

苋菜活性氧代谢对铅胁迫的响应

杨敏文, 柯世省 (台州学院, 浙江临海317000)

摘要 [目的] 了解铅对植物生长的抑制作用。[方法] 以苋菜品种一点红为试材, 采用盆栽试验, 以醋酸铅配制土壤铅含量分别为0.1、0.2、0.4、0.8和1.6 mmol/kg干土, 不加铅为对照, 研究铅处理对苋菜生长、铅积累和活性氧代谢的影响。[结果] 播种45 d后, 铅胁迫(>0.4 mmol/kg)下苋菜的生长受到明显抑制, 其中根受到的抑制程度最高。铅胁迫明显增加了苋菜器官中铅的含量, 并主要积累在根部。随着铅处理浓度的增加, 成熟叶超氧阴离子产生速率加快, 过氧化氢含量、SOD和POD活性增加, CAT和APX活性降低, 氧阴离子产生速率、过氧化氢含量、MDA含量和细胞电解质渗漏增加。[结论] 铅胁迫引起苋菜活性氧代谢失衡, 过氧化作用加剧, 导致植物生长受阻。

关键词 铅胁迫; 生长分析; 活性氧; 抗氧化酶活性; 苋菜

中图分类号 S311 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)30-13029-03

Effects of Lead Stress on Active Oxygen Metabolism in Amaranth

YANG Min-ven et al. (Taizhou University, Linhai, Zhejiang 317000)

Abstract [Objective] The aim was to study the inhibition effects of lead (Pb) on plant growth. [Method] In the pot experiment, with amaranth variety Yipingred as test material, Pb in the form of $Pb(CH_3COO)_2$ was added to the soil for a series of soil Pb levels of 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 and 1.6 mmol/kg soil (dry weight), and treatment without adding Pb was regarded as control. The effects of lead treatment on the growth, lead accumulation and active oxygen metabolism of amaranth were studied. [Result] Forty-five days after amaranth seeds being sown, excess Pb (>0.4 mmol/kg) significantly reduced the dry weight of leaves, stems and roots of amaranth with the maximum depression in the roots, and significantly promoted Pb accumulation in amaranth organs. Moreover Pb was sequestered primarily in the roots. Along with Pb levels increased, superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities in the mature leaves increased significantly, while catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) activities decreased, accompanied by the increase in the contents of hydrogen peroxide (H_2O_2), superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$), malondialdehyde (MDA), and electrolyte leakage. [Conclusion] As a result of unbalance of active oxygen metabolism under Pb stress, peroxidation was aggravated. Finally, the growth of amaranth was significantly inhibited.

Key words Lead stress; Growth analysis; Active oxygen; Antioxidant enzyme activity; Amaranth

铅(Pb)是一种危害极大的环境污染物, 来源广泛, 如开矿和冶炼、燃煤、蓄电池企业排放的废水、汽车尾气、化肥和杀虫剂的使用、颜料的添加剂等。土壤中铅含量的增加对植物生长和代谢产生不利影响, 干扰植物对营养素的吸收和转运^[1], 引起生长阻滞^[2], 改变酶活性^[3], 扰乱呼吸作用^[4]和光合作用^[5], 促进活性氧的形成而导致氧化胁迫^[6]等。植物利用抗氧化系统以防御氧化损伤。抗氧化系统由过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶等酶类和抗坏血酸、还原型谷胱甘肽、维生素E等非酶性抗氧化剂组成。苋菜(Amaranthus tricolor L.)是一种广泛种植并深受人们喜爱的蔬菜, 对Pb具有较强的抗性^[7], 对Cu、Cd、Hg、As、Pb和Cr具有一定的富集能力^[8-10], 但有关Pb胁迫对苋菜生理代谢的影响少有报道。以土培苋菜幼苗为材料, 笔者研究不同水平Pb处理对苋菜生长和抗氧化酶活性的影响, 为苋菜种植和探讨Pb对植物毒害的生理机制提供依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料 供试苋菜品种为一点红(杭州良峰蔬菜种子有限公司生产), 种子购于浙江省临海市种子分公司。

