

重金属铅镉胁迫对芋生长发育和产量的影响

熊春晖^{1,2}, 卢永恩¹, 欧阳波¹, 夏军辉¹, 张余洋^{1*}, 李汉霞¹

(1.华中农业大学园艺植物生物学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2.江西省赣州市农业科学研究所, 江西 赣州 341000)

摘要:采用盆栽试验研究了0(对照)、500、1 000、1 500、2 000 mg·kg⁻¹和2 500 mg·kg⁻¹ 6个浓度的铅(Pb)与0(对照)、0.5、1.0、1.5、2.0 mg·kg⁻¹和2.5 mg·kg⁻¹ 6个浓度的镉(Cd)溶液分别处理土壤对芋生长发育和产量的影响。结果表明,Pb胁迫抑制芋植株的生长,株高最大低于对照25.3%,对芋叶长、叶宽的影响不显著;而Cd浓度在1.0 mg·kg⁻¹以上显著促进了植株的生长,株高最大高于对照42.1%,最大叶长高于对照60.1%,最大叶宽高于对照60.9%。在1 000 mg·kg⁻¹和1 500 mg·kg⁻¹ Pb胁迫下,叶绿素含量显著高于对照,浓度大于1.0 mg·kg⁻¹时Cd胁迫显著高于对照;Pb胁迫MDA含量同比对照显著增加,最大增加了60.8%,Cd胁迫仅在1.0 mg·kg⁻¹显著高于对照45.4%。Pb胁迫可溶性糖含量先升后降,1 000 mg·kg⁻¹时显著高于对照40.6%,Cd胁迫时呈上升趋势,最大高于对照33.5%;Pb胁迫可溶性蛋白呈上升趋势,最大高于对照144.0%,Cd胁迫时先上升后下降,1.5 mg·kg⁻¹时显著高于对照37.0%;Pb、Cd胁迫均使SOD活性下降,最大下降幅度分别为37.8%和60.0%,使POD和CAT活性增强,POD最大增强幅度分别为119%和78.7%,CAT最大增强幅度分别为298.5%和65.5%。Pb或Cd胁迫均导致芋产量明显下降,最大下降分别为53.6%和56.5%。

关键词:芋;铅;镉;生长发育;生理生化;产量

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)06-0560-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0130

引用格式:

熊春晖, 卢永恩, 欧阳波, 等. 重金属铅镉胁迫对芋生长发育和产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 560-567.

XIONG Chun-hui, LU Yong-en, OUYANG Bo, et al. Effects of Pb or Cd Stress on the Development, Growth and Yield of Taro[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 560-567.

Effects of Pb or Cd Stress on the Development, Growth and Yield of Taro

XIONG Chun-hui^{1,2}, LU Yong-en¹, OUYANG Bo¹, XIA Jun-hui¹, ZHANG Yu-yang^{1*}, LI Han-xia¹

(1. Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Ganzhou Institute of Agricultural Science, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The aim of the study is to investigate the effects of heavy metal, Pb or Cd, on development, growth and yield of taro by pot culture under different concentrations (0, 500, 1 000, 1 500, 2 000 mg·kg⁻¹ and 2 500 mg·kg⁻¹ Pb or 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mg·kg⁻¹ and 2.5 mg·kg⁻¹ Cd). The results showed that the growth was inhibited under Pb stress and the height was 25.3% lower than the control, but was promoted at more than 1.0 mg·kg⁻¹ Cd stress, and the biggest plant height, leaf length and leaf width was 42.1%, 60.1% and 60.9% higher than the control, respectively. The chlorophyll content under 1 000 mg·kg⁻¹ and 1 500 mg·kg⁻¹ Pb was significantly higher than the control, and chlorophyll content under more than 1.0 mg·kg⁻¹ Cd was higher than the control. The content of MDA under Pb stress increased significantly with the peak value 60.8% higher than control, and MDA only under 1.0 mg·kg⁻¹ Cd stress was 45.4% higher than the control. The soluble sugar increased and then decreased under Pb stress, which was 40.6% higher than the control under 1 000 mg·kg⁻¹ Pb stress. The soluble sugar under Cd stress increased up to a peak value of 33.5% higher than the control. The content of soluble protein under Pb stress increased significantly with the peak value of 144.0% higher than the control. Under Cd stress, however, soluble proteins increased and then decreased with a peak value of 37% higher than control under 1.5 mg·kg⁻¹ Cd. The activity of SOD declined remarkably under either Pb or Cd stress, leading to a least value of 37.8% and 60.0% lower than the control, respectively. The activity of POD and CAT was enhanced under Pb and Cd stress. The peak value of POD activity under Pb and Cd stress was 119.0% and 78.0% higher than the control, respectively. The peak val-

收稿日期:2016-05-14

基金项目:公益性行业(水生蔬菜)科研专项(200903017-08-02);中央高校基本科研业务费专项资金(2662015PY225);国家重点研发计划项目(2016YFD0100204-21);国家自然科学基金(31672166)

作者简介:熊春晖(1986—),男,江西丰城人,硕士,主要从事蔬菜栽培与育种相关工作。E-mail:272804283@qq.com

*通信作者:张余洋 E-mail: yzhang@mail.hzau.edu.cn

ue of CAT activity was 299.4% and 64.1% higher than control respectively. In addition, Pb or Cd stress had an obvious negative effect on the yield of taro, which decreased to 53.5% and 56.5% of the control, respectively.

