

Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗生长和生理指标的影响

韩玉林^{a,b}

(江西财经大学 a. 艺术学院园林系; b. 风景园林与园林植物种质资源研究所, 江西 南昌 330032)

摘要: 采用营养液培养法,研究了不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺 [*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.] 幼苗生长和一些生理指标的影响。结果表明,处理 35 d 后,在 50.00 mg · L⁻¹Pb 与 0.10、1.00、10.00 mg · L⁻¹Cu 组成的 3 个复合胁迫处理组中,马蔺幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分的鲜质量和干质量、叶片叶绿素 a (Chla) 和叶绿素 b (Chlb) 的含量均低于对照组 (0.00 mg · L⁻¹Pb-0.01 mg · L⁻¹Cu),叶片 SOD 和 POD 活性则显著高于对照组;其中,50.00 mg · L⁻¹Pb-10.00 mg · L⁻¹Cu 处理组幼苗的株高、根长、Chla 和 Chlb 含量及 SOD 和 POD 活性均最高,地上部分和地下部分的鲜质量和干质量也较高。在 100.00 mg · L⁻¹Pb 与 0.10、1.00、10.00 mg · L⁻¹Cu 组成的 3 个复合胁迫处理组中,100.00 mg · L⁻¹Pb-0.10 mg · L⁻¹Cu 处理组幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分的鲜质量及干质量、Chla 和 Chlb 含量以及 SOD 和 POD 活性基本上都显著高于对照组,100.00 mg · L⁻¹Pb-1.00 mg · L⁻¹Cu 处理组中幼苗的株高、地上部分鲜质量和干质量以及叶片的 SOD 和 POD 活性也均显著高于对照组;而在 100.00 mg · L⁻¹Pb-10.00 mg · L⁻¹Cu 处理组中幼苗的株高、根长以及地上部分和地下部分的鲜质量和干质量均最低,Chla 和 Chlb 的含量则显著低于对照组。研究结果表明,50.00 mg · L⁻¹Pb 与较高质量浓度 Cu (10.00 mg · L⁻¹) 复合处理可在一定程度上缓解 Pb 胁迫对马蔺幼苗的伤害;而 100.00 mg · L⁻¹Pb 与较低质量浓度 Cu (0.10 mg · L⁻¹) 复合处理不但能减轻 Pb 胁迫对马蔺幼苗的伤害,还有一定的刺激生长的作用;但较高质量浓度的 Pb-Cu 复合胁迫则加剧了对马蔺幼苗的生长和生理代谢的抑制作用。

关键词: 马蔺; Pb; Cu; 复合胁迫; 生长; 生理指标

中图分类号: Q945.78; X17 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)04-0024-07

Effect of Pb-Cu combined stress on growth and physiological indexes of *Iris lactea* var. *chinensis* seedling HAN Yu-lin^{a,b} (a. Department of Landscape Architecture, College of Art; b. Institute of Landscape Architecture and Ornamental Plant Resources, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(4): 24-30

Abstract: Effect of Pb-Cu combined stress with different concentrations on growth and some physiological indexes of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedling was studied by nutrient solution culture method. The results show that in three combined stress treatments of 50.00 mg · L⁻¹ Pb with 0.10, 1.00, 10.00 mg · L⁻¹ Cu, seedling height, root length, fresh and dry weights of above- and under-ground parts, contents of chlorophyll a (Chla) and b (Chlb) in leaves all are lower, but activities of SOD and POD in leaves are significantly higher than those in the control (0.00 mg · L⁻¹ Pb-0.01 mg · L⁻¹ Cu) after treated for 35 d. In which, seedling height, root length, Chla and Chlb contents and activities of SOD and POD in treatment of 50.00 mg · L⁻¹ Pb-10.00 mg · L⁻¹ Cu all are the highest, and fresh and dry weights of above- and under-ground parts are also higher. In three combined stress treatments of 100.00 mg · L⁻¹ Pb with 0.10, 1.00, 10.00 mg · L⁻¹ Cu, seedling height, root length, fresh and dry weights of above- and under-ground parts, Chla and Chlb contents, activities of SOD and POD in treatment of 100.00 mg · L⁻¹ Pb-0.10 mg · L⁻¹ Cu generally are significantly higher than those in the control. And seedling height, fresh and dry weights of above-ground part, activities of SOD and POD in treatment of 100.00 mg · L⁻¹ Pb-1.00 mg · L⁻¹ Cu are all significantly higher than those in the

