

麻疯树对铅胁迫的生理耐性研究

李清飞 (信阳师范学院城市与环境科学学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 通过盆栽试验研究土壤中不同浓度(0、200、400、800、1 600 和 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Pb 胁迫对麻疯树生长、Pb 吸收及相关生理指标的影响。结果表明,当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树生长受到明显抑制;麻疯树植株不同部位 Pb 含量随土壤 Pb 浓度的升高而增加,且各部位 Pb 含量从高到低依次为根、叶和茎;当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树叶中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,以及可溶性糖、脯氨酸和酸溶性巯基(SH)含量均显著提高,而谷胱甘肽(GSH)含量仅在土壤 $w(\text{Pb})$ 为 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时才显著增加;可溶性蛋白质含量随 Pb 浓度的增加呈倒“W”型变化,当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其含量最大;上述生理指标的变化可缓解重金属 Pb 对麻疯树的毒害。主成分分析结果表明 Pb 胁迫处理的聚类结果与各处理麻疯树生物量及生理指标的变化规律相吻合,POD 活性和可溶性糖含量对缓解重金属 Pb 毒害的贡献较大。可见,麻疯树在 Pb 污染土壤修复中具有一定的应用前景。

关键词: 麻疯树; 铅胁迫; 生理耐性; 土壤修复; 植物修复; 主成分分析

中图分类号: X53; X171.5; X503.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)01-0072-05

Physiological Tolerance of *Jatropha curcas* to Lead Stress. LI Qing-fei (Department of Urban and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: To study effect of lead stress on growth, lead absorption and related physiological indexes of *Jatropha curcas*, a pot experiment was conducted with soils treated with the Pb concentration of 0, 200, 400, 800, 1 600, and 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, separately. Results show that growth of *J. curcas* was significantly inhibited when soil $w(\text{Pb})$ was $\geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. With increasing Pb concentration in the soil, the Pb contents in various parts of the plant increased, showing a decreasing order of root, leaf, and stem. And when soil $w(\text{Pb})$ was $\geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the activities of antioxidant enzymes, i. e. superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), and the contents of proline, soluble sugar, and acid thiol (SH) in the plant leaves were all increased significantly, however, the content of glutathione (GSH) would show a sharp rise only when soil $w(\text{Pb})$ reached up to 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. With increasing Pb concentration in the soil, the content of soluble protein rose first and then declined, and peaked when soil $w(\text{Pb})$ was at 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The above-described changes in physiology of *J. curcas* reduced Pb toxicity to the plant to a certain extent. Principal component analysis (PCA) revealed that the result of clustering of the treatments of Pb stress accorded with the law of the changes in biomass and physiological indices of *J. curcas*. Among the physiological indices of *J. curcas*, POD activity and soluble sugar content were major contributors to alleviating Pb toxicity to the plant. The findings of the research suggest that *J. curcas* has great potential for phytoremediating lead polluted soils.

Key words: *Jatropha curcas*; lead stress; physiological tolerance; soil remediation; plant rehabilitation; principle component analysis

近年来,含有危险废弃物的工业废物大量排放及不合理处置导致人们赖以生存的土壤质量日益恶化^[1]。其中,较为严重的是重金属污染,土壤一旦遭受重金属污染,就很难予以彻底清除,危害十分严重。由于重金属 Pb 在土壤中的持久性和对作物及人类健康的高毒性,受到人们的广泛关注。

在土壤修复技术中,植物修复技术具有不扰动环境、成本低、效益高等优点,因而日趋为人们所接受^[2]。麻疯树(*Jatropha curcas*)是一种非食用性能源油料植物,具有生长快和耐贫瘠等特点,且对重

金属 As、Zn、Cr 和 Hg 等具有一定耐性,在修复重金属污染土壤方面有很大的应用前景^[3-4]。然而,目前关于 Pb 胁迫对麻疯树生长、Pb 吸收及其生理指标变化规律影响的研究尚鲜见报道。

笔者通过盆栽试验,研究麻疯树在 Pb 胁迫下

收稿日期: 2011-09-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA061001); NFSC-广东联合基金(U0833004); 河南省科技厅项目(112102310431); 信阳师范学院博士科研启动基金

的生长、吸收 Pb 及其生理指标的变化规律,旨在对麻疯树耐受 Pb 胁迫机理作一些有益的探索,以期为修复重金属 Pb 污染土壤提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 试验材料