Keywords: taro; lead; cadmium; development and growth; physiology and biochemistry; yield

铅(Pb)、镉(Cd)等重金属元素是危害性极大的环境污染物,目前尚未有证据证明它们对植物的生长发育起着必需的作用。许多研究表明,Pb、Cd等对植物的生长发育具有毒害作用。Pb、Cd均能抑制种子萌发和幼苗的生长^[1-2]。Pb能阻止植物根和茎的伸长以及叶片的扩展^[3-4],引起豌豆根、内皮层细胞壁以及皮层薄壁组织木质化的径向增厚而导致畸形^[5]。Cd能阻止植株对营养元素(如Ca、Mg、P、K等)的吸收和运输^[6-7]。高浓度的Cd胁迫使植物表现出明显的黄化现象,根尖变成棕褐色,严重抑制植物的生长,甚至引起死亡^[8-9]。Pb、Cd等重金属通过改变细胞膜的渗透性、流动性、蛋白和脂质等的成分^[10]以及膜相关酶活性^[11]来破坏细胞膜的功能,导致一系列的生理生化过程紊乱,严重时导致植株死亡。

芋(*Colocasia esculenta* L. Schott)是一种具备水生植物特性的蔬菜作物,具有发达的维管束组织,可以大量累积重金属元素,进而影响芋的食用安全^[12]。目前,很少有关于重金属对芋生长发育影响的研究。在本试验中,分别设置了0(对照)、500、1 000、1 500、2 000 mg·kg⁻¹和2 500 mg·kg⁻¹ 6个不同浓度梯度的Pb和0(对照)、0.5、1.0、1.5、2.0 mg·kg⁻¹和2.5 mg·kg⁻¹ 6个不同浓度梯度的Cd处理土壤,研究了Pb或Cd胁迫对芋株高、叶长和叶宽以及光合作用的影响,并测定了MDA、可溶性糖、可溶性蛋白、SOD、POD和CAT等生理指标以及产量,试图了解Pb或Cd在芋累积可能产生的危害,为芋的安全生产实践提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料及其处理

试验材料为武芋2号,由武汉蔬菜科学研究所提供。

在武汉市武昌区华中农业大学国家蔬菜改良中心华中分中心(北纬30°28'44.69",东经114°21'46.48")进行盆栽试验,在相同大小的水缸(直径×高=70 cm×50 cm)中装入风干菜园土(pH<6.5,土壤背景值Pb为27.75 mg·kg⁻¹,Cd为0.28 mg·kg⁻¹)60 kg、复合肥150 g,并施入少许多菌灵,暴晒若干日杀菌。根据国标《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)对蔬菜产地土壤

环境质量要求,以Pb(NO₃)₂和CdCl₂·2.5H₂O为配体,配额土壤中Pb²⁺和Cd²⁺的胁迫浓度分别为0(对照)、500、1 000、1 500、2 000 mg·kg⁻¹和2 500 mg·kg⁻¹和0(对照)、0.5、1.0、1.5、2.0 mg·kg⁻¹和2.5 mg·kg⁻¹,并作3次重复,土壤中各浓度梯度相应检测的Pb浓度分别为27.75(对照)、365.28、661.23、826.06、1 378.85、1 858.80 mg·kg⁻¹(国家标准是250 mg·kg⁻¹)Cd浓度分别为0.28(对照)、0.82、1.40、1.88、2.49、3.47 mg·kg⁻¹(国家标准是0.3 mg·kg⁻¹)。

1.2 样品的采集

于2012年5月10日把经过温室催芽育苗(苗高25 cm左右)的芋苗栽于水缸中,每缸种植2株,浇水至土壤湿透,并施入少许多菌灵对土壤进行消毒灭菌,进行常规管理。于2012年6月中旬(发棵期)测定每个芋缸中母芋株高和每个芋缸中10片叶片的叶长和叶宽,并取叶片用液氮保存后供各生理指标的测定;10月底(采收期)计算总产量。

1.3 项目测定及方法

采用国际标准米尺进行测量,其中株高为芋主茎最大值,叶长和叶宽为多个叶位的平均值。

参照王学奎^[13]的报道,叶绿素以95%酒精提取,MDA以硫代巴比妥酸提取,可溶性糖以蒽酮比色法提取,可溶性蛋白以G-250考马斯亮蓝提取,SOD以氮蓝四唑还原法测定,POD以愈创木酚法测定,CAT以紫外吸收法测定。

1.4 统计分析

数据由SPSS13.0和DPS进行统计分析,数据处理和作图采用Microsoft Office Excel 2003和Sigmaplot 12.0。

2 结果与分析

2.1 Pb、Cd胁迫对芋株高的影响

随着土壤中外施Pb浓度的升高,芋的株高呈波动下降的趋势(图1),其中在500、1 500 mg·kg⁻¹和2 500 mg·kg⁻¹ Pb时差异显著,芋的株高分别低于对照25.5%、20.6%和18.9%,而其他两个浓度处理间差异不显著;随着土壤中外施Cd浓度的升高,芋植株呈现上升的趋势,与对照差异性显著,在2.0 mg·kg⁻¹时最大,高于对照56.3%,总体表现为:Pb胁迫抑

制芋植株生长,而 Cd 则表现了促进作用。

2.2 Pb、Cd 胁迫对芋叶长和叶宽的影响

从图 2、图 3 中可知,随着土壤中外施 Pb 浓度的升高,芋的叶片比对照有明显减小,除 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 时叶长、 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 和 $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 时叶宽与对照差异不明显外,其他浓度 Pb 处理都有显著差异,在 $500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 胁迫下叶长、叶宽降至最低水平,分别比对照低出 31.5% 和 34.7%;随着土壤中外施 Cd 浓度的升高,芋叶长和叶宽呈上升趋势,除在 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫时差异不明显外,其他浓度 Cd 处理与对照差异性显著,最大叶长和叶宽分别高于对照 64.5% (在 $1.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫时) 和 60.9% (在 $1.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫时)。总体表现为: Pb 呈现出抑制作用,而 Cd 则为促进作用。

