

镉长期暴露对中华稻蝗抗氧化机制的影响

李丽君^{1,2}, 郭亚平³, 刘平², 王跃¹, 马恩波^{1*}

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

摘要:采用生长于 Cd²⁺污染条件下的小麦苗喂养中华稻蝗的慢性染毒方法,研究了 Cd²⁺胁迫对中华稻蝗 SOD、CAT、GPx 活性和 H₂O₂ 浓度的影响。结果表明,在 Cd²⁺的作用下,中华稻蝗体内 SOD、CAT、GPx 活性和 H₂O₂ 浓度均发生变化,表明 Cd²⁺可导致中华稻蝗体内产生 ROS。SOD、CAT、GPx 3 种酶对 Cd²⁺有一定的耐受性:当 Cd²⁺浓度在这 3 种酶的耐受范围内,酶活性提高,反之酶活性降低。Cd²⁺与抗氧化系统间的关系复杂,SOD、CAT、GPx 共同承担清除 ROS、保护中华稻蝗的重要作用。

关键词:中华稻蝗(*Oxya chinensis*);镉(Cd);超氧化物歧化酶(SOD);过氧化氢酶(CAT);谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)

中图分类号:X503.223 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0443-06

Activity of Antioxidant Enzymes in Response to Cadmium in *Oxya Chinensis*

LI Li-jun¹, GUO Ya-ping², LIU Ping¹, WANG Yue³, MA En-bo^{3*}

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

Abstract: This paper was to present the influence of Cd on antioxidant enzymes in *Oxya chinensis*. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), and the level of hydrogen peroxide (H₂O₂) were determined in *O. chinensis* which were fed for 30 d on wheat seedlings exposed to different Cd concentration (0.25 (control), 24.57, 36.67, 43.50 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹). The results indicated that these enzymes activities and H₂O₂ level were varied in the presence of Cd, which suggested that there was an overproduction of reactive oxygen species (ROS) in *O. chinensis* following Cd treatment. In males, SOD activity declined by 19.86%, 38.65%, 28.98% and 71.49% respecting to control value, respectively, along with a decrease in CAT activity by 6.90%, 68.70%, 76.49% and 71.04% at 24.57, 36.67, 43.50 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd in wheat seedlings, respectively. GPx activity increased by 56.73%, 102.95%, 70.17% at 24.57, 36.67, 43.50 mg·kg⁻¹ Cd, respectively, decreased by 11.08% at 50.70 mg·kg⁻¹ Cd, and H₂O₂ level increased by 13.61%, 13.69% and 102.47% at 24.57, 43.50 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd, respectively, and declined by 27.05% at 36.67 mg·kg⁻¹ Cd. In females, SOD activity increased by 64.29% and 23.29% at 24.57 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd, decreased by 31.78% and 18.54% at 36.67 mg·kg⁻¹ and 43.50 mg·kg⁻¹ Cd. CAT activity declined by 8.73%, 45.31%, 9.98% and 5.17% at 24.57, 36.67, 43.50 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd, respectively. GPx activity increased by 0.15% and 0.88% at 24.57 mg·kg⁻¹ and 43.50 mg·kg⁻¹ Cd, decreased by 20.50% and 44.40% at 36.67 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd. H₂O₂ level elevated by 42.68%, and 26.01 % at 24.57 mg·kg⁻¹ and 43.50 mg·kg⁻¹, reduced by 15.10% and 13.97% at 36.67 mg·kg⁻¹ and 50.70 mg·kg⁻¹ Cd. The relationship between Cd toxicity and antioxidative system was complex, and antioxidant enzymes, such as SOD, CAT and GPx were involved in the mechanism to protect *O. chinensis* from ROS induced by Cd. Meanwhile, SOD, CAT and GPx played significant roles in cell defense against oxidative damage.