1.2 试验方法 试验用土取自浙江省天台山华顶国家森林公园表层, 质地为黄壤土。土壤阴干、粉碎、过2 mm筛后装盆, 每盆装土1.3 kg。供试土壤中加入基础肥料(尿素0.1 g/kg干土, KH_2PO_4 0.2 g/kg干土)。经试验, 确定恰好浇透1盆土(没有多余水分沥出)所需的水量, 以5盆土用水量配制1个浓度梯度 $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ 溶液, 平均浇入5盆土中, 使加入土壤中Pb浓度分别达0.1、0.2、0.4、0.8和1.6

mmol/kg干土, 以未加Pb作为对照(CK)。稳定1周后, 倒出盆土, 单盆土样经充分混匀后再重新装盆。6月上旬, 苋菜种子经浓度0.5%NaClO消毒后均匀播于盆中, 每盆10颗, 保持土壤水分含量为最大相对含水量的80%。塑料盆完全随机摆放, 自然光照, 常规管理。幼苗长出1对真叶后间苗, 每盆保留5株。播种后45 d, 测定各项指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长分析。在土壤表面将植株剪断, 地上部分区分茎叶。茎叶洗净后105℃杀青10 min, 75℃烘干称重。从盆中取出整土, 用自来水小心冲刷土块, 收集苋菜全部根系, 双蒸水洗净, 烘干, 称重。根、茎和叶分别用XA-1型植物样品粉碎机粉碎, 过1 mm尼龙筛, 贮瓶用于元素分析。

1.3.2 铅含量测定。称植物样品0.2~0.5 g于消化管中, 加5 ml浓硝酸放置过夜, 放于控温式远红外消煮炉(LWY84B, 四平电子技术研究所)中, 90℃消煮30 min, 140℃消煮30 min, 180℃消煮30 min, 稍冷却, 加1 ml高氯酸, 180℃消煮120 min, 冷却后定容至50 ml, 2层滤纸过滤, 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 2100 DV, Perkin Elmer, USA)测定Pb含量。

1.3.3 活性氧代谢测定。按中国科学院植物生理研究所等介绍的方法^[11]测定超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率、丙二醛(MDA)含量、细胞电解质渗漏率和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。APX活性单位(U)用每小时消耗的抗坏血酸微摩尔数表示。超氧化物歧化酶(SOD)活性用NBT法测定^[12], 以单位时间内抑制氮蓝四唑光化还原50%为1个酶活性单位(U)。过氧化氢含量的测定采用林植芳等介绍的方法^[13]。采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性^[14], 以每分钟 A_{470} 变化值表示酶活性大小。过氧化氢酶(CAT)活性采用比色法测定^[15], 以每分钟 A_{240} 的变化值表示酶活力大小。不

基金项目 浙江省自然科学基金资助项目(Y504256)。

作者简介 杨敏文(1965-), 女, 浙江台州人, 硕士, 副教授, 从事污染生态学方面的研究。

收稿日期 2008-07-23

同处理各取5片,第3片成熟叶(顶部下数)进行测定。

1.4 数据分析 用DPS软件对数据进行方差分析(ANOVA), $P < 0.05$ 表示处理间差异显著。数据均为5个重复的平均值 \pm 标准误。

表1 铅处理下苋菜植株干重

Table 1 Dry weight of amaranth under Pb treatments g/株

| 铅浓度 mmol/kg | 叶片 | 茎 | 根系 | 整株 |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Pb concentration | Leaf | Stem | Root | Whole plant |
| 0 (CK) | 1.26 \pm 0.09 | 0.78 \pm 0.04 | 0.51 \pm 0.04 | 2.55 \pm 0.10 |
| 0.1 | 1.37 \pm 0.07 | 0.84 \pm 0.04 | 0.52 \pm 0.04 | 2.73 \pm 0.14 |
| 0.2 | 1.24 \pm 0.06 | 0.79 \pm 0.04 | 0.46 \pm 0.05 | 2.49 \pm 0.13 |
| 0.4 | 1.19 \pm 0.10* | 0.65 \pm 0.05* | 0.29 \pm 0.02* | 2.13 \pm 0.15* |
| 0.8 | 1.16 \pm 0.06* | 0.54 \pm 0.04* | 0.27 \pm 0.04* | 1.97 \pm 0.16* |
| 1.6 | 1.04 \pm 0.09* | 0.46 \pm 0.04* | 0.21 \pm 0.03* | 1.71 \pm 0.10* |

注: * 表示铅处理与对照间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: * mean significant differences ($P < 0.05$) between control and Pb treatment. The same as follows.