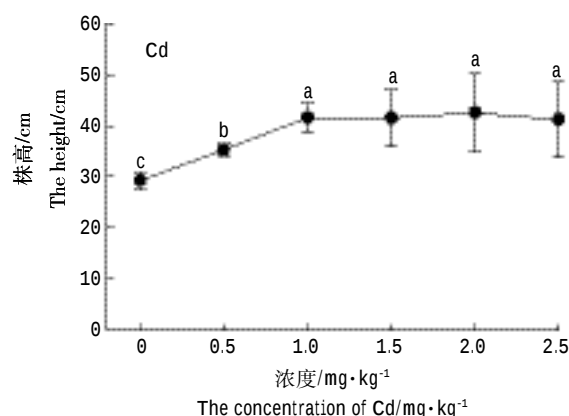
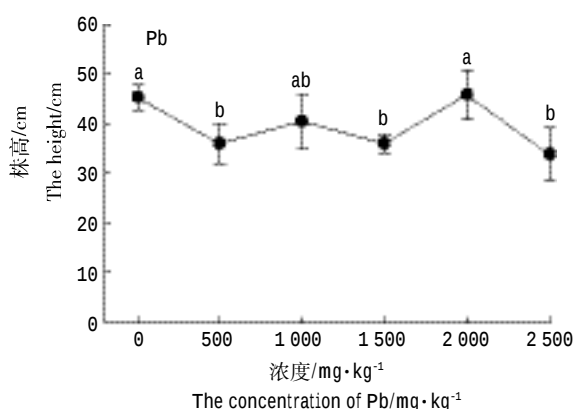
2.3 Pb、Cd 胁迫对芋光合作用的影响

随着土壤中 Pb 含量的升高,叶绿素含量呈倒 U

字型变化(图 4)。在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 和 $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 时都显著高于对照,其中在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 时,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别比对照高出 33.6%、32.3% 和 33.2%;在 $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 时分别高出对照 35.0%、38.1% 和 35.7%,但随着 Pb 浓度的升高又趋于平缓,各处理间差异并不明显。当外施 Cd $\geq 1.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,叶绿素含量同比对照显著增加,其中在 $2.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫时最大,最大叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别高出对照 38.6%、91.4% 和 52.3%。

2.4 Pb、Cd 胁迫对芋叶片中 MDA 含量的影响

随着土壤中 Pb 浓度的上升,芋中 MDA 含量呈上升趋势(图 5),除 $2\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 外,其他处理都显著高于对照,在 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb 胁迫时,MDA 含量最大,高出对照 60.8%。随着土壤中 Cd 浓度的提高,芋中 MDA 含量也呈上升的趋势,仅当浓度达到



图中的小写字母表示 0.05 水平上差异显著,下同

Different letters indicate the significant difference at $P<0.05$ level. The same as below

图 1 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期株高的影响

Figure 1 Effects of Pb or Cd stress on the plant height in the seeding stage of taro

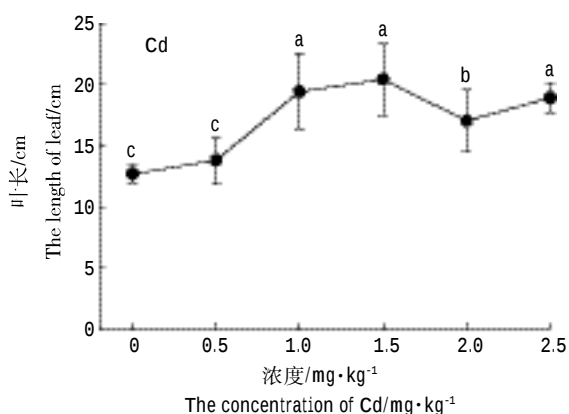
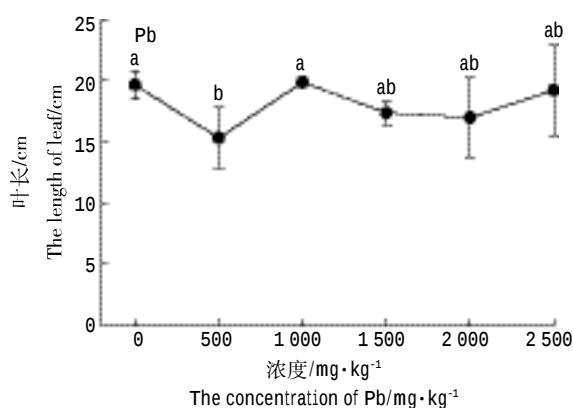


图 2 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期叶长的影响

Figure 2 Effects of Pb or Cd stress on the length of leaf in the seeding stage of taro

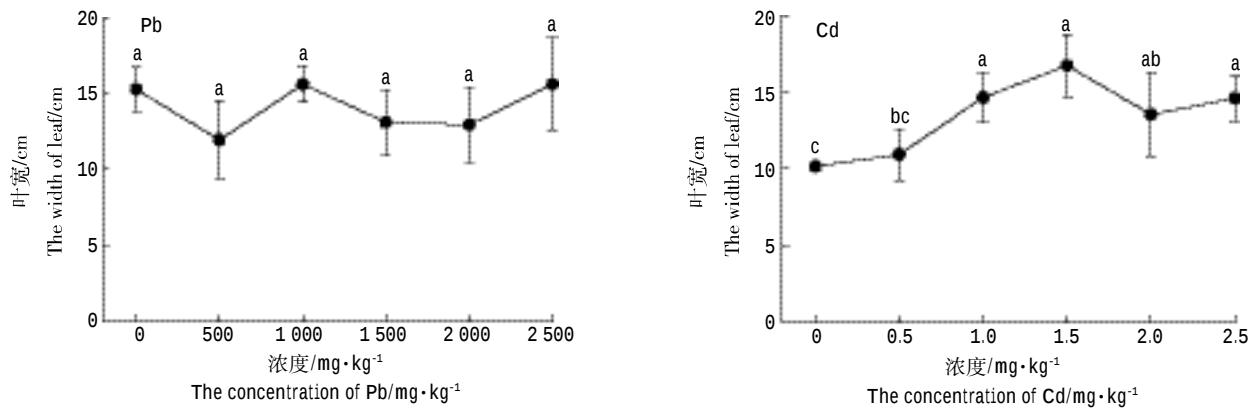


图 3 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期叶宽的影响

Figure 3 Effects of Pb or Cd stress on the width of leaf in the seeding stage of taro