Keywords: *Oxya chinensis*; cadmium; superoxide dismutase (SOD); catalase (CAT); glutathione peroxidase (GPx); hydrogen peroxide (H₂O₂)

收稿日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(30810103907); 山西省留学人员管理委员会基金(2008114); 山西省农业科学院博士基金(YBSJJ0702)

作者简介: 李丽君(1963—), 女, 博士后, 副研究员, 主要研究方向为昆虫毒理学。E-mail: lilijunok2005@yahoo.com.cn。作者单位 1 与作者单位 2 对本研究贡献相同。

* 通讯作者: 马恩波 E-mail: maenbo2003@sxu.edu.cn

镉(Cd)是重要的环境污染物之一,它主要来源于化肥、农药的大量使用及含镉工业废水的排放或农田的灌溉^[1]。Cd是生物体非必需元素,毒性最强的重金属之一,极低的浓度就会对生物体产生危害^[2-6]。据文献报道,Cd可参与生物体内的氧化还原反应,产生大量的活性氧(ROS),从而导致机体内DNA断裂、脂质过氧化、酶失活等系列氧化应激。关于Cd对鱼类抗氧化系统影响的研究报道较多^[7]。Cd在机体内达到一定浓度时,可引起ROS的生成。ROS包括超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$),过氧化氢(H_2O_2)及羟自由基($\cdot OH$)^[3,8]。ROS具有很强的氧化力,对许多生物功能分子有破坏作用^[3,9],过量的ROS可导致细胞DNA结构变化、细胞膜结构和功能的改变^[11]、酶失活等一系列氧化应激反应,对生物体造成威胁^[2-5,11-14]。生物体为了减轻和防止ROS损伤,在长期的进化中,形成抗氧化系统,此系统可保护生物体免受外界环境不利因素的影响。抗氧化酶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)在抗氧化系统中起着维持ROS产生与清除平衡的重要作用。SOD在 $O_2^{\cdot-}$ 转化为 O_2 和 H_2O_2 的反应中具有催化功能,CAT和GPx起着清除 H_2O_2 的作用,在解毒机制中起着至关重要的作用^[15]。因此,关于重金属与氧化应激方面的研究已有报道^[2-7,13,19]。近年来,急性 Cd^{2+} 对中华稻蝗某一龄期抗氧化酶的影响^[37]及自然环境中重金属在中华稻蝗体内的累积与抗氧化酶在虫体内不同部位的分布也有报道,但慢性 Cd^{2+} 对中华稻蝗抗氧化酶的研究相对较少。

中华稻蝗是广泛分布于稻田的重要农业害虫,主要危害禾本科植物^[16]。当其生存的环境中存在Cd污染时,Cd可累积于中华稻蝗体内并影响胚胎发育及SOD、CAT、GPx的活性^[16-18]。由于低浓度污染物对生物的危害在短期内很难观察到^[19],为了解Cd对中华稻蝗长期暴露的毒理作用,本研究以Cd在中华稻蝗体内的累积实验^[16]为基础,进一步探讨长期染毒对中华稻蝗SOD、CAT、GPx及 H_2O_2 的影响,阐明慢性Cd胁迫对中华稻蝗抗氧化系统的毒性机理。同时,建议将中华稻蝗作为环境指示生物,客观地反映环境中Cd的污染程度,为环境监测中Cd污染的评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试昆虫

供试昆虫中华稻蝗于2004年7月用网捕法采自

山西省原平市(113°4'E,38°40'N)一河堰上。采后将中华稻蝗置于620 mm×510 mm×400 mm的铁笼中带回实验室,挑出4龄虫在室温下喂养^[16]。

1.1.2 供试土壤和植物

供试土壤采自山西省太原市小店区(112°36'E,37°46'N)农田中0~30 cm的土壤。土壤本底Cd未检出。土壤的物理性质:pH8.15,全N 0.088%,速效P 8.27 mg·kg⁻¹,K 171 mg·kg⁻¹,有机质 3.54%^[16]。

将采回的实验用土掺入不同量的 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ (分析纯)溶液,使其理论浓度为0、20、40、60、120 mg·kg⁻¹,作为实验用土。称取每个浓度的实验用土4.5 kg,置于355 mm×275 mm×70 mm塑料冰盘中,每个浓度重复4次^[16]。

