

镉锌处理麦苗对中华稻蝗(*Oxya chinensis*)体内 锌、镉水平及生化指标的影响

朴 君^{1,2}, 张育平³, 杨慧敏^{1,2}, 吴海花², 张建珍², 马恩波², 李丽君⁴, 郭亚平^{1*}

(1.山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2.山西大学应用生物研究所, 太原 030006; 3.太原师范学院, 太原 030012; 4.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006)

摘要:为了研究 Cd、Zn 污染对中华稻蝗生理生化的影响, 选用不同浓度 Cd、Zn 溶液(Cd 0+Zn 0, Cd 20+Zn 0, Cd 20+Zn 50, Cd 20+Zn 100, Cd 20+Zn 200) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养麦苗饲喂中华稻蝗(*Oxya chinensis*)进行慢性染毒, 测定麦苗和虫体(4龄若虫)中 Cd 与 Zn 蓄积量、虫体中丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)及谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)活性和总抗氧化能力(T-Aoc)。研究结果显示, 在 Cd 浓度恒定的情况下, 随 Zn 处理浓度的增大, 麦苗和虫体中 Zn 含量显著上升, (Cd 20+Zn 200) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组麦苗和虫体 Zn 含量分别为对照组的 2.03 和 1.63 倍; Cd 含量呈先升高后降低趋势, 在 (Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组达到最高值, 分别为 10.40、4.35 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, (Cd 20+Zn 200) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组下降到 7.36、3.35 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 Cd 和 Zn 联合作用下, 随着 Zn 浓度的增加, 中华稻蝗体内的 MDA 含量升高。SOD 表现出先升高、后降低的趋势。与对照组相比, Cd 单一处理组 GPx 活性增加, 随着 Zn 的加入, 其 GPx 活性降低。T-Aoc 在 (Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组活性最高。研究结果表明, 低浓度 Zn 的加入可以增加中华稻蝗对 Cd 的富集, Cd 和 Zn 的联合作用能够引起中华稻蝗脂质过氧化损伤。

关键词:中华稻蝗; 镉; 锌; 相互作用; 生化指标

中图分类号: X503.223 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)07-1328-06 doi:10.11654/jaes.2013.07.007

Effects of Cadmium and Zinc in Wheat Seedlings on Heavy Metal Accumulation and Biochemical Indices of *Oxya chinensis*

PIAO Jun^{1,2}, ZHANG Yu-ping³, YANG Hui-min^{1,2}, WU Hai-hua², ZHANG Jian-zhen², MA En-bo², LI Li-jun⁴, GUO Ya-ping^{1*}

(1.College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Institute of Applied Biology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3.Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China; 4.Institute of Agricultural Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to study the interaction effects of cadmium (Cd) and zinc (Zn), *Oxya chinensis* were fed with the wheat seedlings cultured in solutions with different concentrations of Cd^{2+} and Zn^{2+} . Accumulation of Cd and Zn in the wheat seedlings and the grasshoppers were measured. The content of malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD) activity, glutathione peroxidase (GPx) activity and total antioxidant capacity (T-Aoc) in the grasshoppers were analyzed. The results showed that Zn contents increased significantly in the seedlings and grasshoppers when Zn concentration was increased and the Cd concentration was constant in solutions. When treated with the mixture of 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} and 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} , Zn contents in the seedlings and grasshoppers were 2.03 and 1.63 times higher than that in the control, respectively. Cd contents showed a tendency of first increase and then decline, and reached the highest when treated with mixture of 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} and 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} . The contents of MDA increased in the grasshoppers with Zn concentration increasing under the interaction of Zn and Cd. SOD activity firstly increased then declined. Compared with the control, GPx activity increased when treated with 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} alone and decreased when treated with the mixture of Cd and Zn. T-Aoc content reached the highest under the treatment of 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} and 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} . These results indicated that low concentrations of Zn could increase the accumulation of Cd in *O. chinensis*. The interaction of Zn and Cd could cause the damage of lipid peroxidation.