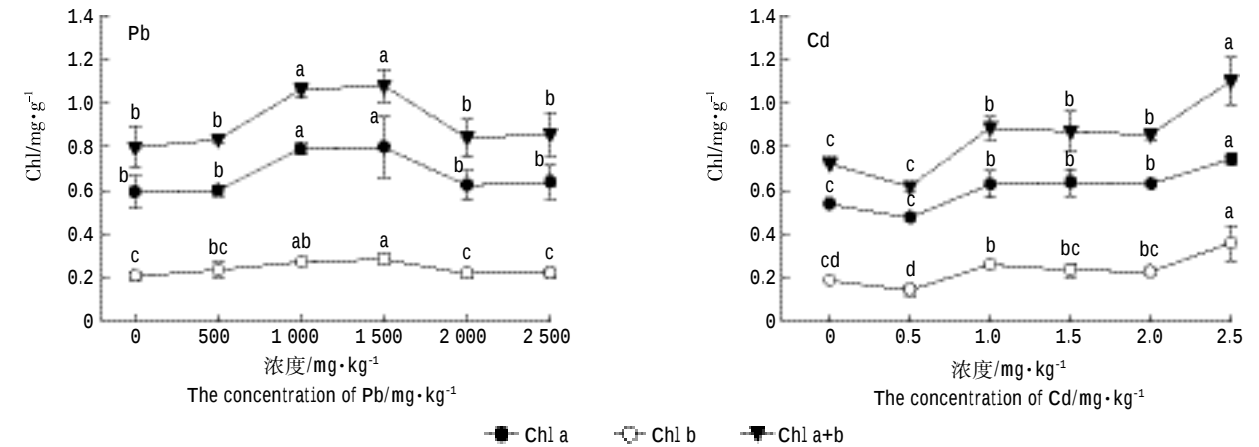


图 4 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期叶绿素含量的影响

Figure 4 Effects of Pb or Cd stress on the contents of chlorophyll in taro seeding

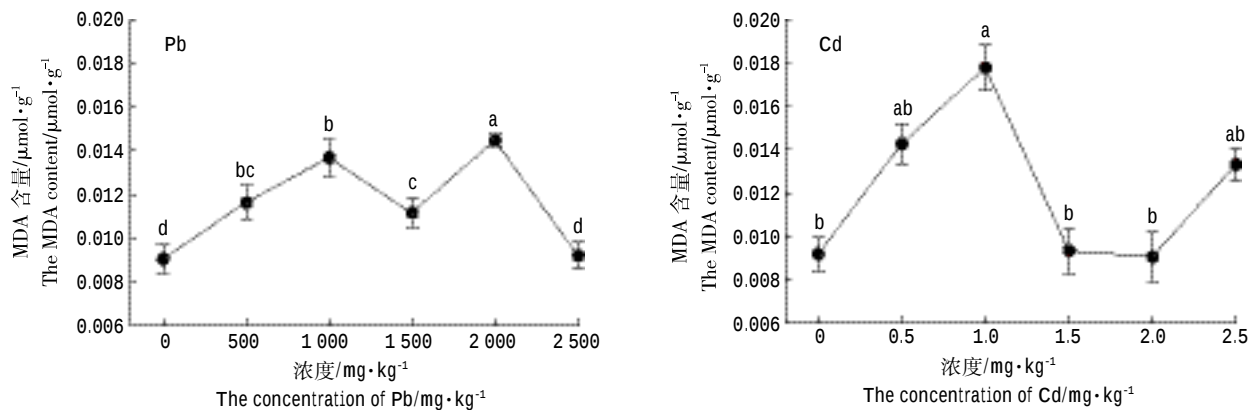


图 5 土壤中 Pb、Cd 胁迫对发棵期叶片 MDA 含量的影响

Figure 5 Effects of Pb or Cd stress on the MDA contents in leaves in the seeding stage of taro

1.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,MDA 含量比对照高出 45.4%,其他处理差异不显著。

2.5 Pb、Cd 胁迫对芋叶片中可溶性糖含量的影响

随着土壤中 Pb 浓度的上升,芋中可溶性糖含量先上升后下降(图 6),当浓度为 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 时达

到最大,比对照高出 40.6%;随着土壤中 Cd 浓度上升,芋可溶性糖含量整体呈上升趋势,在 1.0、1.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 2.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫时分别显著高出对照 25.0%、16.4%和 33.5%,其他差异不显著时达到最大,比对照高出 33.5%。

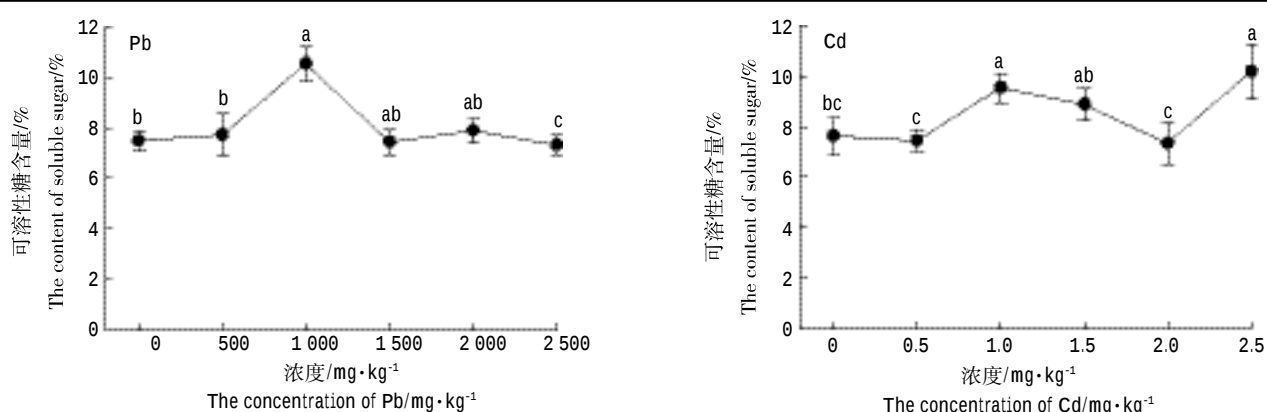


图 6 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期叶片可溶性糖含量的影响

Figure 6 Effects of Pb or Cd stress on the content of soluble sugar in leaves in the seeding stage of taro