供试植物为小麦,品种为晋太170,山西省农科院作物遗传研究所培育^[16]。

1.2 方法

1.2.1 慢性染毒、样本处理

将挑选饱满、大小均匀一致的小麦种子浸泡12 h后,取80粒分4行种于每个盛有4.5 kg土的塑料冰盘中,并于第2日浇水(水中Cd未检出)。1周后,将同一浓度长到一定程度的两盘小麦苗放入620 mm×510 mm×400 mm的笼中,再将挑出的4龄中华稻蝗雌、雄各26头放入笼中喂养,每个处理重复4次。生长期每5 d更换1次小麦苗,自然条件下饲喂中华稻蝗。30 d后,将中华稻蝗从笼中取出,封于塑料袋,冷冻于-80℃冰箱中^[16]。

本实验各处理小麦苗中Cd浓度分别为0.25、24.57、36.67、43.50、50.70 mg·kg⁻¹。

1.2.2 生化分析

测定酶活性时,将中华稻蝗从-80℃冰箱中取出,迅速用医用剪刀取下胸部,测定SOD、CAT、GPx及 H_2O_2 。按照南京建成生物工程研究所提供的分光光度法在酶标仪(Spectra MAX 190)上进行各项指标的测定。测定原理如下:

酶液的制备及SOD、CAT、GPx测定方法与原理同文献[19]。

H_2O_2 测定原理: H_2O_2 可以与钼酸作用生成一种络合物,在405 nm处测定生成量可计算出 H_2O_2 的量。 H_2O_2 的单位:每升酶液中所含 H_2O_2 的毫摩尔数。

蛋白测定原理:凡分子中含有两个氨基甲酰基(-CONH₂)的化合物都能与碱性酮作用,形成紫色复合物,这一反应称为双缩脲反应,蛋白质分子中有许多肽键(-CONH-)都能起此反应,各种蛋白显色程度

基本相同,在 540 nm 处比色。蛋白的单位:每毫升酶液中所含蛋白的毫克数。

各项指标的测定重复 4 次。

1.3 统计分析

利用 SPSS11.5^[21] 软件系统,对所测 SOD、CAT、GPx 活性及 H_2O_2 浓度分别进行方差分析和 Duncan's 的多重比较。

2 结果与分析

2.1 SOD 活性

从图 1 可看出, Cd^{2+} 的存在导致中华稻蝗体内 SOD 活性发生变化,说明 Cd^{2+} 可破坏机体内固有的 ROS 平衡,类似结果已有报道^[11,21]。就雄性而言,随着 Cd 浓度的提高, SOD 活性分别下降 19.86%、39.65%、28.98% 和 71.49%。方差分析显示,在实验范围内雄性中华稻蝗 SOD 活性变化差异极显著 ($P < 0.01$)。对雌性中华稻蝗而言,随 Cd 浓度的提高, SOD 活性变化表现为先升高后降低的趋势。当 Cd 浓度为 $24.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SOD 活性与对照相比增加 64.29%; 当麦苗中 Cd 浓度为 36.67、43.50、50.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SOD 活性与对照相比分别降低 31.78%、18.54%、23.29%。方差分析显示,在实验范围内 SOD 活性变化差异极显著 ($P < 0.01$)。

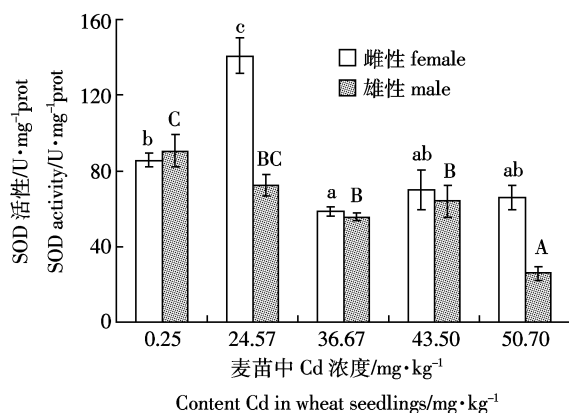


图 1 中小写字母表示雌性中华稻蝗,大写字母表示雄性中华稻蝗,字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$),相同的代表差异不显著 ($P > 0.05$),图中数值为算术平均数 $\pm$ 标准差,下同。