Keywords: *Oxya chinensis*; cadmium; zinc; interaction; biochemical indices

收稿日期: 2012-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071980); 山西省自然科学基金(2011011033-1); 高等学校博士点基金(20111401110006)

作者简介: 朴 君(1986—), 男, 在读硕士, 动物分子进化与分子毒理学方向。E-mail: eryl118@163.com

* 通信作者: 郭亚平 E-mail: guoyip1955@163.com

中华稻蝗(*Oxya chinensis*)是一种广泛分布的农业害虫,当其生存环境受到重金属污染时,由于其取食被污染的植物,重金属离子就会进入蝗虫体内,在体内蓄积并产生一系列毒害效应^[1-2]。镉(Cadmium, Cd)是重要的环境污染物,常与Zn等并存,随着Zn在饲料中的大量添加,Cd在饲料中的含量也随之上升^[3],同时,随着农田中锌肥的大量使用,Cd和Zn的污染已成为不可忽视的问题^[4-5]。Cd和Zn具有相同的核外电子构型,化学性质相似,存在着复杂的交互作用。国内外研究结果表明,Cd和Zn存在着拮抗和协同作用。McKenna等报道施Zn可明显抑制莴苣(*Lactuca sativa* Linn)和菠菜(*Spinacia oleracea*)根部对Cd的吸收,同时还可阻止Cd从根系的木质部运输到茎叶部^[6]。侯丽萍等的研究发现Cd与Zn对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的联合毒性在24 h和48 h时表现为拮抗作用^[7]。另一些研究则表明,施Zn可促进Cd的吸收和积累并降低各种抗氧化酶的活性。Cd和Zn的混合体系中,当重金属浓度较低时,这两种重金属在中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)体内的累积表现出协同作用^[8]。修瑞琴等通过对斑马鱼(*Brachydanio rerio*)进行Cd和Zn联合毒性实验也发现Cd和Zn离子联合作用在24 h和48 h为协同作用^[9]。

重金属诱导产生的氧自由基可攻击生物膜的不饱和脂肪酸而产生脂质过氧化物,丙二醛(malondialdehyde, MDA)是主要的产物,其含量变化能够反映脂质过氧化水平。膜脂过氧化物是机体氧化损伤的主要指标之一,MDA含量的高低可间接地反映细胞损伤的程度^[10]。重金属还能促使活性氧(ROS)的过量聚集,造成机体的氧化损伤。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)在催化超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)歧化反应中起着决定性作用,使细胞免受过氧化损伤,在维持昆虫体内超氧阴离子自由基的产生和清除之间的平衡中起着重要作用。谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPx)是一种含硒的抗氧化酶,可特异地催化GSH对 H_2O_2 的还原反应,保护细胞膜结构和功能的完整,在过氧化氢酶含量较低且 H_2O_2 含量很少的组织中替代过氧化氢酶清除 H_2O_2 ^[11]。总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-Aoc)代表整个机体的抗氧化水平,是体内各种抗氧化酶共同作用的结果^[12]。

本文通过Cd和Zn溶液培育麦苗饲喂中华稻蝗进行慢性染毒,分析Cd和Zn单一及复合污染条件下中华稻蝗体内Cd和Zn的蓄积以及对抗氧化能力的影响,初步揭示Cd和Zn联合染毒的毒理学效应。

1 材料与方法

1.1 设备与试剂

冷冻离心机;原子吸收分光光度计(SHIMADZUAA-6300, Japan);酶标仪(Spectra MAX 190, USA);氯化镉($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$, 分析纯, 天津化工三厂);硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 分析纯, 天津市苏庄化学试剂厂);MDA、SOD、GPx、T-Aoc试剂盒购于南京建成生物公司。

1.2 实验方法

1.2.1 供试植物

麦苗种子(晋太0704, 山西省农科院作物所提供)浸泡12 h发芽后,在白色冰盘(23 cm×16.5 cm×7 cm)内平铺一定厚度的吸水纸,将经过催芽的麦苗种子均匀播撒于冰盘内。采用设好的5个浓度的Cd和Zn溶液:(Cd 0+Zn 0, Cd 20+Zn 0, Cd 20+Zn 50, Cd 20+Zn 100, Cd 20+Zn 200) $mg \cdot L^{-1}$ 处理麦苗,实验设3个重复。培育7 d后的麦苗饲喂中华稻蝗,每个浓度均取25株麦苗,标记并冻存于-80℃待测。

