

镉对中华稻蝗保护酶系统的毒性效应

李丽君¹, 郭亚平^{2,3}, 武文丽¹, 王 跃², 马恩波²

(1.山西省农业科学院土壤肥料研究所, 太原 030006; 2.山西大学生物应用学研究所, 太原 030006; 3.山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘 要:采用急性染毒方法研究 Cd²⁺胁迫对不同发育阶段中华稻蝗 SOD、CAT、POD 活性的影响。结果表明,在 Cd²⁺的作用下,不同发育阶段中华稻蝗体内 SOD、CAT、POD 活性均发生变化。SOD、CAT、POD 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⁺对不同发育阶段虫体 3 种抗氧化酶的影响不同:3 龄若虫 SOD、POD 活性最高;雌性成虫 CAT 活性最低,而 3 龄雄性若虫 CAT 活性最高。

关键词:中华稻蝗;镉(Cd);超氧化物歧化酶(SOD);过氧化氢酶(CAT);过氧化物酶(POD)

中图分类号:X503.223 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1448-07

Toxic Effects of Cd²⁺ on Protective Enzyme Systems in Different Developing Stage of *Oxya chinensis* (Orthoptera Acridoidae)

LI Li-jun¹, GUO Ya-ping^{2,3}, WU Wen-li¹, WANG Yue², MA En-bo²

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

Abstract: In order to clarify the toxic mechanism of Cd²⁺ in *Oxya chinensis*, the toxic effect of Cd²⁺ on the activities of three antioxidant enzymes, superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD), in different developing stage of *O. chinensis* injected with Cd were determined. Different developing stages *O. chinensis* were injected with Cd²⁺ at different concentrations (0, 50, 100, 150, 200 mg·L⁻¹). The results showed that the effects of Cd²⁺ on SOD, CAT and POD activities were different within the experimental gradient. Cd²⁺ could induce rises of the activities of SOD, POD and CAT at some contents, and induce the decline of the activities at other contents. There were significant differences ($P < 0.05$) of SOD, CAT and POD activities among the treatments (except for SOD of males at the fifth-stage nymphs and adult *O. chinensis*). The activities of CAT and POD probably depended on SOD activity to eliminate oxygen species (ROS) under Cd²⁺ stress in the experiment. SOD and POD activities were the highest at the third instar nymphs, and the activity of CAT in female *O. chinensis* was the lowest at adults, and the activity of CAT in male *O. chinensis* was the highest at the third instar nymphs. These results indicated that the activities of SOD, CAT and POD in *O. chinensis* might act as indicative functions for Cd²⁺ contamination and Cd²⁺ could induce damage of antioxidant defense system in *O. chinensis*.

Keywords: *Oxya chinensis*; cadmium; superoxide dismutase; catalase; peroxidase

Cd 污染普遍存在于世界各地,每年人类的各种活动向环境中排放的 Cd 达 30 000 t 左右^[1]。我国土壤 Cd 污染也十分严重,被污染土地面积已达 1.3 万 hm²^[2]。Cd 可以通过空气、土壤、水和食物链被植物、动物和人类吸收,累积于生物体中,产生毒害作用,严重时可能

致生物体死亡^[3]。研究表明,Cd 毒性与细胞水平的氧化应激有关,导致超氧自由基(O₂⁻·),过氧化氢(H₂O₂),氢氧自由基(OH·)等活性氧(ROS)的产生。ROS 能损伤脂质、蛋白质、碳水化合物和核酸等生物大分子,使细胞功能受到威胁^[4-6]。但是,经过长期进化生物体形成了完整的保护体系——抗氧化系统。此系统中的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)共同作用,使 ROS 浓度处于动态平衡状态,防止外界不利因素产生的毒害作用^[7]。SOD 可催化 O₂⁻·发生歧化反应,降低清除 O₂⁻·浓度,生成

收稿日期:2010-03-04

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(30810103907);山西省农业科学院博士基金项目(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

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

H_2O_2 ;CAT 能够催化分解 H_2O_2 , 起到清除 H_2O_2 的作用;POD 能催化过氧化氢氧化酚类的反应, 分解体内产生的部分有毒物质^[8-9], 保证生物体进行正常的生理活动。因此, 关于 Cd 对动植物抗氧化酶活性影响的研究引起国内外学者的广泛关注, 并已有大量相关报道^[10-12,30]。近年来, Cd 对中华稻蝗抗氧化酶的影响也有研究^[13-15], 但仅将某一特定龄期中华稻蝗作为研究对象, 对不同发育阶段中华稻蝗抗氧化酶影响的研究未见报道。