Small letters stand for female *O. chinensis*, and capitalized letters stand for male *O. chinensis*. Values with same letters were not significant different ($P > 0.05$), and values with different letters were significant different ($P < 0.05$). Values were mean $\pm$ SEM, based on four replicates and bars indicate standard errors. The same below.

图 1 Cd 对中华稻蝗 SOD 活性的影响

Figure 1 Effect of Cd^{2+} on the activity of SOD

2.2 CAT 活性

由图 2 可看出, Cd^{2+} 胁迫可引起 CAT 活性变化。随 Cd 浓度的提高,雄性中华稻蝗 CAT 活性与对照相比分别降低 6.90%、68.70%、76.49%、71.04%。方差分析显示,在实验范围内 CAT 活性变化差异极显著 ($P < 0.01$)。对于雌性中华稻蝗来讲, CAT 活性随 Cd 在麦苗中浓度的提高表现为先降低而后提高,各浓度 CAT 活性与对照相比分别降低 8.73%、45.31%、9.98%、5.17%。方差分析显示,在实验范围内 CAT 活性变化差异显著 ($P < 0.05$)。

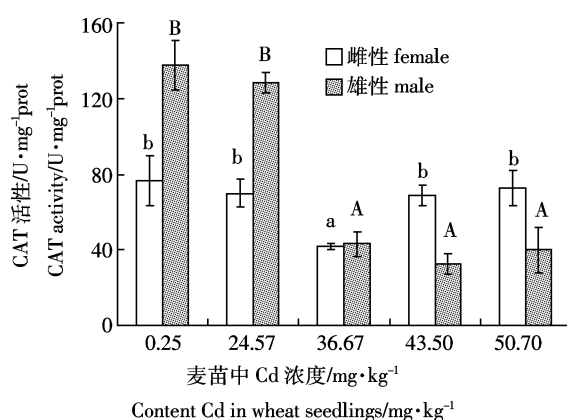


图 2 Cd 对中华稻蝗 CAT 活性的影响

Figure 2 Effect of Cd on the activity of CAT

2.3 GPx 活性

实验结果显示,在 Cd 作用下,中华稻蝗胸部 GPx 活性发生变化 (图 3)。对于雄性中华稻蝗来讲, GPx 活性表现为先提高而后降低,各浓度 GPx 活性分别增加了 56.73%、102.95%、70.17%、-11.08%。方差分析显示,在实验范围内, GPx 活性变化差异极显著 ($P < 0.01$)。对于雌性中华稻蝗来讲, GPx 活性变化为降低趋势。方差分析表明, GPx 活性变化差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 H_2O_2 浓度

图 4 显示, Cd 的存在可影响 H_2O_2 浓度。对于雄性中华稻蝗, H_2O_2 浓度随 Cd 在麦苗中浓度的提高表现为升高趋势。当麦苗中 Cd 浓度为 24.57、43.50、50.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, H_2O_2 浓度与对照相比分别增加 13.61%、13.69%、102.47%; 当 Cd 浓度为 36.67 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, H_2O_2 浓度与对照相比降低了 27.05%。方差分析显示,在实验范围内, H_2O_2 浓度变化差异极显著 ($P < 0.01$)。对于雌性中华稻蝗, H_2O_2 浓度变化趋势为先升高后降低趋势。当 Cd 浓度为 24.57、43.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, H_2O_2 浓度分别升高 42.68%、26.01%; 当 Cd 浓度为