供试土壤采自中国科学院华南植物园试验场,其基本理化性质为: pH 6.03 [$V(\text{水}):m(\text{土})=5:1$], $w(\text{有机质})=37.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $w(\text{全氮})=1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $w(\text{全磷})=1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $w(\text{全 Pb})=46.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 麻疯树种子购自广西省富民达生物有限公司。

1.2 试验方法

采用室内盆栽试验。将采集的土壤自然风干,粉碎,搅拌均匀,土壤用量为 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{盆}^{-1}$, 设置土壤 $w(\text{Pb})$ 分别为 0、200、400、800、1 600、3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 污染以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液形式均匀加入,混合均匀后平衡 1 个月,每个处理 3 次重复。种植前每盆均匀施入 1 g 广东省农业科学院的农科牌复混肥料 [$m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=15:6:12$]。麻疯树种子经消毒后,于营养土中育苗,经 30 d 后选取大小一致、生长良好的三叶期实生幼苗移栽,每盆移栽 1 棵,于温室中生长 6 个月后收获。将植物分为叶、茎和根 3 个部位,先用自来水清洗干净,再用去离子水冲洗数遍,65 °C 条件下烘干,称量生物量后磨碎。收获前 2 d 分别剪取代表性叶片顶端 3~5 cm 部位测定各项生理指标。

1.3 测定方法

抗氧化系统酶 [超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)] 活性以及可溶性蛋白质、脯氨酸、可溶性糖含量测定方法参见文献 [5]。SOD 活性以抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位 (u), $\text{u} \cdot \text{g}^{-1}$; CAT 活性以 1 g 鲜质量样品 1 min 内分解 H_2O_2 的量表示, $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$; POD 活性以 1 min 内光密度 A_{470} 增加 0.01 为 1 个酶活性单位 (u'), $\text{u}' \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 。酸溶性巯基 (SH) 和还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量测定方法分别参见文献 [6~7]。

麻疯树植物样品采用硝酸-高氯酸 (体积比为 4:1) 消解法消解, Pb 含量采用 ICP-OES (Optima 5300DV, Perkin-Elmer Instruments, USA) 测定。以 ESP-1 西红柿叶 (中国环境监测总站提供) 进行质量控制, 对质控样品所测定的平均值和平行样偏差都在规定要求范围内。

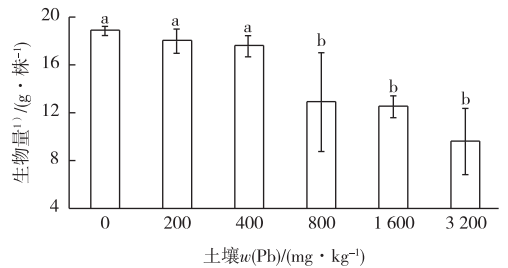
试验数据采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差

分析和多重比较以及主成分分析。采用 Duncan 检验法进行差异显著性分析。主成分分析采用相关性矩阵作为因子提取依据, 其他参数选取系统默认值。采用 Origin 8.5 和 Excel 2003 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 Pb 胁迫对麻疯树生物量的影响

由图 1 可知, 当土壤 $w(\text{Pb}) \leq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树生长未受到明显抑制 ($P > 0.05$), 而当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树生长受到明显抑制 ($P < 0.05$), 土壤 $w(\text{Pb})$ 为 800、1 600、3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其生物量分别比对照降低 31.6%、33.6%、49.1%, 这与植物受到重金属 Pb 胁迫, 其生长受到抑制有关 [1]。



英文小写字母不同表示处理间生物量差异显著 ($P < 0.05$)。1) 以干质量计。

图 1 Pb 胁迫对麻疯树生物量的影响

Fig. 1 Effect of Pb stress on biomass of *Jatropha curcas*

2.2 Pb 胁迫对麻疯树吸收 Pb 的影响

由表 1 可知, 麻疯树体内 Pb 含量随土壤 Pb 含量的增加而升高, 当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树根、茎、叶中 Pb 含量明显高于其他处理 ($P < 0.05$), 分别约为对照的 286、103 和 21 倍。除对照外, 各 Pb 胁迫处理麻疯树植株不同部位 Pb 含量由高到低依次为根、叶和茎, 其中根部 Pb 含量最高达 742.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 Pb 胁迫对麻疯树植株不同部位 Pb 含量的影响