2 结果与分析

2.1 铅处理对苋菜生长的影响 由表1可知,不同浓度铅处理没有对苋菜生长产生形态上可见的明显毒害作用(如萎黄症和枯死等),植株生长较正常,但对苋菜生物量产生了明显影响。在外加0.1~0.2 mmol/kg Pb处理下,苋菜叶片、茎、根和整株干重变化不大,但随着铅处理浓度的继续增加,植株各器官干重显著降低($P < 0.05$);在外加1.6 mmol/kg Pb处理下,苋菜叶片、茎、根和整株干重比对照(CK)分别降低了

17.5%、41.0%、58.8%和32.9%,其中根的生物量降低幅度最大。

2.2 铅处理对苋菜不同器官铅含量的影响 由表2可知,苋菜根、茎、叶各器官的铅含量随铅处理浓度的增加而急剧增加($P < 0.05$)。植物吸收的铅大部分积累在根部,茎和叶中铅的含量相对较低($P < 0.05$)。当铅处理浓度为0.1 mmol/kg时,叶和茎铅含量分别达对照的10.7和18.2倍;当铅处理浓度达到1.6 mmol/kg时,根中铅的含量分别比茎、叶高6.9和30.7倍。

表2 铅处理下苋菜不同器官铅含量

Table 2 Pb content in amaranth organs under Pb treatments ng/kg

| 铅浓度 mmol/kg | 叶片 | 茎 | 根系 |
|------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Pb concentration | Leaf | Stem | Root |
| 0 (CK) | 0.19 \pm 0.02 | 0.24 \pm 0.02 | 0.89 \pm 0.06 |
| 0.1 | 2.04 \pm 0.20* | 4.37 \pm 0.35* | 15.14 \pm 1.82* |
| 0.2 | 6.00 \pm 0.48* | 13.33 \pm 1.07* | 79.43 \pm 8.74* |
| 0.4 | 8.50 \pm 0.68* | 39.98 \pm 4.80* | 162.18 \pm 13.21* |
| 0.8 | 13.16 \pm 1.18* | 61.28 \pm 5.74* | 436.52 \pm 34.926* |
| 1.6 | 21.93 \pm 2.51* | 97.31 \pm 7.78* | 674.17 \pm 74.16* |

2.3 铅处理对苋菜叶片超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量的影响 图1表明,在0.2 mmol/kg铅处理下,叶片超氧阴离子产生速率明显增大,并随铅处理浓度的增加而快速上升;过氧化氢含量则在0.4 mmol/kg铅处理下才明显升高。在1.6 mmol/kg铅处理下,叶片超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量分别为对照的3.84和4.81倍。

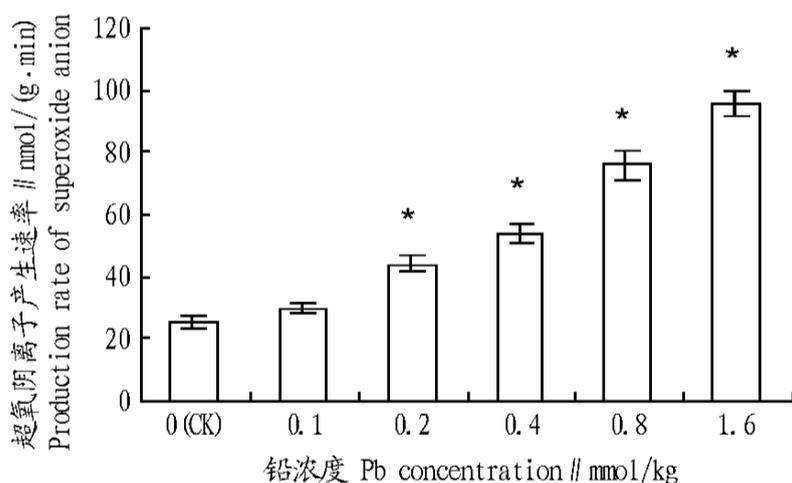


图1 铅处理下叶片超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量

Fig.1 Production rate of superoxide anion and content of hydrogen peroxide in the leaves under Pb treatments

2.4 铅处理对苋菜叶片丙二醛含量和电解质渗漏的影响 图2表明,在0.4 mmol/kg铅处理下,叶片丙二醛含量和电解质渗漏发生明显变化,并随着铅处理水平的提高而增大;在