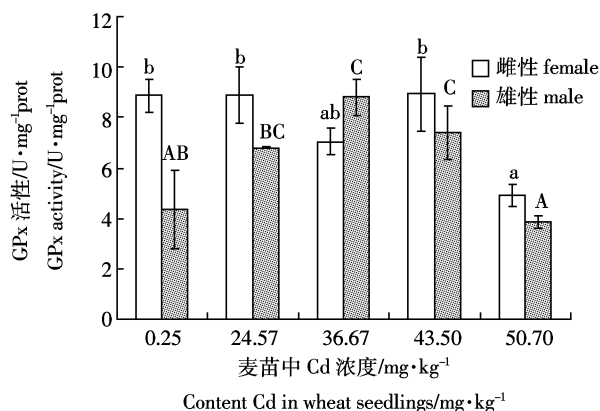


图3 Cd对中华稻蝗GPx活性的影响

Figure 3 Effect of Cd on the activity of GPx

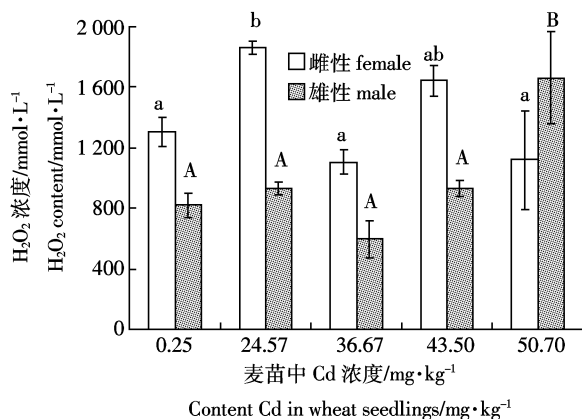


图4 Cd对中华稻蝗H₂O₂浓度的影响

Figure 4 Effect of Cd on H₂O₂ content

36.67、50.70 mg·kg⁻¹时,H₂O₂浓度分别降低15.10%、3.97%。方差分析显示,H₂O₂浓度变化差异极显著($P < 0.01$)。

3 讨论

Cd是毒性最强的重金属之一,极低的浓度就会对生物体产生危害^[3]。正常生理条件下,细胞内抗氧化系统中的抗氧化酶及抗氧化剂协调一致,处于一种动态平衡状态,使ROS维持在一个低水平,从而防止ROS毒害。一旦这种平衡遭到破坏,ROS就可能对生物体产生伤害作用^[9,22]。

图1~图4显示,在Cd的胁迫下,中华稻蝗体内SOD、CAT和GPx活性及H₂O₂浓度均发生变化,说明中华稻蝗体内组织细胞中ROS增多,机体自由基水平升高,导致细胞损伤和有关系统的功能紊乱,影响中华稻蝗正常的生理生化功能^[3-4,23]。

在实验范围内,雄性中华稻蝗的SOD活性均低于对照,说明Cd暴露抑制了SOD活性,其催化O₂·生成ROS的歧化反应不能正常进行^[14,24-25];Cd低浓度范围内,雌性中华稻蝗SOD活性高于对照,说明Cd对SOD活性产生激活作用,导致“毒物兴奋效应”^[26],这一结果与外界不利因素对鱼类抗氧化酶活性产生诱导作用一致^[27-28];在Cd的高浓度范围内,SOD活性低于对照,说明在此范围内Cd对SOD活性起抑制作用,不利于ROS的清除。因此,高浓度的Cd对中华稻蝗造成的伤害较低浓度严重^[29-30]。

不同浓度的Cd可引起中华稻蝗体内CAT活性变化,即Cd对中华稻蝗产生了毒性作用。在实验范围内,雄、雌中华稻蝗CAT活性均小于对照,说明Cd对CAT的毒性较大,且抑制CAT发挥保护细胞免受Cd毒性影响的作用。此时,中华稻蝗已不能及时清除其体内由于氧化损伤产生的H₂O₂,中华稻蝗可能在一定程度上受到Cd伤害^[31]。