1.2.2 染毒

2010年11月于山西省太原市晋源区采集中华稻蝗虫卵,2011年5月初放入人工气候箱(27±1℃, 14 h黑暗/10 h光照, 60%湿度)孵化。初孵若虫分装到5个纱笼(40 cm×29 cm×29 cm)中,每笼100头。饲喂过程中将不同重金属浓度下培育7 d后的麦苗分别放入相应的纱笼中,并定期更换麦苗。待虫体长到4龄第3 d时(共染毒24 d),每笼随机取样20头(雌雄各10头),一半用于重金属含量测定,另一半用于测定酶活性。待测样品标记后冻存于-80℃冰箱。

1.2.3 镉锌含量的测定

将中华稻蝗样本和麦苗样本在烘箱(65℃)中烘至恒重后称重记录,在 HNO_3+HClO_4 (V/V=5:1)体系中消化后的无机物转移至比色管中定容,用原子吸收分光光度法分别进行测定,结果以 $\mu g \cdot g^{-1}$ 表示。

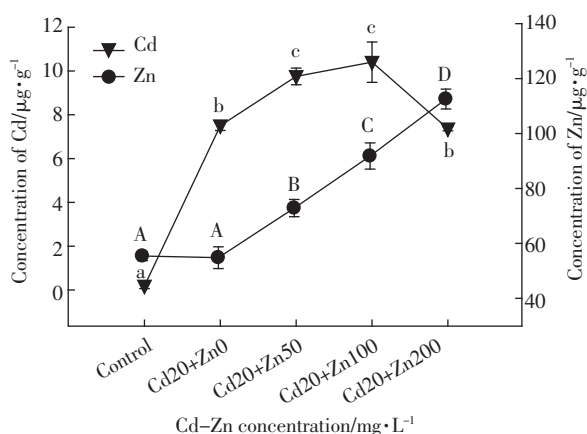
1.2.4 生化测定

取出冻存的虫体样本,称重,以1:9(W/V)加入Tris-HCl缓冲液(pH=7.5),缓冲液由0.01 mol·L⁻¹ Tris, 0.000 1 mol·L⁻¹ EDTA-2Na组成,用电动匀浆机在冰浴中匀浆,将匀浆液于4℃离心(15 000×g, 20 min)后,收集并分装上清液标记冻存待测。抗氧化酶(SOD、GPx、T-Aoc)和丙二醛(MDA)的测定均按南京建成试剂盒说明进行,蛋白测定采用BCA法,每个实验均设3次重复。

2 结果与分析

2.1 镉锌在麦苗中的累积

不同 Cd 和 Zn 浓度的溶液培养 7 d 后, 麦苗中 Cd 与 Zn 的累积情况见图 1。由图中可知, 当 Cd 浓度不变的情况下, 随 Zn 浓度的增加, 麦苗中 Cd 含量先升高后降低, 各处理间 Cd 含量的差异显著 ($P < 0.05$), 在 (Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组达到最大值, 而在高浓度处理组 (Cd 20+Zn 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Cd 含量显著降低。麦苗中 Zn 含量随着 Zn 处理浓度的升高而显著增加 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示不同处理组麦苗叶片中 Cd 或 Zn 浓度差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 培养 7 d 后麦苗叶片中的镉、锌含量