收稿日期: 2010-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771520); 江西省自然科学基金资助项目(2008GZN0064)

作者简介: 韩玉林(1957—),男,黑龙江青冈人,博士,研究员,主要从事观赏植物资源抗性评价与利用研究。

control. But in treatment of $100.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu, seedling height, root length, fresh and dry weights of above- and under-ground parts are all the lowest, Chla and Chlb contents are significantly lower than those in the control. It is concluded that the combined treatment of $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb with a relatively high concentration Cu ($10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) can relieve the damage of Pb stress to *I. lactea* var. *chinensis* seedling to a certain extent, while the combined treatment of $100.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb with a relatively low concentration Cu ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) not only reduces the damage but also has a stimulating effect on growth of seedling. But the combined treatment with a relatively high concentration Pb and Cu can aggravate the inhibition to growth and physiological metabolism of *I. lactea* var. *chinensis* seedling.

Key words: *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.; Pb; Cu; combined stress; growth; physiological index

Pb 污染是当今世界面临的主要环境问题之一^[1]。过量的 Pb 进入环境并参与水体—土壤—生物系统循环,通过植物的吸收在植物根、茎、叶及籽实中大量积累,并通过食物链的富集作用危及动物和人类的健康。了解 Pb 对植物的毒害作用、研究添加外源物质对 Pb 胁迫的影响效应,对改善植物的 Pb 耐性和治理 Pb 污染具有重要的理论和现实意义。目前,研究者多采用向培养介质中添加有机酸的方式研究植物对 Pb 耐性的变化^[2-5]。

Cu 是植物生长所必需的微量元素,但过量的 Cu 却有较高的生物毒性,对植物产生危害,使植物的生长发育受阻、生理代谢过程发生紊乱,严重时可导致植物细胞死亡。目前有关 Cu 单一胁迫对植物的影响已有诸多的研究报道^[6-10],但在自然条件下,往往是多种金属元素共存,对植物的生长和发育起着加和、拮抗或协同的影响作用。

马蔺 [*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.] 为鸢尾科 (Iridaceae) 鸢尾属 (*Iris* L.) 多年生草本宿根植物,在亚洲、欧洲和北美洲等北温带地区均有分布,也广泛分布于中国的西北、东北和华北等地。马蔺不仅分布范围广,而且具有适应性强、耐盐碱、生物量大、易繁殖和管理粗放等优点^[11-13],是具备植物修复基本特性的理想种类。马蔺对 Pb、Cu 单一胁迫均具有较好的耐性,且是具有 Pb、Cu 超富集能力的植物^[9,14]。

为了探明 Cu 对马蔺 Pb 耐性的调节作用以及 Pb-Cu 对马蔺的复合胁迫效应,作者对不同 Pb-Cu 复合胁迫条件下马蔺的生长和生理指标进行了测定和分析,旨在为改善马蔺的 Pb 耐性、提高马蔺对 Pb 污染的修复能力提供实验数据,并为马蔺的种质资源改良和利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试马蔺引自黑龙江省,在江苏省·中国科学院植物研究所鸢尾种质圃栽培 6 a 以上,供试的马蔺种子为无性繁殖群体自然结实的籽实。实验于 2008 年 10 月在南京中山植物园温室内进行。

1.2 方法

1.2.1 种子萌发和 Pb-Cu 复合胁迫处理方法 马蔺种子用质量分数 0.5% NaClO 消毒 20 min,自来水冲洗数次后常温浸种催芽,待种子萌发后播种于干净的黄沙中沙培,沙培期间浇灌 1/2Hoagland 营养液,待幼苗生长至株高约 10 cm 时,选择株高和大小均匀一致的幼苗,在 5 L 的塑料周转箱中用 1/2Hoagland 营养液预培养 1 周后用于胁迫处理。