在实验范围内,低浓度Cd可刺激雄性中华稻蝗GPx活性,高浓度的Cd则抑制GPx活性。这一现象说明在低浓度范围内,GPx可将H₂O₂分解为H₂O,使H₂O₂浓度维持在低水平范围内,保护中华稻蝗免受Cd毒害。因此,在Cd的作用下,中华稻蝗GPx活性短暂上升是抗性下降的应激反应。高浓度Cd抑制GPx活性,使其不能及时清除机体内H₂O₂,中华稻蝗可能在脂质、蛋白质、碳水化合物及核酸水平上受到影响^[32]。Cd可诱导雌性中华稻蝗GPx活性,提高清除H₂O₂的能力,使其维持较低浓度,起到保护中华稻蝗的作用。

在正常生理条件下,生物体内O₂·在SOD的催化作用下产生的H₂O₂与GPx、CAT清除H₂O₂存在平衡关系^[15]。逆境条件下只有保护酶活性增强,才能清除机体内的ROS,使其维持在一较低水平^[33],保护机体免受不利因素的影响。当环境中存在Cd胁迫时,中华稻蝗体内SOD、CAT、GPx活性及H₂O₂浓度均发生变化,说明其体内原有H₂O₂产生与清除间的平衡被打破,H₂O₂浓度不仅仅决定于SOD作用产生的H₂O₂,而且决定于CAT及GPx对H₂O₂的清除^[34]。因此,生物体内的抗氧化系统是非常复杂的^[35],SOD、CAT、GPx的平衡作用对自由基的敏感程度较单一的抗氧化酶SOD、CAT或GPx重要。H₂O₂随Cd浓度的增加而提高,说明高浓度Cd对中华稻蝗的毒性较大,导致SOD、CAT和GPx不能充分发挥其保护中华稻蝗的功能,致使H₂O₂的累积对其产生潜在的危害^[15]。

4 结论

当 Cd 对中华稻蝗产生胁迫时,中华稻蝗会启动其抗氧化机制清除体内多余的 ROS,使 ROS 产生与清除保持平衡状态,减少对中华稻蝗的危害。抗氧化酶活性与 Cd 浓度有密切关系,可将中华稻蝗作为环境指示生物,间接反映环境中 Cd 污染程度。

参考文献:

- [1] 陈媛. 土壤中镉及镉的赋存形态研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(7): 7-13.
Chen Y. Development of study on cadmium and its chemical speciation in soil[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(7): 7-13.
- [2] Fornazier R F, Ferreira R R, Vitória A P, et al. Effects of cadmium on antioxidant enzyme activities in sugar cane[J]. *Biologia Plantarum*, 2002, 45(1): 91-97.
- [3] Sarkar S, Yadav P, Bhatnagar D. Lipid peroxidative damage on cadmium exposure and alterations in antioxidant system in rat erythrocytes: A study with relation to time[J]. *Bio Metals*, 1998, 11: 153-157.
- [4] Laszczyca P, Augustyniak M, Babczyńska A, et al. Profiles of enzymatic activity in earthworms from zinc, lead and cadmium polluted areas near Olkusz(Poland)[J]. *Environment International*, 2004, 30: 901-910.
- [5] Elumalai M, Antunes C, Guilhermino. Effects of single metals and their mixtures on selected enzymes of *Carcinus maenas*[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 141: 273-280.
- [6] Hamed R R, Farid N M, Elowa S H E, et al. Glutathione related enzyme levels of freshwater fish as bioindicators of pollution[J]. *The Environmentalist*, 2003, 23: 313-322.
- [7] 王秋实, 李霞, 李丽萍. 镉对中间球海胆性腺脂质过氧化的影响[J]. 大连水产学院学报, 2007, 22(4): 270-272.
Wang Q S, Li X, Li L P. The effect of cadmium on lipid peroxidation in gonad of sea urchin *Strongylocentrotus* in intermedius[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2007, 22(4): 270-272.
- [8] Shützendübel A, Schwanz P, Teichmann T, et al. Cadmium-induced changes in antioxidative system, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127: 887-898.
- [9] 李周直, 沈慧娟, 蒋巧根, 等. 几种昆虫体内保护酶系统活力的研究[J]. 昆虫学报, 1994, 37(4): 399-403.
Li Z Z, Shen H J, Jiang Q G, et al. A study on the activities of endogenous enzymes of protective system in some insects[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1994, 37(4): 399-403.
- [10] 刘小玲, 周忠良, 陈立侨. 镉对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)抗氧化酶活性的影响[J]. 海洋科学, 2003, 27(8): 59-62.
Liu X L, Zhou Z L, Chen L Q. Effect of cadmium on antioxidant enzyme activities of the juvenile *Eriocheir sinensis* [J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(8): 59-62.
- [11] Asagba S O, Eriyamremu G E, Igberaese M E. Bioaccumulation of cadmium and its biochemical effect on selected tissues of the catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2008, 34: 61-69.
- [12] 赵元凤, 吕景才, 宋晓阳, 等. 镉污染对鲢鱼超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性的影响[J]. 农业生物技术学报, 2002, 10(3): 267-271.
Zhao Y F, Lv J C, Song X Y, et al. Effect of cadmium on activities of superoxide dismutase and catalase in *Aristichthys nobilis* [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2002, 10(3): 267-271.
- [13] 闫博, 王兰, 李涌泉, 等. 镉对长江华溪蟹肝胰腺抗氧化酶活性的影响[J]. 动物学报, 2007, 53(6): 1121-1128.
Yan B, Wang L, Li Y Q, 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.
- [14] Arias M C, Luna C, Rodríguez M, et al. Sunflower chlorotic mottle virus in compatible interactions with sunflower: ROS generation and antioxidant response[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2005, 113: 223-232.
- [15] Berr C, Richard M, Gourlet V, et al. Enzymatic antioxidant balance and cognitive decline in aging: The EVA study[J]. *European Journal of Epidemiology*, 2004, 19: 133-138.
- [16] Li L, Liu X, Duan Y, et al. Accumulation of cadmium and copper by female *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea) [J]. *Journal of Environmental Science*, 2006, 18(2): 341-346.
- [17] Devkota B, Schmidt G H. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 78: 85-91.
- [18] Li L, Liu X, Guo Y, et al. Activity of the enzymes of the antioxidative system in cadmium-treated *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidae) [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 20: 412-416.
- [19] 汪美贞, 贾秀英, 董爱华, 等. 镉长期暴露对黑斑蛙的氧化胁迫和抗氧化能力的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1718-1724.
Wang M Z, Jia X Y, Dong A H, et al. Effects of cadmium on oxidative stress and antioxidative ability in the frog *Rana nigromaculata* under a long-term exposure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1718-1724.
- [20] 洪楠, 林爱花, 李志辉, 等. 统计分析教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 134-148.
Hong N, Lin A H, Li Z H, et al. SPSS for Windows[M]. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2000: 134-148.
- [21] Wu C, Wang L, Liu C, et al. Mechanism of Cd²⁺ on DNA cleavage and Ca²⁺ on DNA repair in liver of silver crucian carp[J]. *Fish Physiology Biochemistry*, 2008, 34: 43-51.
- [22] 李毅平, 龚和. 昆虫体内抗氧化系统研究进展[J]. 生命科学, 1998, 10(5): 240-243, 221.
Li Y P, Gong H. Recent advances in antioxidant system in insects[J]. *Chinese Bulletin of Sciences*, 1998, 10(5): 240-243, 221.
- [23] Gallego S M, Benavides M P, Tomaro M L. Effect of cadmium ions on antioxidant defense system in sunflower cotyledons[J]. *Biologia Plantarum*, 1999, 42(1): 49-55.
- [24] Geckil H, Arman A, Gencer S, et al. Vitreoscilla hemoglobin renders *Enterobacter aerogenes* highly susceptible to heavy metals[J]. *Bio Metals*, 2004, 17: 715-723.
- [25] Lopes P A, Viegas-Crespo A M, Nunes A C, et al. Influence of age, sex, and sexual activity on trace element levels and antioxidant enzyme ac-