Figure 1 The Cd and Zn contents of wheat seedlings cultured for 7 days

2.2 镉锌在中华稻蝗中的累积

喂食 Cd 和 Zn 联合染毒的麦苗后, 中华稻蝗中 Cd 和 Zn 的累积情况见图 2。中华稻蝗体内 Cd 的累

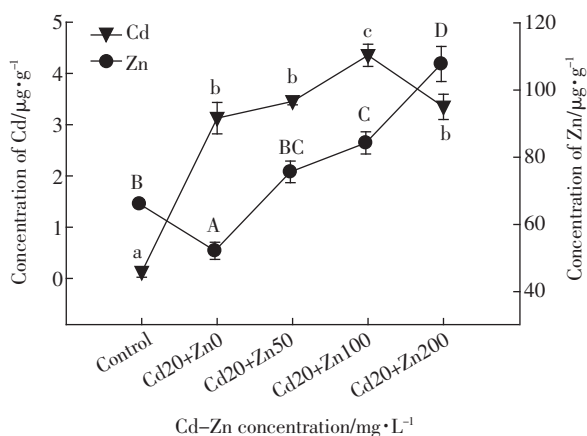


图 2 中华稻蝗体内镉、锌的含量

Figure 2 The Cd and Zn contents of the grasshopper *O. chinensis*

积浓度与麦苗中 Cd 的累积浓度变化规律相似, 呈现先升后降的趋势。在 (Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下达到最大值, 处理组中华稻蝗体内 Cd 的累积浓度均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。虫体中 Zn 含量随着 Zn 处理浓度的增加而显著增加。除 (Cd 20+Zn 50) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 (Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间差异不显著 ($P > 0.05$) 外, 其余各处理组间 Zn 含量的差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 MDA 含量

从图 3 可以看出, 与单一 Cd 处理组相比, MDA 含量在 (Cd 20+Zn 50) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组显著降低, 但随着 Zn 处理浓度的增加, MDA 含量明显升高 ($P < 0.05$)。 (Cd 20+Zn 50) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、(Cd 20+Zn 100) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 (Cd 20+Zn 200) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

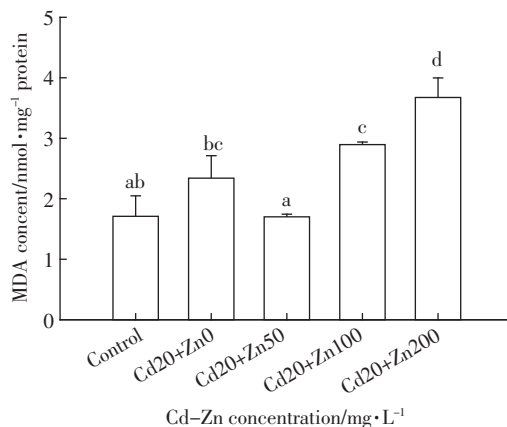


图 3 镉和锌联合染毒对中华稻蝗 MDA 含量的影响

Figure 3 Effects of Cd^{2+} and Zn^{2+} interaction on MDA content of *O. chinensis*

2.4 SOD 活力

从图 4 可以看出, 随着处理浓度逐渐增大, SOD

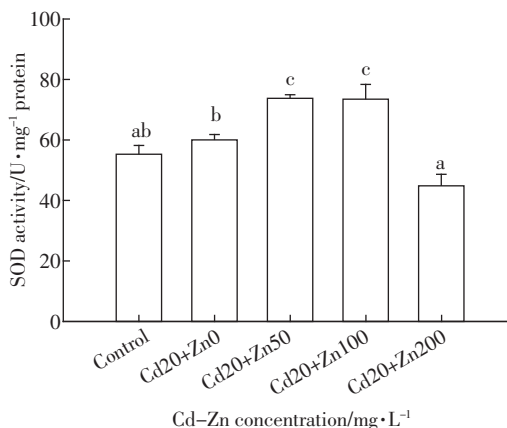


图 4 镉和锌联合染毒对中华稻蝗 SOD 活性的影响

Figure 4 Effects of Cd^{2+} and Zn^{2+} interaction on SOD activity of *O. chinensis*

活力呈现先增高后降低的趋势。(Cd 20+Zn 50) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与(Cd 20+Zn 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间无显著性差异($P>0.05$),处理组(Cd 20+Zn 200) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的SOD酶活力明显低于对照组的水平,具有显著性差异($P<0.05$)。

2.5 GPx 活力

图5中GPx活力呈现先增高后降低趋势。在(Cd 20+Zn 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、(Cd 20+Zn 200) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下酶活力基本与对照组持平。在(Cd 20+Zn 0) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下酶活力达到最大值,并与其他处理组间存在显著性差异($P<0.05$)。