Pb-Cu 复合胁迫共设 6 个处理组,各处理组中 Pb 和 Cu 最终的质量浓度分别为: $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu; $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu; $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu; $100.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu; $100.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu; $100.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu。以不加 Pb 的 1/2Hoagland 营养液 (Cu 本底值为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 作为对照 (CK),即 $0.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb- $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu。分别以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 CuCl_2 的形式向 1/2Hoagland 营养液中添加 Pb 和 Cu,每处理 3 次重复,每个周转箱中种植 20 株马蔺幼苗,1 个周转箱即为 1 次重复。4 天换 1 次营养液,胁迫处理 35 d 后取样用于生长及生理指标的测定。

1.2.2 生长指标测定方法 首先用蒸馏水将马蔺幼苗的根系冲洗干净,再置于 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙

酸二钠(EDTA-Na₂)溶液中浸泡交换 30 min,以去除根系表面粘附的金属离子,将 20 株幼苗从根茎处分成地上部分和地下部分,用去离子水冲洗干净并吸干表面水分后,分别称取地上部分和地下部分鲜质量并计算平均值。然后于 105 ℃ 杀青 2 h 并于 60 ℃ 干燥至恒质量,分别称取干质量。

用直尺分别测量 20 株马蔺幼苗最长叶的长度和最长根的长度,其平均值即分别为株高和根长^[15]。

1.2.3 生理指标测定方法 分别取马蔺幼苗相同部位的新鲜叶片 0.1~0.3 g,用于各项生理指标的测定。采用丙酮乙醇混合提取法^[16]¹⁴⁸测定叶绿素含量;采用 NBT 光化还原法^[17]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法^[16]²¹⁰⁻²¹¹测定过氧化物酶(POD)的活性。

1.3 数据处理和统计分析

获得的实验数据用 Excel 2003 软件计算平均值和标准差,用 SPSS 10.0 统计分析软件的 General Linear Mode-Univariate 进行方差分析和显著性检验($P=0.05$)。

2 结果和分析

2.1 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗株高和根长的影响

Pb-Cu 复合胁迫条件下马蔺幼苗株高和根长的测量结果见表 1。由表 1 可以看出,在 Pb 质量浓度为 50.00 mg · L⁻¹ 的 3 个处理组中,马蔺幼苗的株高均较对照(0.00 mg · L⁻¹Pb-0.01 mg · L⁻¹Cu)显著下降($P<0.05$),其中 50.00 mg · L⁻¹Pb-1.00 mg · L⁻¹Cu 处理组幼苗的株高最低,50.00 mg · L⁻¹Pb-10.00 mg · L⁻¹Cu 处理组幼苗的株高则略有提高,表明在 50.00 mg · L⁻¹Pb 胁迫条件下添加较高质量浓度的 Cu 可在一定程度上缓解 Pb 胁迫对马蔺幼苗生长的伤害。在 Pb 质量浓度为 100.00 mg · L⁻¹ 的 3 个处理组中,添加了 0.10 和 1.00 mg · L⁻¹Cu 的 2 个处理组马蔺幼苗的株高分别比对照组增加了 10.1% 和 6.1%,差异达到显著水平($P<0.05$),并显著高于 50.00 mg · L⁻¹Pb 与 0.10、1.00 和 10.00 mg · L⁻¹Cu 复合胁迫处理组,显示这 2 组复合胁迫处理有促进马蔺幼苗地上部分生长的作用;当 Cu 质量浓度提高至 10.00 mg · L⁻¹ 时,马蔺幼苗的株高显著低于对照,仅为对照组的 78.3%,表明较高浓度的 Pb-Cu 复合胁迫

对马蔺幼苗的生长有一定的伤害。

表 1 不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗株高和根长的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of Pb-Cu combined stress with different concentrations on seedling height and root length of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

质量浓度/mg · L ⁻¹ Concentration		株高/cm Seedling height	根长/cm Root length
Pb	Cu		
0.00 (CK)	0.01 (CK)	19.167±0.493c	15.233±0.404bc
50.00	0.10	17.700±0.265d	11.500±0.300e
50.00	1.00	16.933±0.451e	13.400±0.361d
50.00	10.00	18.067±0.058d	14.600±0.300c
100.00	0.10	21.100±0.265a	16.867±0.058a
100.00	1.00	20.333±0.416b	15.567±0.473b
100.00	10.00	15.000±0.265f	11.233±0.473e