2.6 Pb、Cd 胁迫对芋叶片中可溶性蛋白含量的影响

随着土壤中 Pb 浓度的上升,芋中可溶性蛋白的含量呈上升趋势(图 7),不同浓度 Pb 处理显著提高可溶性蛋白的含量,在 $2\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 胁迫时达到最大,比对照高出 144.0%;随着土壤中 Cd 浓度的上升,芋中可溶性蛋白含量呈先上升后下降趋势,当浓

度为 $1.5\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大,比对照高出 37.0%。

2.7 Pb、Cd 胁迫对芋叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

随着土壤中 Pb 或 Cd 浓度的升高,芋 SOD 活性整体呈下降趋势(图 8),当 Pb 浓度为 $1\ 000$ 、 $1\ 500\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2\ 500\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时分别比对照低 37.8%、

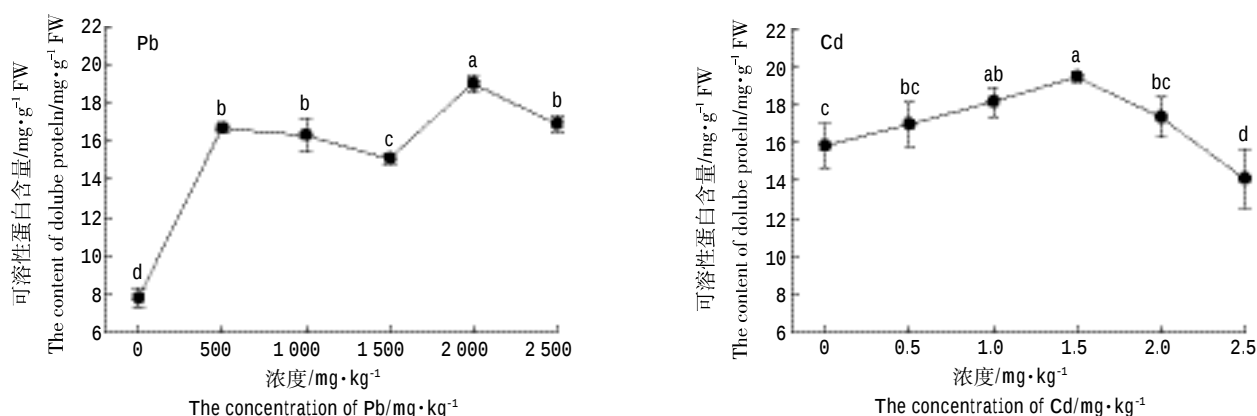


图 7 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋发棵期叶片可溶性蛋白含量的影响

Figure 7 Effects of Pb or Cd stress on the contents of soluble protein in leaves in the seeding stage of taro

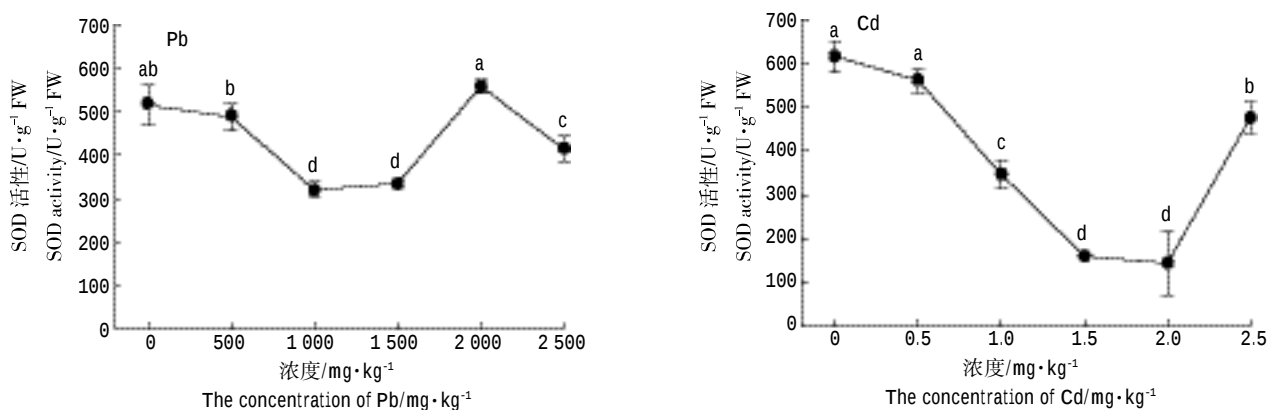


图 8 土壤中 Pb、Cd 胁迫对发棵期芋叶片 SOD 活性的影响

Figure 8 Effects of Pb or Cd stress on the activity of SOD in leaves in the seeding stage of taro

35.0%和19.6%,而Cd除在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时没有明显差异,在 1.0 、 1.5 、 $2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd胁迫时分别显著低于对照33.0%、58.0%、60.0%和18.0%。

与SOD不同的是,随着土壤中Pb或Cd浓度的升高,POD和CAT的活性则呈上升趋势,在低浓度Pb或Cd胁迫下,POD和CAT活性变化与对照没有显著差异(图9~图10)。当浓度大于等于 $1\ 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb或 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd时,POD活性显著高于对照,最大分别高出对照119.0%($2\ 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb胁迫时)和78.7%($2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd胁迫时);当大于等于 $2\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb或 $1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd时,CAT活性显著高于对照,最大分别高出299.4%($2\ 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb胁迫时)和64.1%($2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd胁迫时)。