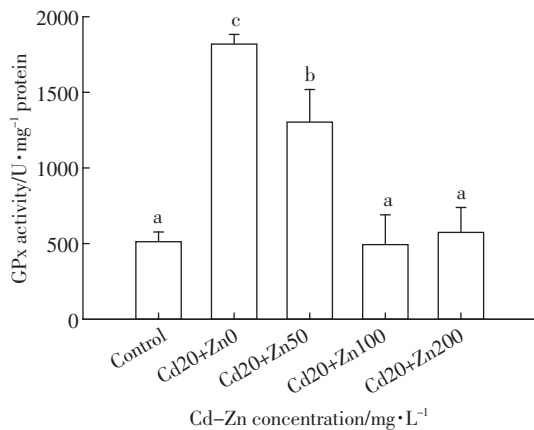


图5 镉和锌联合染毒对中华稻蝗GPx活性的影响

Figure 5 Effects of Cd^{2+} and Zn^{2+} interaction on GPx activity of *O. chinensis*

2.6 T-Aoc 活力

在(Cd 20+Zn 0) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、(Cd 20+Zn 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下T-Aoc活力与对照组相比显著升高($P<0.05$);在(Cd 20+Zn 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组T-Aoc活力达到最大值,而(Cd 20+Zn 50) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、(Cd 20+Zn 200) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组T-Aoc值与对照组相比无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

在自然界中,重金属的污染多为伴生。Cd和Zn具有相同的核外电子构型,化学性质相似,存在复杂的交互作用。由图1可以看出,当Cd浓度不变,随Zn浓度的增加,麦苗中Cd含量呈现出先增高后降低的趋势,浓度在(Cd 20+Zn 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时Cd含量最高,在(Cd 20+Zn 200) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时Cd含量显著降低。徐国莹等的研究表明在Cd和Zn的复合处理中,二者之间存在明显的相互作用。当 $[\text{Zn}]/[\text{Cd}]<10$ 时,同一水平Cd处理下,Zn对Cd表现为协同作用;当 $[\text{Zn}]/[\text{Cd}]>10$ 时,同一浓度Cd处理下,Zn对Cd表现为拮抗作用^[13]。

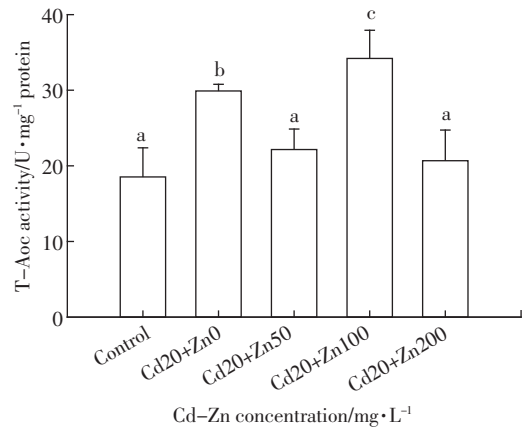


图6 镉和锌联合染毒对中华稻蝗T-Aoc活性的影响

Figure 6 Effects of Cd^{2+} and Zn^{2+} interaction on T-Aoc activity of *O. chinensis*

由图2可以看出,中华稻蝗取食不同浓度溶液培育的麦苗后,其体内Cd和Zn的累积量和麦苗中的累积趋势基本相同。即低浓度Zn促进Cd的吸收,高浓度Zn抑制Cd的吸收。张美琴等研究认为,低浓度的Zn诱导产生少量金属硫蛋白(metallothionein, MT),Cd与MT形成Cd-MT复合物,导致对Cd吸收的增加,表现为协同作用;当Zn离子达到一定浓度时,结合位点饱和,多余的Zn会竞争性地置换出Cd,使Cd含量降低,表现出拮抗作用^[8]。邓云翠等研究认为,机体在吸收重金属的过程中,Zn可以与Cd竞争进入细胞,使进入细胞的Cd量减少从而降低Cd的毒性^[14]。