在以往工作基础上, 本文研究了不同发育阶段中华稻蝗抗氧化酶对急性 Cd^{2+} 的毒性反应性, 以期了解 Cd^{2+} 对中华稻蝗的毒性效应, 为昆虫环境毒理学研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

实验用中华稻蝗于 2008 年 7—8 月采自山西省太原市(E112°36', N37°46')晋阳湖附近的废弃农田中。用网捕法采集中华稻蝗, 之后带回实验室, 在室温条件下饲喂 1~2 d。

1.2 急性染毒实验

将一定量的 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 溶于三蒸水中配制一定浓度的溶液, 将其稀释为 0、50、100、150、200 $mg \cdot L^{-1}$ 浓度梯度, 对照为三蒸水。急性染毒、虫体冻存同文献^[13]。

1.3 酶液制取

测定酶活性时, 将中华稻蝗从 $-80^\circ C$ 冰箱中取

出, 用眼科手术剪刀迅速将冰冻虫体的胸部剪下, 放入匀浆液中, 制备所需酶液。酶液制备按照南京建成生物工程研究所提供的试剂盒方法。

1.4 生化分析

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, 美国)上测定 SOD^[13]、CAT^[13]、POD 活性及蛋白含量。每一处理组的 SOD、CAT、POD 酶活性及蛋白质浓度均重复测定 3 次。

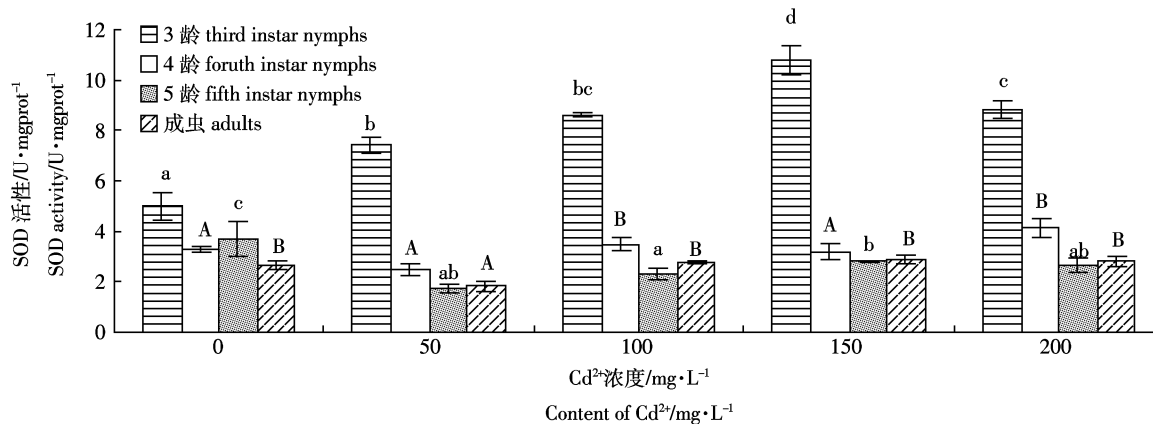
1.5 数据分析

利用 SPSS11.5^[16] 软件系统, 对中华稻蝗胸部 SOD、CAT、POD 数据分别进行方差分析与 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 中华稻蝗 SOD 活性对 Cd 胁迫的应答

从图 1 可以看出: Cd^{2+} 处理后, 3 龄雌性若虫的 SOD 活性呈先升后降趋势, 当 Cd^{2+} 为 $150 mg \cdot L^{-1}$ 时, SOD 活性最高, ANOVA 显示, SOD 活性在实验范围内差异极显著。4 龄若虫的 SOD 活性呈上升趋势, 当 Cd^{2+} 在 $200 mg \cdot L^{-1}$ 时, SOD 活性最高, ANOVA 显示, SOD 活性在实验范围内差异显著。5 龄若虫的 SOD 活性变化趋势与 4 龄若虫相似, 但各处理组的 SOD 活性均低于对照, 在实验范围内, 对照的 SOD 活性最高, ANOVA 显示, SOD 活性在实验范围内差异显著。成虫的 SOD 活性变化趋势与 4、5 龄若虫相似, 当 Cd^{2+} 为 $150 mg \cdot L^{-1}$ 时, SOD 活性最高, ANOVA 显示, SOD 活性在实验范围内差异极显著。从图 1 可见, 在