2.8 Pb、Cd胁迫对芋产量的影响

随着土壤Pb浓度的升高,芋产量比对照有明显下降(图11),各外施Pb胁迫下显著低于对照,降幅范围在34.2%~53.5%。随着土壤Cd浓度的升高,芋产量呈下降趋势,除 $1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd胁迫时与对照无明

显差异外,其他都差异性显著,各外施Cd胁迫下显著低于对照21.9%~56.5%。

3 讨论

近年来,国内外就重金属元素对作物生长发育及品质的影响进行了大量的研究,结果表明:不同作物种类及品种间对不同重金属污染的响应不一。付庆灵等^[14]研究表明,土壤Pb浓度在 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时茼蒿地上部鲜重下降,根系生长受到抑制,也有研究发现重金属胁迫对植物生长表现出了一定的促进作用^[15-16]。在本试验中,芋对Pb、Cd胁迫表现出了一定的耐受性,在整个生长期,基本保留4~6片的功能叶进行光合作用,植株并无明显的重金属毒害症状(如黄化、坏死等)。不同重金属元素胁迫也存在差异,即Pb整体上抑制植株的生长,而Cd则表现出促进作用,这可能是来自于植物机体对重金属毒性响应的结果。在试验中,Pb和Cd胁迫均明显降低了芋的产量。这暗示,虽然Pb、Cd胁迫对芋植株营养生长的毒害性存在差

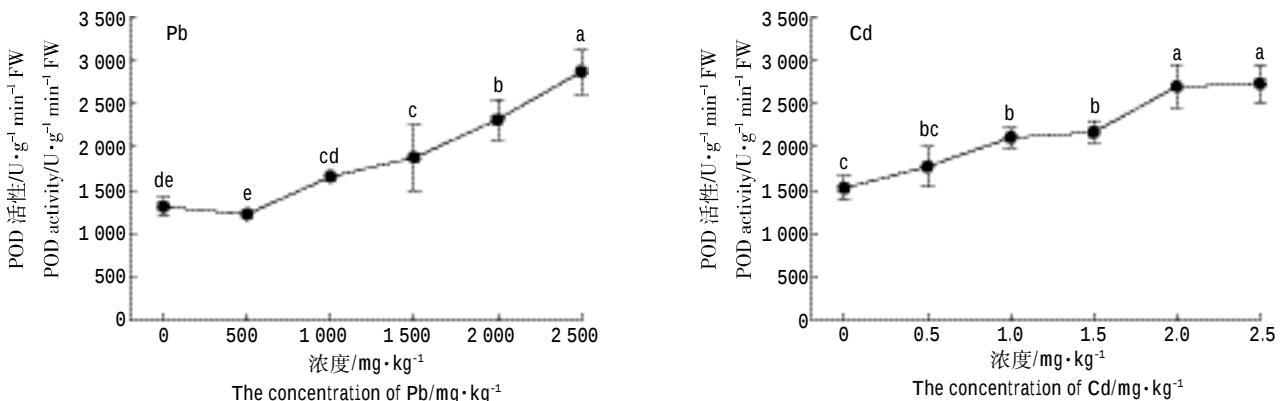


图9 土壤中Pb、Cd胁迫对发棵期芋叶片POD活性的影响

Figure 9 Effects of Pb or Cd stress on the activity of POD in the seedling stage of taro

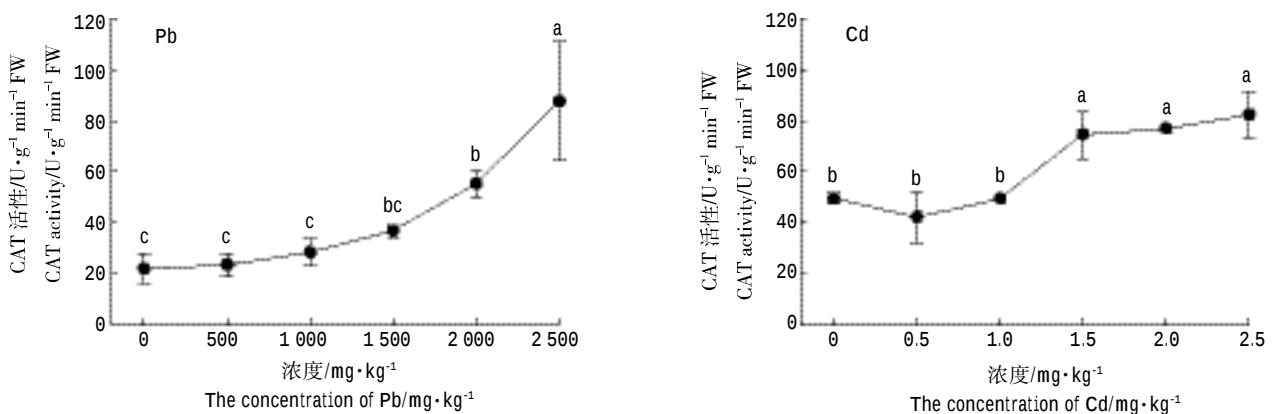


图10 土壤中Pb、Cd胁迫对发棵期芋叶片CAT活性的影响

Figure 10 Effects of Pb or Cd stress on the activity of CAT in leaves in the seedling stage of taro