- tivities in field mice (*Apodemus sylvaticus* and *Mus spretus*) [J]. *Biological Trace Element Research*, 2002, 85:227–239.
- [26] 董爱华, 贾秀英. Cd、Pb 对蟾蜍肝脏超氧化物歧化酶活性及其同工酶的影响[J]. *四川动物*, 2005, 24(2):152–156.
- Dong A H, Jia X Y. Effects of cadmium and lead on SOD and their isozymes in liver of *Bufo bufo gargarizans* [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2005, 24(2):152–156.
- [27] 陈莹, 曹心德, 王晓蓉. 镧及其配合物对鱼体肝脏中酶活性的影响[J]. *环境化学*, 2000, 19(1):37–41.
- Chen Y, Cao X D, Wang X R. The effects of lanthanum and its complex compound (La-EDTA) on enzymes activities in fish liver [J]. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(1):37–41.
- [28] 王重刚, 郑微云, 余群, 等. 苯并(a)芘和芘的混合物暴露对梭鱼肝脏抗氧化酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4):349–353.
- Wang C G, Zheng W Y, Yu Q, et al. Effects of mixture of benzo(a)pyrene and pyrene exposure on hepatic antioxidant enzymes activities in *Mugil so-iuy* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4):349–353.
- [29] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. 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(2):5–8.
- Xu Q S, Shi G X, Zhou H W, et al. 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(2):5–8.
- [30] 林少琴, 兰瑞芳. 金属离子对蚯蚓 CAT、GSH-Px 及 SOD 酶活性的影响[J]. *海峡药学*, 2001, 13(2):23–25.
- Lin S Q, Lan R F. Effect of metal ions on activities of CAT, GSH-Px and SOD from earth-worms, *Eisenia foelide* [J]. *Strait Pharmaceutical Journal*, 2001, 13(2):23–25.
- [31] Rotilio G, Rossi L, De Martino A, et al. Free radicals, metal ions and oxidative stress: Chemical mechanisms of damage and protection in living system [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 1995, 6:221–227.
- [32] Cuny D, Haluwyn C V, Shirali P, et al. Cellular impact of metal trace elements in terricolous lichen *Diploschistes muscorum* (scop.) R. Sant. – identification of oxidative stress biomarkers [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 152:55–69.
- [33] 吴进才, 刘井兰, 沈迎春, 等. 农药对不同水稻品种 SOD 活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(4):451–456.
- Wu J C, Liu J L, Shen Y C, et al. Effect of several pesticides on SOD activity in different rice varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(4):451–456.
- [34] Manda K, Bhatia A L. Prophylactic action of melatonin against cyclophosphamide-induced oxidative stress in mice [J]. *Cell Biology and Toxicology*, 2003, 19:367–372.
- [35] 高春生, 王春秀, 张书松. 水体铜对黄河鲤肝脏抗氧化酶活性和总抗氧化能力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3):1157–1162.
- Gao C S, Wang C X, Zhang S S. Effects of copper on activities of antioxidant enzymes and total antioxidative competence in hepatopancreas of *Cyprinus carpio* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1157–1162.
- [36] 吴昊, 孙鸽, 吴海花, 等. 镉对中华稻蝗 4 龄若虫抗氧化酶的影响[J]. *四川动物*, 2008, 27(5):829–831.
- Wu H, Sun G, Wu H H, et al. Effect of cadmium on antioxidant enzymes of fourth instar *Oxya chinensis* [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(5):829–831.
- [37] 吴海花, 闫会平, 孙鸽. 中华稻蝗不同体段镉和铅含量及抗氧化酶的比较[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3):471–475.
- Wu H H, Yan H P, Sun G, et al. Comparisons of cadmium and lead concentrations and antioxidant enzyme activities in different body segments of *Oxya chinensis* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):471–475.