MDA是脂质过氧化作用的最终产物,其含量可间接反应机体的脂质过氧化水平。本文研究结果显示,与单一Cd处理组相比,(Cd20+Zn50) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的MDA含量明显降低,可能是因为低浓度Zn的加入能诱导机体生成MT,Cd与MT形成Cd-MT复合物,减弱了Cd的毒害作用^[15-16]。李玉鹏等的研究发现,加Zn组金鱼(*Carassius auratus*)体内的MDA含量均显著低于相应的单一Cd处理组^[17],本文与其研究结果一致。本研究中,随着Zn浓度的提高,MDA含量逐渐升高,可能是由于Cd和高浓度的Zn导致机体产生脂质过氧化反应,从而使MDA含量上升^[18]。

SOD是一种广泛存在于动植物和微生物体内的金属酶,它可催化超氧化物阴离子自由基 O_2^- ·发生歧化反应($2\text{O}_2^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$)^[19]。本文在(Cd 20+Zn 200) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组SOD酶活力基本下降至对照组的水平,可能是由于高浓度的Zn阻断了Cd结合蛋白的诱导表达途径,使游离Cd增多,加重了Cd对

机体的毒害,且高浓度 Zn 也会直接导致 SOD 酶活力显著性的减弱^[20]。

GPx 是各种组织细胞中分布广泛的一种酶,它的主要功能是清除脂质过氧化产物和 H_2O_2 。本文结果中单一 Cd 处理组 GPx 酶活力最高, (Cd 20+Zn 50) $mg \cdot L^{-1}$ 处理次之,而 (Cd 20+Zn 100) $mg \cdot L^{-1}$ 和 (Cd 20+Zn 200) $mg \cdot L^{-1}$ 处理组的酶活力与对照组相当,实验结果显示 Cd 能刺激中华稻蝗 GPx 活性。因此,在 Cd 的作用下,中华稻蝗 GPx 活性上升为短暂的应激反应^[21]。而 Zhang 等的研究认为,Cd 能抑制中华稻蝗 GPx 活性,本文研究结果与其不相符,原因可能是因为其使用了较高浓度的 Cd,而高浓度的 Cd 离子侵入生物体后,能与 GPx 的活性中心——硒代半胱氨酸 (Se-Cys) 相结合,导致 GPx 分子结构的改变而致其失活^[22]。Zn 是 MT 的原始诱导物,所以当一定量 Zn (50 $mg \cdot L^{-1}$) 加入时,能诱导机体生成 MT,导致 Cd 的毒性缓解,而 (Cd20+Zn200) $mg \cdot L^{-1}$ 处理下,高 Zn 胁迫使 GPx 活性受到抑制^[23-24]。

重金属进入机体后会引发抗氧化系统多种物质共同参与防御。T-Aoc 代表机体总的抗氧化能力,中华稻蝗对于环境中的 Cd、Zn 污染引起的氧化损伤有一定的自我调节能力。在低剂量 Cd 处理条件下,中华稻蝗通过改变抗氧化酶活性,保护机体免受重金属毒害^[25]。所以在 Cd 单一处理条件下 T-Aoc 有所提高,以抵抗重金属污染引起的氧化损伤。已有报道 Zn 可与金属转录因子 (metal transcription factor, MTF-1) 结合,促进 MT 的合成,Cd 能与 MT 结合形成 Cd-MT 复合物,从而缓解 Cd 的毒害作用,表现为拮抗作用^[26]。(Cd20+Zn100) $mg \cdot L^{-1}$ 处理组 T-Aoc 达到最大值,可能是由于随着 Zn 浓度的提高,Zn 对机体产生胁迫,促使 T-Aoc 上升。随着 Zn 胁迫浓度的继续增大,虫体中 MDA 含量上升,SOD 和 GPx 却随之降低,表明虫体对 Zn 胁迫的抵御能力是有一定限度的,这与时忠杰等的报道相符^[27]。

4 结论

(1) Cd 和 Zn 联合染毒结果表明,当 $[Zn]/[Cd]=10$ 时,同一水平 Cd 处理下,Zn 对 Cd 表现为拮抗,当 $[Zn]/[Cd] \leq 5$ 时,Zn 对 Cd 表现出协同作用,且 Cd 和 Zn 在虫体中的累积规律存在剂量依赖性。

