010. 铅递进胁迫对大蒜叶片生理特性的影响 [J]. 河南农业科学, 3: 75-77 82
- Liu X Y, Xu L S. 2010. Effects of progressive lead stress on physiological characteristics of garlic (*Allium sativum* L.) [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 3: 75-77 82 (in Chinese)
- 罗于洋, 赵磊, 王树森. 2010. 铅超富集植物密毛白莲蒿对铅的富集特性研究 [J]. 西北林学院学报, 25(5): 37-40
- Luo Y Y, Zhao L, Wang S S. 2010. Absorption characteristics of *Artemisia sacrorum* var. *messerschmidtiana* to lead [J]. Journal of Northwest Forestry University, 25(5): 37-40 (in Chinese)
- Metha S K, Gaur J P. 1999. Heavy metal induced proline accumulation and its role in a meliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris* [J]. New Phytologist, 143: 253-259
- 闵焕, 祖艳群, 李元. 2010. Pb 胁迫对圆叶无心菜 (*Arenaria rotundifolia* Bieberstein) 生长和生理特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 29(增刊): 15-19
- Min H, Zu Y Q, Li Y. 2010. Effects of Pb on the growth and physiological characteristics of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein [J]. Journal of

- Agro-Environment Science, 29(supplement) : 15-19 (in Chinese)
- Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, *et al.* 2006. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation [J]. Chemosphere, 65: 1027-1039
- Patra J, Lenka M, Panda B B. 1994. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barlata* Sw. to mercury, cadmium and zinc [J]. New Phytologist, 128: 165-171
- Pawlik-Skowronska B. 2002. Correlations between toxic Pb effects and production of Pb-induced thiol peptides in the microalga *Stichococcus bacillaris* [J]. Environent Pollution, 119: 119-127
- Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, *et al.* 2005. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. Chemosphere, 60: 97-104
- Reeves R D, Brooks R R. 1983. Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from a mine area in Central Europe [J]. Environmental Pollution, 31: 277-287
- Renata R, Stefan W, Edward G. 1999. Free radical formation and activity of antioxidant enzymes in lip in roots exposed to lead [J]. Plant Physiology Biochemistry, 37: 187-194
- Shi G X, Du K H, Xie K B *et al.* 2000. Ultra-structural study of leaf cells damaged from Hg^{2+} and Cd^{2+} pollution in *Hydrilla verticillata* [J]. Acta Botanica Sinica, 42(4) : 373-378
- Stobart A K, Griffiths W T. 1985. The effect of Cd^{2+} on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley [J]. Physiological Plant, 63: 293-298
- 孙健, 铁柏清, 钱湛, 等. 2007. 单一重金属胁迫对灯心草生长及生理生化指标的影响 [J]. 土壤通报, 38(1) : 121-127
- Sun J, Tie B Q, Qian Z, *et al.* 2007. Effects of Cu, Cd, Pb, Zn and as single stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Juncus effuses* [J]. Chinese Journal of Soil Science, 38(1) : 121-127 (in Chinese)
- 孙小霞. 2006. 高羊茅对铅胁迫的生理响应 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 27(6) : 75-78
- Sun X X. 2006. Physiological response of *Tall Fescue* to lead increased stress [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 27(6) : 75-78 (in Chinese)
- 王林, 史衍玺. 2005. 镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 36(1) : 107-112
- Wang L, Shi Y X. 2005. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Capsicum annuum* [J]. Journal of Agricultural University (Natural Science), 36(1) : 107-112 (in Chinese)
- 王晓飞. 2005. 花卉植物在污染土壤修复中的资源潜力分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. 36-52
- Wang X F. 2005. Resource potential analysis of ornamentals applied in contaminated soil remediation [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 36-52(in Chinese)
- 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 2005. 铅污染土壤的植物修复研究进展 [J]. 土壤, 37(3) : 258-264
- Wu J, Meng X X, Li K. 2005. Phytoremediation of soils contaminated by lead [J]. Soils, 37(3) : 258-264 (in Chinese)
- 吴双桃, 吴晓芙, 胡日利, 等. 2004. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究 [J]. 生态环境, 13(2) : 156-157, 160
- Wu S T, Wu X F, Hu R L, *et al.* 2004. Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators [J]. Ecology and Environmental Sciences, 13(2) : 156-157, 160
- 谢传俊, 杨集辉, 周守标, 等. 2008. 铅胁迫对假俭草和结缕草生理特性的影响 [J]. 草业科学, 17(4) : 65-70
- Xie C J, Yang J H, Zhou S B, *et al.* 2008. Effects on physiological characteristics of *Eremochloa ophiuroides* and *Zoysia japonica* under progressive lead stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 17(4) : 65-70 (in Chinese)
- 杨刚, 伍钧, 唐亚. 2005. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展 [J]. 生态学杂志, 24(12) : 1507-1512
- Yang G, Wu J, Tang Y. 2005. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 24(12) : 1507-1512 (in Chinese)
- 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 1996. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应 [J]. 中国环境科学, 16(2) : 113-117
- Yang J R, He J Q, Zhang G X, *et al.* 1996. Reaction of some enzyme activities in crops of different tolerance to the stress of Cd [J]. China Environmental Science, 16(2) : 113-117 (in Chinese)
- 张磊, 宋凤斌, 王晓波. 2004. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策 [J]. 生态环境, 13(2) : 258-260
- Zhang L, Song F B, Wang X B. 2004. Heavy metal contamination of urban soils in China: status and countermeasures [J]. Ecology and Environmental Sciences, 13(2) : 258-260 (in Chinese)
- 张涛, 陈云, 谢虹, 等. 2004. 硝酸还原酶活性的调节及可能机制的研究进展 [J]. 广西植物, 24(4) : 367-372
- Zhang T, Chen Y, Xie H, *et al.* 2004. The research progress of the regulation of nitrate reductase activity and the possible mechanism [J]. Guangxi Flora, 24(4) : 367-372 (in Chinese)
- 张义贤, 李晓科. 2008. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响 [J]. 植物研究, 28(1) : 43-46, 53
- Zhang Y X, Li X K. 2008. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* seedling [J]. Bulletin of Botanical Research, 28(1) : 43-46, 53(in Chinese)
- 周朝彬, 胡庭兴, 胥晓刚, 等. 2005. 铅胁迫对草木樨叶中叶绿素含量和几种光合特性的影响 [J]. 四川农业大学学报, 23(4) : 432-435
- Zhou C B, Hu T X, Xu X G, *et al.* 2005. Effect of lead stress on chlorophyll content and photosynthetic characters in leaf of *Melilotus suavena* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 23(4) : 432-435 (in Chinese)