1.6 mmol/kg铅处理下,叶片丙二醛含量和电解质渗漏率分别比对照高3.3和1.7倍。这表明在较高水平铅胁迫下叶片产生了氧化胁迫,导致膜脂过氧化加剧,膜透性增强。

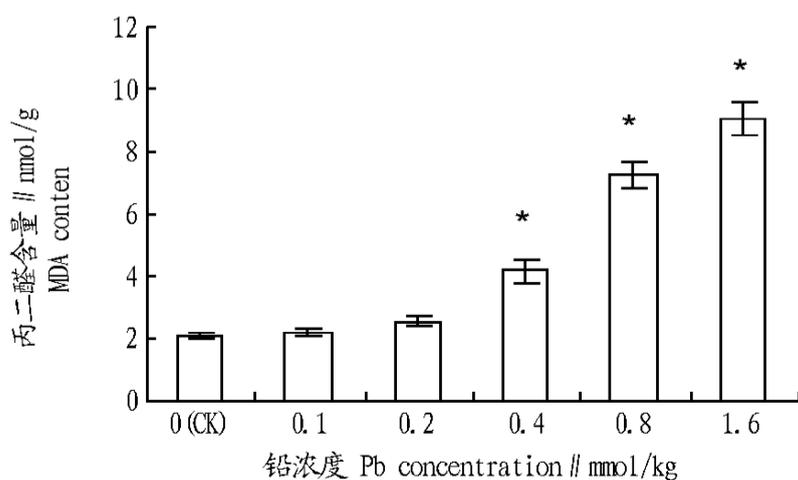


图2 铅处理下叶片丙二醛含量和电解质渗漏

Fig.2 MDA content and electrolyte leakage in the leaves under Pb treatments

2.5 铅处理对苋菜叶片抗氧化酶活性的影响 图3表明,

在不同水平铅处理下,叶片4种抗氧化酶活性的变化有一定

差异。0.2 mmol/kg 以上水平铅处理使叶片 SOD 活性明显上升,但在 1.6 mmol/kg 铅处理下 SOD 活性稍有降低;0.4 mmol/kg 以上水平铅处理使 POD 活性明显上升,并伴随着明显的处理剂量效应;在 0.4 mmol/kg 铅处理下,CAT 活性达到

最大值,而在 1.6 mmol/kg 铅处理下,CAT 活性显著低于对照 ($P < 0.05$);APX 活性在不同浓度铅处理下的变化规律与 CAT 相似,但在 1.6 mmol/kg 铅处理下 APX 活性与对照差异不大。