(2) 在 Cd 浓度恒定的情况下,随 Zn 处理浓度的增大,中华稻蝗脂质过氧化作用加剧;Cd 和 Zn 联合作用下,中华稻蝗通过 SOD、GPx 和 T-Aoc 等重新建

立氧化与抗氧化平衡体系。在 Cd 单一作用下,中华稻蝗 GPx 和 T-Aoc 活性上升,表现为机体对重金属 Cd 的应激反应,低浓度 Zn (50 $mg \cdot L^{-1}$) 条件下对 Cd 的毒性起到一定的缓解作用,Zn 在较高浓度 (200 $mg \cdot L^{-1}$) 使中华稻蝗的抗氧化能力下降。

(3) 本文通过慢性染毒方法研究了 Cd 和 Zn 联合污染对中华稻蝗体内重金属累积状况及其毒性效应的影响,可为 Cd 和 Zn 联合作用的研究提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Li Li-jun, Zhang Feng, Liu Xiao-mei, et al. Oxidative stress related enzymes in response to chromium (VI) toxicity in *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidae) [J]. *Journal of Environment Sciences*, 2005, 17 (5): 823-826.
- [2] Loubourdis N S. Heavy metal contamination in a lizard, *Agama stellio*, compared in urban, high altitude and agricultural, low altitude areas of North Greece [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1997, 58 (6): 945-952.
- [3] 孟紫强. 环境毒理学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 5-6. MENG Zi-qiang. Environmental toxicology [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2000: 5-6.
- [4] 华 珞, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对麦苗籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用 [J]. 农业环境保护, 2002, 21 (5): 393-398. HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Combination of pollutants cadmium and zinc and its effects on Cd accumulation in wheat grain and adjustment by organic manure [J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21 (5): 393-398.
- [5] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2012, 38 (4): 449-458. SUO Yan-yan, WU Shi-wen, ZHU Jun-jie, et al. Effects of foliar Zn application on rice yield and element contents under different Cd levels [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2012, 38 (4): 449-458.
- [6] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effect of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue [J]. *Environmental Pollution*, 1993, 79: 113-120.
- [7] 侯丽萍, 马广智. 镉与锌对草鱼种的急性毒性和联合毒性研究 [J]. 淡水渔业, 2002, 32 (3): 1-3. HOU Li-ping, MA Guang-zhi. Acute toxic effects of cadmium and zinc on grass carp [J]. *Freshwater Fisheries*, 2002, 32 (3): 1-3.
- [8] 张美琴, 陈海仟, 吴光红, 等. 水体中镉与锌在中华绒螯蟹体内吸收蓄积的相互作用 [J]. 水产学报, 2010, 34 (8): 1270-1277. ZHANG Mei-qin, CHEN Hai-qian, WU Guang-hong, et al. Interaction of Zn and Cd on uptake and accumulation by crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34 (8): 1270-1277.
- [9] 修瑞琴. 砷与镉、锌离子对斑马鱼的联合毒性实验 [J]. 中国环境科学, 1998, 18 (4): 349-352.