Table 1 Effect of Pb stress on Pb contents in different parts of *Jatropha curcas*

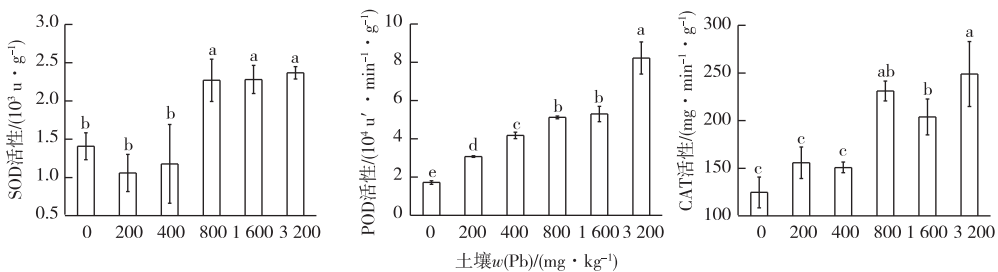
土壤 $w(\text{Pb})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	植株不同部位 $w(\text{Pb})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$		
	根	茎	叶
0	2.6±0.5 ^b	0.7±0.2 ^d	9.0±0.5 ^b
200	29.9±11.5 ^b	5.1±0.1 ^{cd}	13.4±4.6 ^b
400	45.7±6.6 ^b	8.8±0.9 ^{cd}	20.9±8.4 ^b
800	114.8±8.5 ^b	16.8±1.4 ^c	19.6±3.8 ^b
1 600	232.1±55.9 ^b	35.1±10.6 ^b	39.6±35.1 ^b
3 200	742.3±315.2 ^a	72.2±11.6 ^a	191.5±15.2 ^a

数据为平均值 ± 标准差 ($n=3$)。同一列中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。根、茎和叶质量均以干质量计。

在 Pb 污染土壤中,植物根部 Pb 含量最高,其原因是溶解在土壤溶液中的 Pb 进入植物根的皮层细胞后与根内蛋白质、多糖类等化合物形成稳定的大分子络合物或不溶性有机分子而沉积、固定下来,仅部分迁移到植物地上部,这在一定程度上减轻了重金属 Pb 对地上部各器官的毒害作用,这是植物耐受并缓解金属毒害的重要策略^{[8]75-76}。大多数植物叶中 Pb 含量 $>30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时会对植物造成伤害^{[8]82}。笔者研究结果表明,土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $1\ 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树叶中 Pb 含量约为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明此时麻疯树已受到 Pb 的毒害,从而影响麻疯树的正常生长。但与可食用性植物如玉米、印度芥菜和豌豆等不同的是,麻疯树本身不可食用,可避免 Pb 进入食物链,不会对人类和动物构成潜在威胁^[4]。因此,在 Pb 污染土壤中种植能源植物麻疯树可以大大降低生态风险。

2.3 Pb 胁迫对麻疯树叶中抗氧化酶系统的影响

由图 2 可知,SOD 活性在土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $0 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理之间差异不显著($P > 0.05$),当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,SOD 活性分别比对照增



同一幅图中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著($P < 0.05$)。以叶片鲜质量计。

图 2 Pb 胁迫对麻疯树叶中抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effect of Pb stress on activities of antioxidant enzymes in the leaves of *Jatropha curcas*

2.4 Pb 胁迫对麻疯树叶中可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量的影响

重金属毒害可刺激蛋白酶的水解活性,使可溶性蛋白质变性和降解,从而使酶参与的许多生理活动紊乱^[12]。由图 3 可知,麻疯树叶中可溶性蛋白质含量随土壤 Pb 含量的增加呈倒“W”型变化,当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树叶中可溶性蛋白质含量最高,比对照增加 65.3%,而土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树叶中可溶性蛋白质含量逐渐下降,这可能与 Pb 在麻疯树叶中积累,加速叶片中可溶性蛋白质的分解有关。

脯氨酸是植物重要的渗透调节物质,其含量的高低反映植物在逆境中受胁迫的程度^[13]。而糖是调节渗透胁迫的小分子物质,对植物抵制胁迫起着

加 61.2%、62.1% 和 68.2%;POD 活性随土壤 Pb 含量的增加而增加,当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $3\ 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 POD 活性最大,比对照增加 3.78 倍;CAT 活性在土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $0 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理之间差异不显著($P > 0.05$),当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,CAT 活性比对照增加 85.5%、63.6%、99.8%。