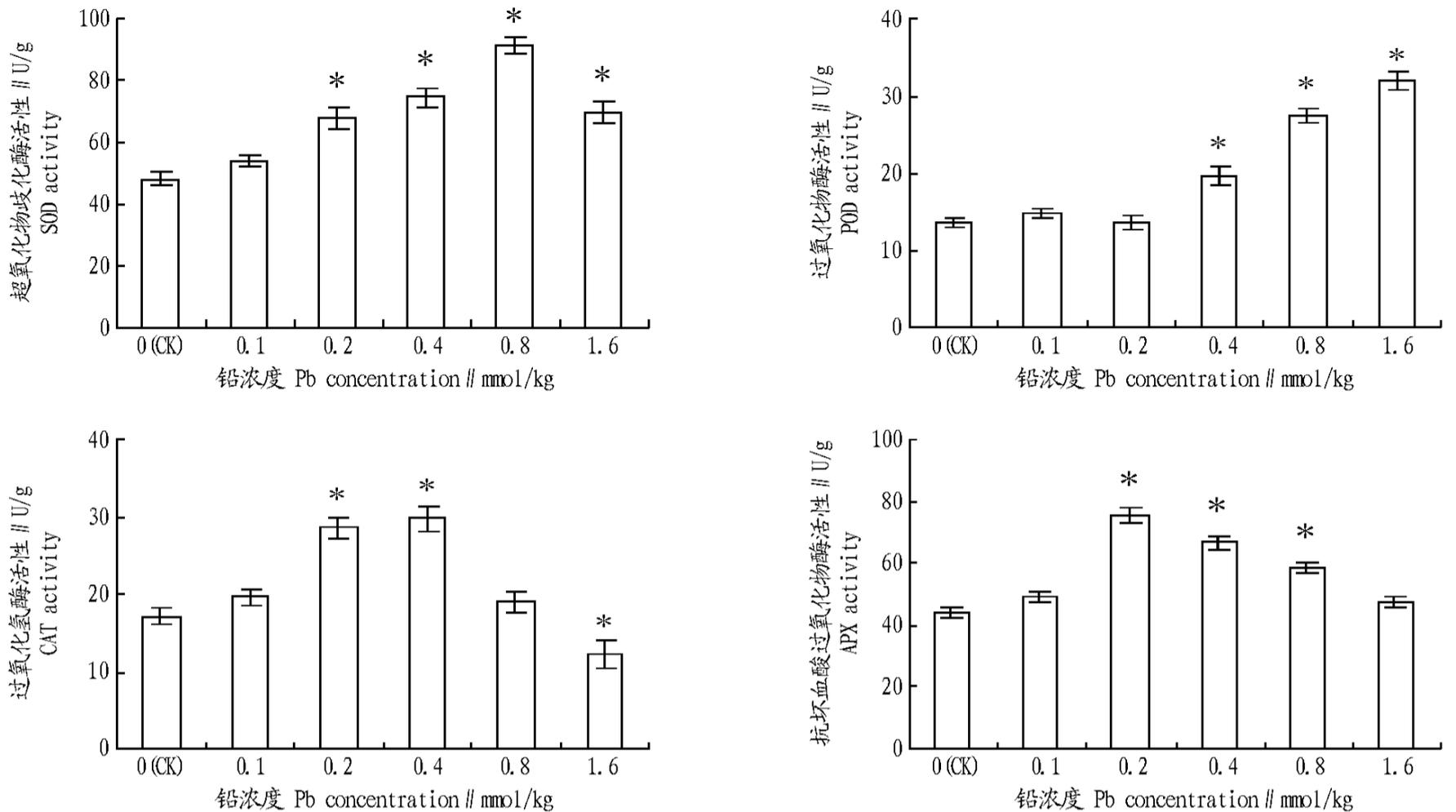


图3 铅处理下叶片抗氧化酶活性

Fig. 3 Antioxidases activities in the leaves under Pb treatments

3 结论与讨论

研究表明,较高浓度(> 0.4 mmol/kg)铅处理明显抑制苋菜的生长,降低植株干物质积累,其中根受到的影响最大。植物根的生长通常比其他器官更易受铅的毒害作用。这与根作为植物从污染土壤中摄取铅的最初部位并大量积累有关^[2]。土壤铅污染明显促进苋菜根、茎、叶中铅的积累。土壤中施加0.1 mmol/kg 铅时,叶片和茎(均为可食用部分)中铅含量增加到对照的10.7和18.2倍。我国国家标准《食品中污染物限量》(GB2762-2005)规定,叶菜类蔬菜中铅限量为0.3 ng/kg。苋菜对铅的抗性较强,在铅污染土壤中种植苋菜供食用存在较高的安全风险。在该研究条件下,苋菜根中铅的含量是叶中7~30倍,是茎中3~7倍。对其他植物的研究也得到相似的含量差异,如在铅胁迫下,玉米(*Zea mays*)根中铅含量高于枝叶15倍^[16],豇豆(*Vigna unguiculata*)中的差异为10~50倍^[17]。尽管引起植物根和枝叶中铅含量差异如此之大的原因现在还不明确,但有些研究认为,内皮层是铅在根部进行横向运输的屏障,因此限制了铅向地上部分的运输,导致铅在根部的积累^[18]。然而,内皮层作为铅质外体运输的屏障,也应像阻止铅那样有效地阻止镉、锌和其他重金属的质外体运输,但镉和锌等能进入根的中柱并在地上部分大量积累^[19]。因此,在防止铅迁移到植物地上部分的过程中,植物对铅的其他排斥机制可能起着更重要的作用,如铅可能被细胞壁中带负电荷的果胶吸附而固定,在细胞壁或细胞间隙中因形成不溶性的盐而沉淀,或者在通过细胞膜后贮存在皮层细胞液泡。