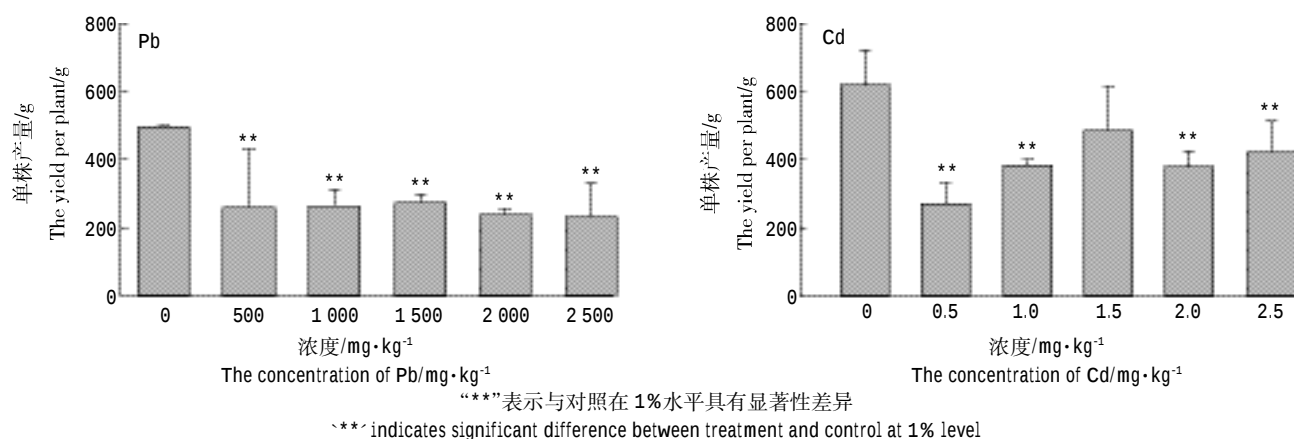


图 11 土壤中 Pb、Cd 胁迫对芋产量的影响

Figure 11 Effects of Pb or Cd stress on the yields of taro

异,最终对球茎形成均有一定的负效应。在农业生产上,重金属污染对作物生长本身带来损伤,进而影响作物的产量和品质。有研究表明,低浓度重金属污染可能带来增产效应,而高浓度污染则带来减产效应,甚至绝收^[17]。

在重金属胁迫下,植物通过一定的生理机制会产生一系列的生理生化反应。Pb、Cd 等重金属通过对植物光合作用破坏、呼吸代谢失调、膜脂过氧化、渗透调节失衡等产生毒害作用^[18]。MDA 是膜脂过氧化的产物,用来表征重金属胁迫下细胞膜受伤害的程度。有研究表明,不同重金属耐性植物间 MDA 的敏感性不同,耐性弱的植物根系中 MDA 含量有一个明显的增加^[19]。在本试验中,芋发棵期和膨大期 MDA 含量均有不同程度的增加,且 Pb 更加明显,这表明 Pb 和 Cd 胁迫对芋叶片的细胞膜产生了伤害。研究表明,重金属能够诱导大量活性氧的产生,包括过氧化氢、超氧阴离子自由基、羟基自由基等^[20-21],它们使植物细胞膜膜脂过氧化从而产生破坏作用^[22]。SOD、POD 和 CAT 等是植物抗逆境反应中的重要抗氧化酶类^[23],它们在清除活性氧维持植物机体氧化平衡中发挥了重要作用。本研究结果表明,低浓度 Pb 或 Cd 胁迫芋抗氧化酶活性变化并不明显,但在高浓度 Pb 或 Cd 水平,芋叶片中 SOD 活性与对照相比明显降低了,而 POD 和 CAT 活性显著升高了,这说明在抵御活性氧伤害的抗氧化过程中发挥主要作用的可能是 POD 和 CAT,也解释了在芋生长过程中表现出了一定的对 Pb、Cd 胁迫的耐性,但 POD 和 CAT 可能在其中发挥了主要的作用。另外,产生的活性氧破坏核苷酸结构,抑制转录和翻译^[24-25],阻止了蛋白的合成,加速了降解^[26-27]。但

在我们的研究中,Pb、Cd 胁迫导致了芋叶片中可溶性蛋白的大量增加。Singh 等^[28]报道了低浓度 Cr(1 mmol·L⁻¹ 和 2 mmol·L⁻¹)能增加水稻中可溶性蛋白的含量的原因可能是由于 Cr 胁迫破坏了功能性蛋白的平衡。Pb、Cd 胁迫导致可溶性蛋白含量的增加也可能是芋植株适应胁迫逆境的一种结果,通过增加渗透调节物质来维持机体的渗透平衡。

4 结论

(1)Pb、Cd 胁迫对芋的生长发育会产生一定的影响,Pb 表现出了毒害效应,如抑制植株的株高,而 Cd 则表现出了促进作用,株高、叶长、叶宽同比对照呈现上升趋势。

(2)Pb、Cd 胁迫对芋植株的生理特性会产生一定的影响,如 MDA、可溶性蛋白含量的显著增加,SOD 活性明显降低,POD 和 CAT 活性显著增强,这表明,POD 和 CAT 两种酶活性可能对芋的 Pb、Cd 胁迫逆境性响应中发挥作用。

(3)在盆栽试验下,Pb 或 Cd 胁迫均导致芋产量明显下降,最大下降幅度分别为 53.6%和 56.5%。

参考文献:

- [1] 任艳芳,何俊瑜,张冲,等.铅胁迫对莴苣种子萌发和部分生理代谢的影响[J].江苏农业学报,2010,26(4):740-744.
REN Yan-fang, HE Jun-yu, ZHANG Chong, et al. Effects of Pb stress on germination and physiological metabolism of lettuce seeds [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(4): 740-744. (in Chinese)
- [2] 曲凯丽,张艺馨,朱宏.镉胁迫对小麦种子萌发的影响[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2014,30(6):94-97.
QU Kai-li, ZHANG Yi-xin, ZHU Hong. The effects of cadmium stress