(图中数值为算术平均数±标准差, 不同小写字母表示 3 龄和 5 龄不同处理间的差异性显著 ($P<0.05$),

不同大写字母表示 4 龄和成虫不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

(Each value is the mean of three repetitions $\pm$ SEM, the lowercases mean significant difference ($P<0.05$) for the 3rd stage and 5th stage, and the capital letters mean significant different ($P<0.05$) for the 4th stage and adults. The same below.)

图 1 不同 Cd^{2+} 浓度处理对雌性中华稻蝗 SOD 活性的影响

Figure 1 Effect of Cd^{2+} on SOD activity in female *O. chinensis*

实验范围内,雌性3龄若虫的SOD活性最高。

Cd^{2+} 存在时,3龄雄性若虫SOD活性呈先升后降趋势, Cd^{2+} 为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD活性最高,ANOVA显示SOD活性在实验范围内差异极显著。4龄若虫的SOD活性变化趋势与3龄若虫相似,ANOVA显示,SOD活性在实验范围内差异显著。5龄若虫的SOD活性保持在一范围内, Cd^{2+} 为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD活性最高,ANOVA显示,SOD活性在实验范围内差异不显著。雄性成虫SOD活性变化趋势与5龄若虫相似,对照的SOD活性最高,ANOVA显示,SOD活性在实验范围内差异不显著。从图2可见,在实验范围内,雄性3龄若虫SOD活性最高。

2.2 中华稻蝗CAT活性对Cd胁迫的应答

Cd^{2+} 胁迫条件下,3龄雌性若虫的CAT活性呈先升后降趋势, Cd^{2+} 为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CAT活性最高,

ANOVA显示,CAT活性在实验范围内差异极显著。4、5龄若虫的CAT活性呈下降趋势,在试验范围内,对照的CAT活性最高,ANOVA显示,CAT活性在实验范围内差异显著。成虫的CAT活性呈上升趋势,当 Cd^{2+} 为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CAT活性最高,ANOVA显示,CAT活性在实验范围内差异显著。从图3可见,在实验范围内,雌性成虫CAT活性最低。

Cd^{2+} 胁迫使3、5龄雄性若虫及成虫的CAT活性呈上升趋势, Cd^{2+} 为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CAT活性最高,ANOVA显示,3龄及成虫的CAT活性在实验范围内差异极显著,5龄若虫CAT活性差异显著。4龄若虫的CAT活性呈先升后降的趋势,当 Cd^{2+} 在 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CAT活性最高,ANOVA显示,CAT活性在实验范围内差异极显著。从图4可见,在实验范围内,雄性3龄若虫的CAT活性最高。