植物生长受重金属抑制也与其在氧化胁迫下的生理变化有关^[3]。抗氧化酶如SOD、POD和CAT等能清除代谢产生的活性氧。在植物正常生长时,它们彼此协调,使体内活性氧维持在一个较低的平衡状态。当处于胁迫时,植物体内活性氧产生和清除的平衡遭到破坏,从而加速活性氧的积累,影响植物的正常生长。因此,对活性氧的清除能力是决定细胞胁迫抗性的关键因素。包括铅在内的许多重金属都可以提高植物体内抗氧化酶的活性^[3]。在0.4 mmol/kg 铅处理下,苋菜叶片超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量明显增加,SOD、POD、CAT和APX活性明显升高。随着铅处理浓度的继续升高,叶片SOD和POD活性增大,但CAT和APX活性降低,可能是超氧阴离子浓度的增加抑制了CAT活性^[20],而CAT在分解 H_2O_2 中起着关键作用。较高浓度铅处理下APX活性降低,可能与此时抗坏血酸含量降低有关^[21]。POD的作用具有双重性。一方面,POD能催化 H_2O_2 与其他底物进行氧化反应而被清除;另一方面,POD又能催化超氧阴离子和 H_2O_2 转变为羟自由基而加重过氧化作用, H_2O_2 是这种转变的限速底物^[22]。铅胁迫下苋菜叶片CAT和APX活性降低,而POD活性上升,可能导致羟自由基增多,引起叶片膜脂过氧化加剧,使得MDA含量增加,细胞电解质渗漏加重,细胞膨压降低。这可能是苋菜生长受阻的一个重要原因。

参考文献

- [1] GOPAL R, RIZM A H. Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish[J]. *Cenosphere*, 2008, 70: 1539-1544.
- [2] UVEGES J L, CORBETT A L, MAL T K. Effects of Pb contamination on the growth of *Lythrum salicaria*[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120: 319-323.

而高浓度的稀土或稀土配合物与镉共同作用于绿豆幼苗时对幼苗的生长有毒害作用,阻碍植物碳水化合物的代谢。

总体而言,第8天的绿豆幼苗可溶性糖绝对含量比第4天有所降低,原因可能是随胁迫时间的延长,镉在植物体内蓄积到一定程度,破坏了植物光合作用系统,阻碍了植物碳水化合物在体内的合成代谢,从而降低了可溶性糖的含量。

3 结论与讨论

10 ng/L 镉作用后,绿豆幼苗生长明显受到抑制,出现叶片变黄、褪绿现象,最终导致可见损伤出现,这是植物受重金属毒害后出现的普遍现象^[19]。和空白CK对比,其叶绿素含量、可溶性蛋白含量,NR 活性下降,可溶性糖含量上升。

经La 及La(POA)₃ 后,对幼苗镉胁迫缓解作用明显,提高可溶性糖、叶绿素、可溶性蛋白含量、NR 活性,促进植物碳水化合物、氮素代谢,促进光合作用及促使活性氧清除系统中的酶发挥应有的作用,使与此相关的生理活动能够协调进行。在胁迫处理后的第4天和第8天,缓解胁迫作用逐渐下降,这可能与镉在植物体内蓄积程度有关,进而阻碍植物正常生理代谢。一定浓度(10、15、30 ng/L) La(POA)₃ 对胁迫的缓解作用随胁迫时间的延长而优于镉,这可能与La(POA)₃ 在植物中富积需要时间有关,前人也有试验证明植物对稀土配合物的吸收量远大于稀土盐^[20]。较低浓度(10~50 ng/L)的稀土或稀土配合物对植物的镉胁迫缓解作用明显,浓度低于100 ng/L的配合物一般可以使植物正常生长,且对镉胁迫有不同程度的缓解,高浓度(100 ng/L)则抑制植物生长。

目前,稀土配合物对植物生长及胁迫缓解研究较少,其作用机理有待于进一步试验验证。

参考文献

[1] 陈志良,莫人伦,仇荣亮. 镉污染对生物有机体的危害及防治对策[J].

(上接第13031页)