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

植物根长生长对重金属胁迫的响应往往较株高生长更为敏感。从表 1 中还可以看出,在 Pb 质量浓度为 50.00 mg · L⁻¹ 的 3 个处理组中马蔺幼苗的根长均小于对照组,50.00 mg · L⁻¹Pb-0.10 mg · L⁻¹Cu 处理组马蔺幼苗的根长最小,随 Cu 质量浓度的提高,幼苗根长增加,50.00 mg · L⁻¹Pb-10.00 mg · L⁻¹Cu 处理组幼苗的根长仅比对照下降了 4.2%,且差异不显著($P>0.05$),表明随着 Cu 质量浓度的提高,50.00 mg · L⁻¹Pb 胁迫对马蔺幼苗生长的伤害逐渐减小。在 Pb 质量浓度为 100.00 mg · L⁻¹ 的 3 个胁迫处理组中,Cu 质量浓度较低的 2 个处理组(100.00 mg · L⁻¹Pb-0.10 mg · L⁻¹Cu 和 100.00 mg · L⁻¹Pb-1.00 mg · L⁻¹Cu)中幼苗的根长均高于对照组,分别比对照组提高了 10.7% 和 2.2%,并显著高于 50.00 mg · L⁻¹Pb 与 0.10、1.00 和 10.00 mg · L⁻¹Cu 复合胁迫处理组($P<0.05$);当 Cu 质量浓度提高至 10.00 mg · L⁻¹ 时,马蔺幼苗根长显著低于对照组,仅为对照的 73.7%。说明在 100 mg · L⁻¹Pb 条件下添加较低质量浓度的 Cu 有促进马蔺幼苗根系生长的作用,而添加较高质量浓度的 Cu 则对马蔺幼苗根系的生长有抑制作用,这种影响效应与对幼苗株高的影响效应一致。

2.2 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗地上部分和地下部分生长量的影响

Pb-Cu 复合胁迫条件下各处理组及对照组马蔺幼苗地上部分和地下部分的鲜质量和干质量见表 2。

表2 不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫条件下马蔺幼苗地上部分和地下部分的鲜质量和干质量 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 Fresh and dry weights of above- and under-ground parts of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings under Pb-Cu combined stress with different concentrations ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		地上部分 Above-ground part		地下部分 Under-ground part	
Pb	Cu	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight
0.00 (CK)	0.01 (CK)	0.628±0.009b	0.110±0.003b	0.454±0.009b	0.082±0.003a
50.00	0.10	0.571±0.005c	0.106±0.001b	0.377±0.011cd	0.072±0.002b
50.00	1.00	0.463±0.008d	0.084±0.002c	0.370±0.010de	0.060±0.003d
50.00	10.00	0.562±0.008c	0.106±0.002b	0.358±0.006e	0.066±0.003c
100.00	0.10	0.658±0.011a	0.121±0.005a	0.488±0.003a	0.083±0.002a
100.00	1.00	0.669±0.005a	0.121±0.001a	0.387±0.007c	0.071±0.001bc
100.00	10.00	0.426±0.009e	0.074±0.004d	0.314±0.006f	0.051±0.004e

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

2.2.1 对地上部分鲜质量和干质量的影响 由表2可知,在不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫条件下马蔺幼苗地上部分的鲜质量和干质量的变化趋势一致。

在 Pb 质量浓度为 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中,马蔺幼苗地上部分的鲜质量和干质量均低于对照组 ($0.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$) 并随 Cu 质量浓度的提高呈先降后升的趋势,与同一胁迫条件下幼苗株高的变化趋势基本一致。其中, $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地上部分的鲜质量显著低于对照组 ($P<0.05$),但干质量仅略低于对照组; $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地上部分鲜质量和干质量最小,分别为对照组的 73.7% 和 76.4%; $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地上部分的鲜质量和干质量则略有提高,分别为对照组的 89.5% 和 96.4%。表明在 Pb-Cu 复合胁迫条件下 Cu 的质量浓度较高 ($10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 可一定程度缓解 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 胁迫对马蔺幼苗的伤害作用。