- on wheat germination [J]. *Natural Sciences Journal of Harbin Normal University*, 2014, 30(6): 94-97. (in Chinese)
- [3] Gruenhage L, Jager I J. Effect of heavy metals on growth and heavy metals content of *Allium Porrum* and *Pisum sativum* [J]. *Journal of Applied Botany*, 1985, 59: 11-28.
- [4] 司卫静, 原海燕, 韩玉林, 等. Pb胁迫对香豌豆幼苗部分生长和生理生化指标的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(2): 86-91. SI Wei-jing, YUAN Hai-yan, HAN Yu-lin, et al. Effect of Pb stress on some growth and physiological-biochemical indexes of *Lathyrus odoratus* seedlings[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2013, 22(2): 86-91. (in Chinese)
- [5] Paivoke H T. The short term effect of zinc on growth anatomy and acid phosphate activity of pea seedlings[J]. *Annals of Botany*, 1983, 20: 307-309.
- [6] 陈京都, 何理, 许轲, 等. 镉胁迫对不同基因型水稻生长及矿质营养元素吸收的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3219-3225. CHEN Jing-du, HE Li, XU Ke, et al. Growth and nutritional element absorption of different rice genotypes under cadmium stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(12): 3219-3225. (in Chinese)
- [7] 王丽香, 陈虎, 郭峰, 等. 镉胁迫对花生生长和矿质元素吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1106-1110. WANG Li-xiang, CHEN Hu, GUO Feng, et al. Effects of cadmium on peanut growth and mineral nutrient uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1106-1110. (in Chinese)
- [8] Mohanpuria P, Rana N K, Yadav S K. Cadmium induced oxidative stress influence on glutathione metabolic genes of *Camellia sinensis* (L.) O Kuntze[J]. *Environmental Toxicology*, 2007, 22: 368-374.
- [9] Guo J, Dai X, Xu W, et al. Over expressing GSH1 and AsPCSI simultaneously increases the tolerance and accumulation of cadmium and arsenic in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Chemosphere*, 2008, 72: 1020-1026.
- [10] Karcz W, Trela Z, Burdach Z, et al. Effect of trimethyllead chloride (Met3PbCl) on SV channels and volume changes in the red beet vacuoles[J]. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 2009, 51: 105-106.
- [11] Astolfi S, Zuchi S, Chiani A, et al. In vivo and in vitro effects of cadmium on H⁺-ATPase activity of plasma membrane vesicles from oat (*Avena sativa* L.) roots[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160: 387-393.
- [12] 邹日. 芋头对重金属的富集规律及对镉、铅胁迫的响应[D]. 烟台: 鲁东大学, 2012. ZOU Ri. The accumulation of heavy metals in taro and the response to Pb or Cd stress[D]. Yantai: Ludong University, 2012. (in Chinese)
- [13] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. WANG Xue-kui. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 付庆灵, 吕意, 黎佳佳, 等. 生菜对灰潮土重金属污染的反应与矿质元素吸收[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1153-1156. FU Qing-ling, LV Yi, LI Jia-jia, et al. Effects of lead and cadmium on quality of lettuce growing in a polluted grey Chao soil and uptake of mineral elements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1153-1156. (in Chinese)
- [15] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1): 63-68. ZONG Liang-gang, SUN Jing-ke, SHEN Qian-yu, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1): 63-68. (in Chinese)
- [16] Bah A M, Dai H X, Zhao J, et al. Effects of cadmium, chromium and lead on growth, metal uptake and antioxidative capacity in *Typha angustifolia*[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 142: 77-92.
- [17] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 455-463. NIE Sheng-wei, HUANG Shao-min, ZHANG Shui-qing, et al. Effects of varieties heavy metals stress on wheat grain yields of two genotypes and the main ingredients[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 455-463. (in Chinese)
- [18] Hegedus A, Erdei S, Horváth G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Science*, 2001, 160: 1085-1093.
- [19] 张军, 于沛, 杨兵, 等. 2种堇菜镉耐性和抗氧化酶活性分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(29): 18083-18086. ZHANG Jun, YU Pei, YANG Bing, et al. Comparative analysis on cadmium tolerance and antioxidant enzymatic activities of two viola species [J]. *Anhui Agricultural Sciences and Technology*, 2011, 39(29): 18083-18086. (in Chinese)
- [20] Oh S H, Lim S C. A rapid and transient ROS generation by cadmium triggers apoptosis via caspase-dependent pathway in HepG₂ cells and this is inhibited through N-acetylcysteine-mediated catalase upregulation [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, 212: 212-223.
- [21] Ognjanovic B I, Markovic S D, Đorđević N Z, et al. Cadmium-induced lipid peroxidation and changes in antioxidant defense system in the rat testes: Protective role of coenzyme Q₁₀ and Vitamin E [J]. *Reproductive Toxicology*, 2010, 29: 191-197.
- [22] Singh R, Tripathi R D, Dwivedi S, et al. Lead bioaccumulation potential of an aquatic macrophyte *Najas indica* are related to antioxidant system[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 3025-3032.
- [23] Yannarelli G G, Fernández-Alvarez A J, Santa-Cruz D M, et al. Glutathione reductase activity and isoforms in leaves and roots of wheat plants subjected to cadmium stress[J]. *Phytochemistry*, 2007, 68: 505-512.
- [24] Ates I, Suzen H S, Aydin A. The oxidative DNA base damage in tests of rats after intraperitoneal cadmium injection[J]. *Biometals*, 2004, 17: 371-377.
- [25] Liu W, Li P J, Qi X M, et al. DNA changes in barley (*Hordeum vulgare*) seedlings induced by cadmium pollution using RAPD analysis [J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 158-167.
- [26] Hou W, Chen X, Song G, et al. Effect of copper and cadmium on heavy metal polluter water body restoration by duckweed (*Lemna minor*) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45: 62-69.
- [27] Piotrowska A, Bajguz A, Godlewska-Zytkiewicz B, et al. Changes in growth, biochemical components, and antioxidant activity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae) exposed to cadmium and lead[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2010, 58: 594-604.
- [28] Singh A K, Misra P, Tandon P K. Phytotoxicity of chromium in paddy (*Oryza sativa* L.) plants[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2006, 27(2): 283-285.