重金属胁迫能诱导植物体内产生活性氧自由基(O_2^- 、 O_2 、 H_2O_2 、 $\cdot\text{OH}$),危害植物的健康^[9]。同时,植物体内存在一种保护性机制以清除活性氧自由基,活性氧自由基产生与清除之间存在一种平衡,这种平衡关系随植物品种不同而不同^[10]。笔者研究结果表明,当土壤 $w(\text{Pb}) \leq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,麻疯树生物量未明显降低,SOD、CAT 活性未明显增强,说明麻疯树未明显受到金属 Pb 的伤害,而当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,SOD、POD 和 CAT 活性显著提高,说明麻疯树受到 Pb 胁迫后启动了体内的抗氧化酶系统,该系统对植物体内活性氧自由基的清除起着重要作用,此与 REDDY 等^[11] 研究发现 Pb 胁迫下硬皮豆和鹰嘴豆叶中 SOD、POD 和 CAT 活性明显增强的结果相似。

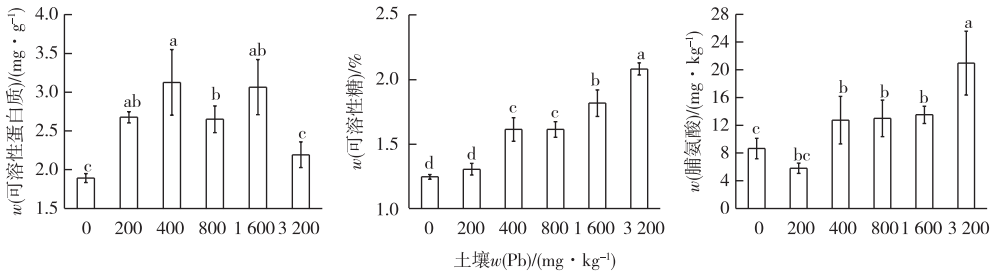
重要作用^[14]。由图 3 可知,可溶性糖含量随土壤 Pb 含量的升高而增加,当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $3\ 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其含量最高,比对照增加 67.2%,这可在一定程度上缓解 Pb 的胁迫作用;脯氨酸含量基本随 Pb 含量的增加而增加,当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其含量明显高于对照,当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 $3\ 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其含量最大,为对照的 2.4 倍,这有利于提高麻疯树对 Pb 的耐性。

2.5 Pb 胁迫对麻疯树叶中酸溶性巯基和谷胱甘肽含量的影响

植物对重金属的耐性与酸溶性 SH 和 GSH 含量相关,植物体内 SH 和 GSH 含量的增加能够提高植物络合素(PCs)的合成,从而提高植物对金属的耐性^[11]。由图 4 可知,SH 和 GSH 含量随土壤 Pb 含

量的增加而增加。SH 含量在土壤 $w(\text{Pb})$ 为 0 ~ 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SH 含量分别比对照增加 23.4%、22.8%、26.6%; 而 GSH 含量在土壤 $w(\text{Pb})$

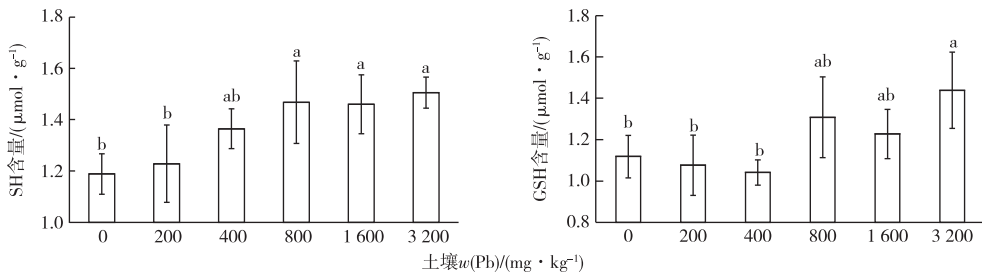
为 0 ~ 1 600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 仅当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其含量比对照增加 28.5%。



同一幅图中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。以叶片鲜质量计。

图 3 Pb 胁迫对麻疯树叶片可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effect of Pb stress on contents of soluble protein, soluble sugar and proline in the leaves of *Jatropa curcas*