在 Pb 质量浓度为 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中, $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 和 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组马蔺幼苗地上部分鲜质量分别较对照组增加了 4.8% 和 6.5%、干质量则均增加了 10.0%; 而 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地上部分的鲜质量则仅为对照的 67.8%、干质量仅为对照的 67.3%,与同一胁迫条件下幼苗株高和根长的变化趋势一致。表明质量浓度相对较高的 Pb-Cu 复合胁迫明显抑制了马蔺幼苗的生长。

另外,总体上看,在 Cu 质量浓度较低 (0.10 和 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$) 的 4 个处理组中, Pb 质量浓度较高

($100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 2 个处理组马蔺幼苗地上部分鲜质量和干质量均高于 Pb 质量浓度较低 ($50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 2 个处理组; 在 Cu 质量浓度较高 ($10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 2 个处理组中, $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 处理组马蔺幼苗地上部分的鲜质量和干质量均低于 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 处理组。

差异显著性分析结果显示,各复合胁迫处理组马蔺幼苗地上部分的鲜质量均与对照组有显著差异 ($P<0.05$); 而 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组马蔺幼苗地上部分的干质量与对照组差异不显著 ($P>0.05$),其余处理组马蔺幼苗地上部分的干质量与对照组均有显著差异。

2.2.2 对地下部分鲜质量和干质量的影响 在不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫条件下马蔺幼苗地下部分的鲜质量和干质量的变化趋势一致 (表 2)。由表 2 可见,在 Pb 质量浓度为 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中,马蔺幼苗地下部分的鲜质量和干质量均显著低于对照组 ($P<0.05$)。其中,鲜质量随 Cu 质量浓度的提高不断减小, 0.10 、 1.00 和 $10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地下部分的鲜质量分别比对照降低了 17.0%、18.5% 和 21.1%; 地下部分的干质量分别较对照降低了 12.2%、26.8% 和 19.5%。

在 Pb 质量浓度为 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中, $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组幼苗地下部分的鲜质量和干质量均高于对照,分别较对照组提高了 7.5% 和 1.2%,前者与对照有显著差异 ($P<0.05$); 而 1.00 和 $10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组地下部分的鲜质量和干质量均显著小于对照组,并表现出随 Cu 质量浓度的提高不断降低的趋势,其中, $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组地下

部分的鲜质量和干质量分别较对照降低了 14.8% 和 13.4%, 10.00 mg · L⁻¹ Cu 处理组地下部分的鲜质量和干质量分别较对照降低了 30.8% 和 37.8%。

上述研究结果表明: 添加较高质量浓度 Cu (10.00 mg · L⁻¹) 可在一定程度上缓解 50.00 mg · L⁻¹ Pb 胁迫对马蔺幼苗根系生长的毒害作用, 但加剧了 100.00 mg · L⁻¹ Pb 胁迫对马蔺幼苗根系生长的毒害作用, 这一现象与幼苗株高、根长及地上部分鲜质量和干质量的变化趋势基本一致。

另外, 总体上来看, 在 Cu 质量浓度较低 (0.10 和 1.00 mg · L⁻¹ Cu) 的 4 个处理组中, Pb 质量浓度较高 (100.00 mg · L⁻¹) 的 2 个处理组马蔺幼苗地下部分鲜质量和干质量均高于 Pb 质量浓度较低 (50.00 mg · L⁻¹) 的 2 个处理组; 在 Cu 质量浓度较高 (10.00 mg · L⁻¹) 的 2 个处理组中, 100.00 mg · L⁻¹ Pb 处理组马蔺幼苗地上部分的鲜质量和干质量均低于 50.00 mg · L⁻¹ Pb 处理组。

2.3 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 在光合作用的光吸收中起核心作用, 其含量高低能够反映光合作用水分的强弱^[18]。重金属污染会导致植物叶绿素含量的降低^[19-20]。不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片叶绿素含量的影响见表 3。