- XIU Rui-qin. Joint toxicity test of arsenic with cadmium and zinc ions to zebra fish, *Brachydanio rerio*[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(4):349-352.
- [10] 闫博,王兰,李涌泉,等. 镉对长江华溪蟹肝胰腺抗氧化酶活力的影响[J]. *动物学报*, 2007, 53(6):1121-1128.
- YAN Bo, WANG Lan, LI Yong-quan, et al. Effects of cadmium on hepatopancreatic antioxidant enzyme activity in a freshwater crab *Sinopotamon yangtsekiense*[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2007, 53(6):1121-1128.
- [11] 洪峰. 镉与氧化损伤研究进展[J]. *国外医学—医学地理分册*, 2002, 23(3):197-103.
- HONG Feng. Research Progress of cadmium and oxidative damage[J]. *Foreign Medical*, 2002, 23(3):197-103.
- [12] Niwa Y. Oxidative injury and its defense system in vivo[J]. *Rinsho Byori*, 1999, 47(3):189-209.
- [13] 徐国莹. 镉、锌及其相互作用对麦苗种子根生长的影响[J]. *自然科学*, 1993, 21(4):80.
- XU Guo-ying. The effects of Cd^{2+} , Zn^{2+} and their interaction on the growth of wheat roots[J]. *Journal of Henan Normal University*, 1993, 21(4):80.
- [14] 邓云翠,王辉,李艳红,等. Cd^{2+} 与 Zn^{2+} 的联合效应对马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)受精率的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(2), 323-328.
- DENG Yun-cui, WANG Hui, LI Yan-hong, et al. Combined effects of Cd^{2+} and Zn^{2+} on the fertilization rate in *Pinctada Martensii* (Dunker)[J]. *Oceanologia Etlimnologia Sinica*, 2012, 43(2), 323-328.
- [15] Guo J B, Peng S Q, Liu M F, et al. Protective effects of metallothionein induced by zinc against doxorubicin-caused cardiotoxicity and its potential mechanisms[J]. *Chin J New Drugs Clin Rem*, 2007, 26(2), 81-86.
- [16] Cousins R J, Coppen D E. Regulation of live zinc etabolism and etalothionein by cAMP glucagon and glucocorticoids and suppression of free radcats by zinc[J]. *Experientia-Suppl*, 1987, 52:545.
- [17] 李玉鹏. 镉及镉-锌联合对金鱼的毒性效应[D]. 山东:曲阜师范大学, 2005:15-16.
- LI Yu-peng. The toxic effects of cadmium and cadmium-zinc joint goldfish[D]. Shandong: Qufu Normal University, 2005:15-16.
- [18] 徐勤松,施旧新,杜开和. 锌胁迫水车前叶细胞自由基过氧化损伤与超微结构变化之间关系的研究[J]. *植物学通报*, 2001, 18(5):597-604.
- XU Qin-song, SHI Jiu-xin, DU Kai-he. Studies on correlation between peroxidation damage by free radicals and ultrastructural changes of mesophyll cells in *Ottelia alismoides* (L.) Pers induced by Zn pollution[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(5):597-604.
- [19] Stefan I L, Irwin F. The effects of superoxide dismutase on H_2O_2 formation[J]. *Free Radic Biol Med*, 2007, 42(10):1464-1469.
- [20] 徐勤松,施国新,周红卫. Cd, Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(1):5-8.
- XU Qin-song, SHI Guo-xin, ZHOU Hong-wei. Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated Oxygen in Leaves of *Ottelia alismoides* (L.) Pers[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):5-8.
- [21] 李丽君,郭亚平,刘平,等. 镉长期暴露对中华稻蝗抗氧化机制的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3):443-448.
- LI Li-jun, GUO Ya-ping, LIU Ping, et al. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Oxya Chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):443-448.
- [22] Zhang Yu-ping, Sun Ge, Yang Hui-min, et al. Chronic accumulation of cadmium and its effects on antioxidant enzymes and malondialdehyde in *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea)[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2011, 74(5):1355-1362.
- [23] Waalkes M P. Cadmium carcinogenesis[J]. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2003, 533(1-2):107-120.
- [24] Kultima K, Fernández E L, Scholz B, et al. Cadmium-induced gene expression changes in the mouse embryo, and the influence of pretreatment with zinc[J]. *Reproductive Toxicology*, 2006, 22(4):636-646.
- [25] Khaper N, Kaur K, Li T, et al. Antioxidant enzyme gene expression in congestive heart failure following myocardial infarction[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2003, 251(1-2):9-15.
- [26] Viola Gunther, Uschi Lindert, Walter Schaffner. The taste of heavy metals: Gene regulation by MTF-1[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2012:1416-1425.
- [27] 时忠杰,胡哲森,李荣生. 铅、锌胁迫对油菜光和色素及活性氧代谢的影响[J]. *江西农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 24(2):208-212.
- SHI Zhong-jie, HU Zhe-sen, LI Rong-sheng, et al. Effects of Pb, Zn stress on photosynthetic pigments and active oxygen metabolism of ipomoea aquatic Forsk[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2002, 24(2):208-212.