- [3] QURESH MI, ABIN MZ, QADR S, et al. Lead-induced oxidative stress and metabolic alterations in *Cassia angustifolia* Vahl[J]. *Biologia Plantarum*, 2007, 51:121-128.
- [4] ROMANOWSKA E, IGAMBERDEV A U, PARYS E, et al. Simulation of respiration by Pb²⁺ in detached leaves and mitochondria of C₃ and C₄ plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116:148-154.
- [5] RULEY A T, SHARMA N C, SAH S V, et al. Effects of lead and chelates on growth, photosynthetic activity and Pb uptake in *Sesbania drummondii* grown in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144:11-18.
- [6] LIUD, LI T Q, YANG X E, et al. Effect of Pb on leaf antioxidant enzyme activities and ultrastructure of the two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55:68-76.
- [7] 吴晓,熊治廷. 不同品种苋菜对铅抗性的研究[J]. 武汉大学学报:理学版, 2005, 51(S2):294-296.
- [8] 柯世省. 铜对苋菜幼苗光合参数和活性氧代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(5):1317-1325.
- [9] 黄昀,刘光德,李其林,等. 农产品对土壤中重金属的富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6):285-289.
- [10] 杜应琼,何江华,陈俊坚,等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1):51-55.
- [11] 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [12] GIANNOPOLITIS C N, RES S K. Superoxide dismutase II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59:315-318.
- [13] 林植芳,李双顺,林桂珠,等. 衰老叶片和叶绿体中H₂O₂的累积与膜

- 环境保护科学, 2001(4):37-39.
- [2] 倪嘉騫. 稀土生物无机化学[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [3] 王宪泽. 农用稀土的效果、影响因素及其作用的生理基础[J]. 稀土, 1994, 15(1):47-49.
- [4] 曾路生,廖敏. 镉污染对水稻土微生物量、酶活性及水稻生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2162-2167.
- [5] ANGLIER L. On the antitumor activity of gallium and lanthanides[J]. *J. Aereimforsch*, 1975, 25:793-795.
- [6] 张丽霞,梁利芳,莫乙娟,等. 稀土-苯氧乙酸二元、三元配合物的表征及其对植物铅、镉污染的影响[J]. 稀土, 2006, 27(2):66-69.
- [7] 周青,黄晓华. La对Pb伤害大豆幼苗的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(1):22-25.
- [8] 周青,黄晓华,彭方晴,等. 镧-甘氨酸配合物对镉伤害小白菜的影响[J]. 环境科学, 1999, 20(1):91-94.
- [9] 金进,叶亚新,许明霞,等. 镧对铅胁迫下小麦生理指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(12):2260-2262.
- [10] 中科院上海植物生理研究所,上海植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1995:95.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2001:112-115.
- [12] 萧浪涛,王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:53-57.
- [13] 王品英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:75-77.
- [14] 杨居荣,贺建群,黄翌,等. 农作物Cd耐性的种类和种间差异 种间差[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2):192-196.
- [15] 魏正贵,张惠娟,李辉信,等. 稀土元素超积累植物研究进展[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(1):21-32.
- [16] ZHANG Y X. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare*[J]. *Acta Sci Circunstantiae*, 1997, 17(2):199-201.
- [17] 贺志理,王洪春. 盐胁迫下苜蓿中盐蛋白的诱导产生[J]. 植物生理与分子生物学报, 1991(1):71-79.
- [18] LIUF R, CHENHY, LIUY, et al. Changes in soluble content of different genotypes under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1):99-104.
- [19] 周青,黄晓华,张剑华,等. 稀土配合物对大豆幼苗防护效应实验[J]. 上海环境科学, 1998, 17(5):16-17.
- [20] 聂呈荣,黎振兴. 稀土对花生光合作用和氮素代谢的影响[J]. 广东农业科学, 1996(5):25-27.

脂过氧化物的关系[J]. 植物生理学报, 1988, 14(1):16-22.

- [14] WU Y X, VON TIEDEMANN A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116:37-47.
- [15] TRKAN I, BOR M, ZDEMIR F, et al. Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress[J]. *Plant Science*, 2005, 168:223-231.
- [16] MALKOVSKI E, KITA A, GALAS W, et al. Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium[J]. *Plant Growth Regulation*, 2002, 37:69-76.
- [17] KOPTTKE P M, ASHER C J, KOPTTKE R A, et al. Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150:280-287.
- [18] SEREGINI V, IVANOV V B. Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 1997, 44:791-796.
- [19] TANHAN P, KRUAIRACHUE M, POKETHIYOOK P, et al. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Sam weed (*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson) [J]. *Chemosphere*, 2007, 68:323-329.
- [20] SALIN M L. Toxic oxygen species and protective systems of the chloroplast[J]. *Physiologia Plantarum*, 1988, 72:681-689.
- [21] DEMIREVSKA KEPOVA K, SIMOVA STOILOVA L, STOYANOVA Z, et al. Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52:253-266.
- [22] DRAZKIEWICZ M, SKORZYNSKA POLIT E, KRUPA Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Bonitas*, 2004, 17:379-387.