由表 3 可见, 在 Pb 质量浓度为 50.00 mg · L⁻¹ 的 3 个处理组中, 马蔺叶片叶绿素 a 和 b 的含量均显著低于对照组 ($P < 0.05$), 且随 Cu 质量浓度的提高, 叶绿素 a 和 b 含量呈逐渐增加的趋势, 50.00 mg · L⁻¹

Pb-0.10 mg · L⁻¹ Cu 处理组叶片叶绿素 a 和 b 的含量分别为对照的 50.7% 和 53.1%; 50.00 mg · L⁻¹ Pb-1.00 mg · L⁻¹ Cu 处理组叶片叶绿素 a 和 b 的含量分别为对照的 61.1% 和 58.7%; 50.00 mg · L⁻¹ Pb-10.00 mg · L⁻¹ Cu 处理组叶片叶绿素 a 和 b 的含量分别为对照的 71.3% 和 69.9%。说明添加相对较高质量浓度 Cu (10.00 mg · L⁻¹) 可以缓解 50.00 mg · L⁻¹ Pb 胁迫对马蔺幼苗生长的毒害作用。

在 Pb 质量浓度为 100.00 mg · L⁻¹ 的 3 个处理组中, 随 Cu 质量浓度的提高, 马蔺幼苗叶片的叶绿素 a 和 b 的含量呈不断降低的趋势, 与对照组相比均呈先升高后降低的趋势。其中, 100.00 mg · L⁻¹ Pb-0.10 mg · L⁻¹ Cu 处理组叶绿素 a 和 b 的含量均显著高于对照 ($P < 0.05$), 分别较对照组增加了 2.5% 和 6.6%; 而 100.00 mg · L⁻¹ Pb-1.00 mg · L⁻¹ Cu 和 100.00 mg · L⁻¹ Pb-10.00 mg · L⁻¹ Cu 处理组叶片叶绿素 a 和 b 的含量均显著低于对照组 ($P < 0.05$), 分别较对照组降低了 23.2% 和 31.7%、29.1% 和 34.2%。表明在 100.00 mg · L⁻¹ Pb 胁迫条件下, 添加较高质量浓度的 Cu 可加重对马蔺幼苗叶片叶绿素的破坏程度, 与同一胁迫条件下马蔺幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分鲜质量和干质量等指标的变化趋势相似。

由表 3 还可以看出, 在不同 Pb-Cu 复合胁迫条件下, 马蔺幼苗叶片叶绿素 a 与 b 含量比值的差异相对较小, 50.00 mg · L⁻¹ Pb-0.10 mg · L⁻¹ Cu 和 100.00 mg · L⁻¹ Pb-0.10 mg · L⁻¹ Cu 处理组的叶绿素 a 与 b 的比值低于对照组, 其他处理组均高于对照组, 但未达到显著水平。

表 3 不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片叶绿素含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of Pb-Cu combined stress with different concentrations on chlorophyll content in leaves of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

质量浓度/mg · L ⁻¹ Concentration		含量/mg · g ⁻¹ Content		
Pb	Cu	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	a/b
0.00 (CK)	0.01 (CK)	0.682±0.001b	0.196±0.004b	3.480±0.072ab
50.00	0.10	0.346±0.003g	0.104±0.005e	3.324±0.134b
50.00	1.00	0.417±0.002f	0.115±0.001d	3.623±0.030ab
50.00	10.00	0.486±0.002d	0.137±0.006c	3.540±0.127ab
100.00	0.10	0.699±0.005a	0.209±0.002a	3.351±0.013b
100.00	1.00	0.524±0.005c	0.139±0.008c	3.769±0.170a
100.00	10.00	0.466±0.003e	0.129±0.008c	3.620±0.202ab

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); a/b: 叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content.