同一幅图中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。以叶片鲜质量计。

图 4 Pb 胁迫对麻疯树叶片酸溶性巯基 (SH) 和谷胱甘肽 (GSH) 含量的影响

Fig. 4 Effect of Pb stress on contents of acid thiol and GSH in *Jatropa curcas* leaves

2.6 麻疯树叶 Pb 含量与生理指标间的相关性分析

相关分析结果显示, 麻疯树叶片 SOD、POD 和 CAT 活性, 以及可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸、SH 和 GSH 含量与叶片 $w(\text{Pb})$ 间相关系数 ($n = 18$) 分别为 0.510、0.837、0.671、-0.319、0.778、0.489、0.593 和 0.789, 除叶片可溶性蛋白质含量与叶片 Pb 含量间相关性不显著外, 其他生理指标与叶片 Pb 含量间均呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 表明麻疯树受到 Pb 胁迫后, 麻疯树自身启动了体内的防御机制, 即通过增加叶中 SOD、POD 和 CAT 活性及可溶性糖、脯氨酸、SH 和 GSH 含量来抵制叶中 Pb 含量增加对麻疯树所产生的毒害作用, 从而在一定程度上提高了麻疯树对 Pb 的耐性。

2.7 主成分分析

为进一步了解麻疯树的生物量、各部位的重金属含量及其生理指标对麻疯树耐受 Pb 胁迫的贡献, 利用 SPSS 软件进行主成分分析并计算各指标的因子荷载和得分。麻疯树各指标的全部信息可由 2 个主成分反映 76.8% 的信息, 其中 PC1 和 PC2 的累

积贡献率分别为 64.8% 和 12.0%。与 PC1 和 PC2 有关的各因素荷载系数见图 5。由图 5 可知, 在 PC1 中荷载系数较大的生理指标 (SOD、POD 和 CAT 活性, 可溶性糖、脯氨酸、SH 和 GSH 含量) 与麻疯树叶、茎和根 Pb 含量聚集紧密, 说明这些指标与麻疯树体内 Pb 含量密切相关, 对麻疯树缓解 Pb 胁迫具有主要作用; 麻疯树生物量与这些生理指标明显分开, 说明 Pb 胁迫在一定程度上影响了麻疯树的生长。而在 PC2 中荷载系数较大的可溶性蛋白质明显与其他生理指标相分离, 说明可溶性蛋白质仅在一定程度上缓解 Pb 的毒害。在麻疯树生理指标中贡献率最高的是 POD 活性, 属于抗氧化酶物质, 其次是可溶性糖, 说明在麻疯树生理指标中 POD 活性和可溶性糖含量对缓解重金属 Pb 毒害的贡献较大。

由图 6 可知, 在 Pb 胁迫试验中, 不同处理间的结果呈现明显差异。通过计算得分, 6 种 Pb 胁迫处理可分为 2 大类: 将土壤 $w(\text{Pb})$ 为 0、200 和 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理归为一类, 其 PC1 的得分均为负值;

将土壤 $w(\text{Pb})$ 为 800、1 600 和 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理归为另一类, PC1 的得分均为正值, 且土壤 $w(\text{Pb})$ 为 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理与土壤 $w(\text{Pb})$ 为 800 和 1 600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理之间明显相区分。这与在不同浓度 Pb 胁迫下麻疯树生物量及其生理指标的变化规律相一致。

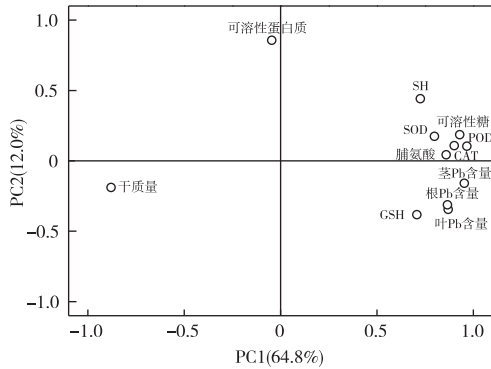


图5 与 PC1 和 PC2 有关的各因素荷载系数

Fig. 5 Loading coefficients of various PC1- and PC2-related factors

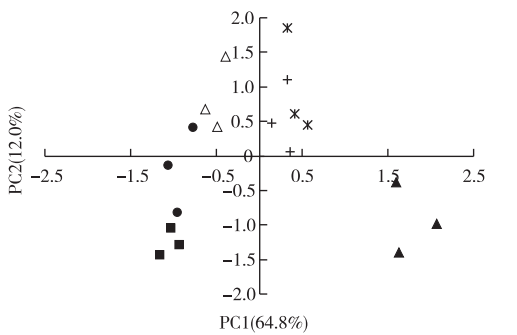
白质含量随土壤 Pb 浓度的增加呈倒“W”型变化, 当土壤 $w(\text{Pb})$ 为 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其含量最大。