2.4 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片 SOD 和 POD 活性的影响

不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片 SOD 和 POD 活性的影响见表 4。由表 4 可见,在不同的 Pb-Cu 复合胁迫条件下,马蔺幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均高于对照组,且差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同质量浓度 Pb-Cu 复合胁迫对马蔺幼苗叶片 SOD 和 POD 活性的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 4 Effect of Pb-Cu combined stress with different concentrations on activities of SOD and POD in leaves of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. seedlings($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Concentration		SOD 活 性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ SOD activity	POD 活 性/ $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ POD activity
Pb	Cu		
0.00 (CK)	0.01 (CK)	124.053±1.565g	840.00±30.00e
50.00	0.10	134.210±0.576f	960.00±30.00d
50.00	1.00	139.980±1.639e	1 140.00±30.00c
50.00	10.00	208.843±0.375a	1 260.00±30.00b
100.00	0.10	173.097±0.755c	1 610.00±45.83a
100.00	1.00	180.117±1.567b	1 230.00±60.00b
100.00	10.00	170.460±1.639d	920.00±45.83d

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

在 Pb 质量浓度为 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中,马蔺幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均显著高于对照组($P<0.05$),且随 Cu 质量浓度的提高 SOD 和 POD 活性呈逐渐增强的趋势,二者的变化趋势相同,其中 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫处理组马蔺幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性分别比对照组增加了 68.3% 和 50.0%。

在 Pb 质量浓度为 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个处理组中,马蔺幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性也均显著高于对照组($P<0.05$),其中,随 Cu 质量浓度的提高 POD 活性逐渐减小,而 SOD 活性则呈波动的变化趋势。 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组 SOD 活性最高,较对照增加了 45.2%。

以上结果说明, Pb-Cu 复合胁迫并未对马蔺幼苗叶片的保护酶系统造成伤害,而且对 SOD 和 POD 活性有一定的激活作用,这在一定程度上反映了马蔺对 Pb 和 Cu 的耐性。

3 讨 论

Cu 是植物生长发育必需的微量元素之一,适量

的外源 Cu 能促进植物生长,缓解逆境胁迫对植物造成的伤害,然而过量的 Cu 可能对植物的生长和正常代谢过程产生影响^[21-23]。本研究结果表明,在 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 与 0.10 、 1.00 或 $10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 的复合胁迫条件下,较高质量浓度 Cu 的存在可一定程度缓解 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 胁迫对马蔺幼苗生长的毒害作用,具体表现为:在 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫条件下,马蔺幼苗的株高、根长、地上部分鲜质量和干质量、地下部分干质量、叶片叶绿素 a 和 b 含量以及 SOD 和 POD 活性等反映植物生长和生理特性的指标均高于 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}-1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 处理组。这与孙健等^[24] 和李君等^[25] 的研究结果相似。其原因可能是在 Pb-Cu 复合胁迫条件下,Cu 与 Pb 竞争吸附位点,使马蔺幼苗对 Pb 的吸收量减少,从而降低了 Pb 对马蔺幼苗生长和生理的毒害。

在 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫条件下,马蔺幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分的鲜质量及干质量、叶片叶绿素 a 和 b 含量以及 SOD 和 POD 活性基本上都显著高于对照组($P<0.05$);而在 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫条件下,马蔺幼苗的株高、地上部分鲜质量和干质量以及叶片 SOD 和 POD 活性也均显著高于对照组。表明在较高浓度的 Pb 胁迫条件下,添加一定量的 Cu 可诱导马蔺幼苗出现“毒物兴奋效应”,刺激马蔺幼苗的生长。这与郭平等^[26] 对向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 幼苗的研究结果相似,其机制有待进一步的研究。

在 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}-10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫条件下,马蔺幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分的鲜质量及干质量均最低,叶绿素 a 和 b 的含量也显著低于对照($P<0.05$),表明在高浓度 Pb 胁迫条件下添加高浓度 Cu 不但不能缓解 Pb 对马蔺幼苗的毒害作用,反而会使马蔺幼苗的生长和生理代谢过程受到严重影响,表明在此条件下过量的 Cu 不再是马蔺幼苗生长的必需元素,已成为阻碍马蔺幼苗正常生长的胁迫因子,并与 Pb 协同作用共同阻碍马蔺幼苗正常的生长和生理代谢。

此外,在质量浓度 $100.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 与 0.10 或 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 的复合胁迫条件下,马蔺幼苗的株高、根长、地上部分和地下部分的鲜质量及干质量、叶片叶绿素 a 和 b 含量以及 SOD 和 POD 活性均高于 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Pb}$ 与 0.10 或 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cu}$ 复合胁迫处理组。表明在较高浓度 Pb 胁迫条件下添加较低