(3) 主成分分析结果表明, Pb 胁迫处理的聚类结果与麻疯树的生长及其生理指标的变化规律相吻合; 在麻疯树生理指标中 POD 活性和可溶性糖含量对缓解重金属 Pb 毒害的贡献较大。

参考文献:

- [1] ISLAM E, LIU D, LI T, *et al.* Effect of Pb Toxicity on Leaf Growth, Physiology and Ultrastructure in the Two Ecotypes of *Elsholtzia argyria* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154 (1/2/3): 914 - 926.
- [2] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P B A, *et al.* Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals From the Environment Using Plants [J]. *Biotechnology*, 1995, 13 (5): 468 - 474.
- [3] 李清飞, 仇荣亮, 石宁, 等. 矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦条件研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (8): 1733 - 1739.
- [4] KUMAR G P, YADAY S K, THAWALE P R, *et al.* Growth of *Jatropha curcas* on Heavy Metal Contaminated Soil Amended With Industrial Wastes and Azotobacter: A Greenhouse Study [J]. *Biore-source Technology*, 2008, 99 (6): 2078 - 2082.
- [5] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164 - 260.
- [6] 吴灵琼, 成水平, 杨立华, 等. Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对美人蕉的氧化胁迫及抗性机理研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26 (4): 1365 - 1369.
- [7] 张宗申, 利容千, 王建波. 草酸处理对热胁迫下辣椒叶片膜透性和钙分布的影响 [J]. *植物生理学报*, 2001, 27 (2): 109 - 113.
- [8] KABATA-PENDIAS A, PENDIAS H. Trace Elements in Soils and Plants [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [9] ZENK M H. Heavy Metal Detoxification in Higher Plants: A Review [J]. *Gene*, 1996, 179 (1): 21 - 30.
- [10] PANG J, CHAN G S Y, ZHANG J, *et al.* Physiological Aspects of Vetiver Grass for Rehabilitation in Abandoned Metalliferous Mine Wastes [J]. *Chemosphere*, 2003, 52 (9): 1559 - 1570.
- [11] REDDY A M, KUMAR S G, JYOTHSNAKUMARI G, *et al.* Lead Induced Changes in Antioxidant Metabolism of Horsegram [*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.] and Bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2005, 60 (1): 97 - 104.
- [12] 努扎艾提·艾比布, 刘云国, 曾光明, 等. 香根草对镉毒害的生理耐性和积累特性 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (9): 1958 - 1963.
- [13] 周青, 黄晓华. 酸雨对 3 种木本植物的胁迫效应 [J]. *环境科学*, 2002, 23 (5): 42 - 46.
- [14] 肖强, 郑海雷, 陈瑶, 等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (4): 373 - 376.

作者简介: 李清飞 (1980—), 男, 河南封丘人, 讲师, 博士, 主要从事环境保护方面的教学与研究工作。E-mail: liqingfei@yahoo.cn



土壤 $w(\text{Pb})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$: 0; ● 200; △ 400; + 800; × 1 600; ▲ 3 200。

图6 不同浓度 Pb 胁迫处理的聚类结果

Fig. 6 Clustering of treatments of Pb stress different in concentration

3 结论

(1) 当土壤 $w(\text{Pb}) \leq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树的生长未受到明显影响, 当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其生长受到明显抑制; 麻疯树根、茎和叶中 Pb 含量随土壤 Pb 含量的升高而增加, 且各部位 Pb 含量从高到低依次为根、叶和茎。

(2) 当土壤 $w(\text{Pb}) \geq 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 麻疯树叶中 SOD、POD 和 CAT 活性及可溶性糖、脯氨酸和酸溶性 SH 含量显著增加, 而 GSH 含量仅在土壤 $w(\text{Pb})$ 为 3 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时才显著增加; 可溶性蛋