浓度 Cu,能更明显地缓解 Pb 胁迫对马蔺幼苗的伤害作用,而且对马蔺幼苗生长和生理代谢还有一定的促进作用,其中的作用机制还有待进一步研究。

总之,在利用马蔺进行 Pb 污染植物修复的实践过程中,可以采用添加外源 Cu 的方式提高马蔺对 Pb 的耐性,但 Cu 的添加量应根据被污染水体或土壤中 Pb 的实际含量进行适当调整。

参考文献:

- [1] Shen Z G, Li X D, Wang C C, et al. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1893-1900.
- [2] 郭艳杰,李博文,谢建治,等. 潮褐土施用有机肥对油菜吸收 Cd Zn Pb 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 472-476.
- [3] 陈忠林,张利红. 有机酸对铅胁迫小麦幼苗部分生理特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(5): 393-395.
- [4] 李雪梅,张利红,陶思源,等. 不同有机酸对铅胁迫小麦幼苗的缓解作用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 833-836.
- [5] 陶玲,魏成熙. 有机酸、EDTA 配施对铅胁迫蒜苗部分生理特性及品质的影响[J]. *耕作与栽培*, 2008(6): 9-12.
- [6] 张国军,江虹,郑丽芹,等. Cu 胁迫对脐橙幼苗光合特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 130-134.
- [7] 齐雪梅,李培军,刘宛. Cu 胁迫对大麦幼苗生长及 DNA 损伤效应的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1925-1928.
- [8] 赵艳,徐迎春,吴晓丽,等. Cu 胁迫对狭叶香蒲体内元素吸收分配的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 665-670.
- [9] 张开明,佟海英,黄苏珍,等. Cu 胁迫对黄菖蒲和马蔺 Cu 富集及其他营养元素吸收的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(1): 18-22.
- [10] 邱栋梁,张国军,余东,等. Cu 胁迫对柑桔叶片膜透性及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 1008-1013.
- [11] 白文波,李品芳. 盐胁迫对马蔺生长及 K⁺、Na⁺ 吸收与运输的影响[J]. *土壤*, 2005, 37(4): 415-420.
- [12] 李苗,宋玉霞,郑国琦. 马蔺种子休眠和萌发的初步研究[J]. *农业科学研究*, 2005, 26(3): 75-78.
- [13] 王鸿燕,黄苏珍. Pb 胁迫对马蔺种子萌发和幼苗根尖细胞有丝分裂的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(2): 53-56.
- [14] 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.
- [15] Zhou W B, Qiu B S. Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii* Hance (Crassulaceae) [J]. *Plant Science*, 2005, 169(4): 737-745.
- [16] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [17] 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: 167-169.
- [18] 袁敏,铁柏清,唐美珍. 重金属单一污染对龙须草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 929-932.
- [19] 铁柏清,袁敏,唐美珍,等. 重金属单一污染对龙须草生长与生理生化特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 99-103.
- [20] 严重玲,洪业汤,付舜珍,等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 488-492.
- [21] Liu J, Xiong Z T, Li T Y, et al. Bioaccumulation and eco-physiological responses to copper stress in two populations of *Rumex dentatus* L. from Cu contaminated and non-contaminated sites [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(1): 43-51.
- [22] Kinraide T B, Pedler J F, Parker D R. Relative effectiveness of calcium and magnesium in the alleviation of rhizotoxicity in wheat induced by copper, zinc, aluminum, sodium and low pH [J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 201-208.
- [23] 周长芳,吴国荣,施国新,等. 水花生抗氧化系统在抵御 Cu²⁺ 胁迫中的作用[J]. *植物学报*, 2001, 43(4): 389-394.
- [24] 孙健,铁柏清,钱湛,等. Cu、Cd、Pb、Zn、As 复合污染对灯芯草的生理毒性效应[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 279-285.
- [25] 李君,周守标,黄文江,等. 马蹄金叶片中铜、铅含量及其对生理指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2355-2358.
- [26] 郭平,刘畅,张海博,等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 92-95, 113.