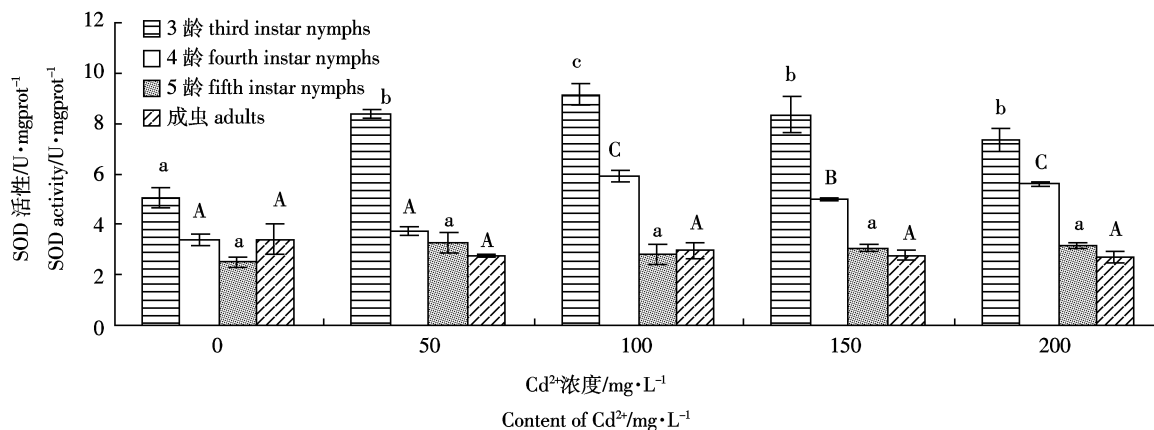


图2 不同 Cd^{2+} 浓度处理对雄性中华稻蝗SOD活性的影响

Figure 2 Effect of Cd^{2+} on SOD activity in male *O. chinensis*

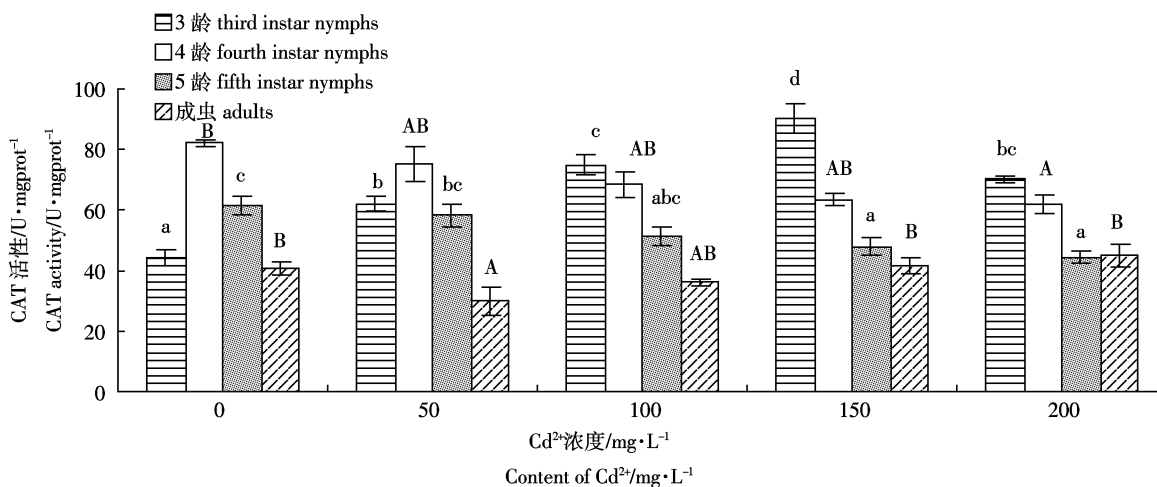


图3 不同 Cd^{2+} 浓度处理对雌性中华稻蝗CAT活性的影响

Figure 3 Effect of Cd^{2+} on CAT activity in female *O. chinensis*

2.3 中华稻蝗 POD 活性对 Cd 胁迫的应答

Cd²⁺处理后,3、4龄及成虫雌性虫体的 POD 活性呈上升趋势,当 Cd²⁺在 200 mg·L⁻¹时,POD 活性最高,ANOVA 显示,3龄及成虫 POD 活性在实验范围内差异极显著,4龄若虫的 POD 活性在实验范围内差异显著。5龄若虫的 POD 活性呈降低趋势。在实验范围内,对照的 POD 活性最高,ANOVA 显示,POD 活性在实验范围内差异显著。从图 5 可见,在实验范围内,雌性 3龄中华稻蝗的 POD 活性最高。

Cd²⁺处理后,3龄雄性若虫的 POD 活性呈先升后降趋势,当 Cd²⁺在 100 mg·L⁻¹时,POD 活性最高,ANOVA 显示,POD 活性在实验范围内差异显著。4龄若虫的 POD 活性呈上升趋势,当 Cd²⁺在 200 mg·L⁻¹时,POD 活性最高,ANOVA 显示,POD 活性在实验范围内差异显著。5龄若虫的 POD 活性呈降低趋势,且各处理的 POD 活性均低于对照,ANOVA 显示,POD 活性在实验范围内差异显著。成虫的 POD 活性变化趋势与 3龄相似,当 Cd²⁺为 150 mg·L⁻¹时,POD 活性

最高,ANOVA 显示,POD 活性在实验范围内差异极显著。从图 6 可见,在实验范围内,雄性 3龄中华稻蝗的 POD 活性最高。

3 讨论

Cd²⁺胁迫导致 3龄若虫清除 O₂^{·-}的能力增强,这与已有报道一致^[6,17-19]。雌性虫体在 Cd²⁺为 150 mg·L⁻¹、雄性虫体在 Cd²⁺为 100 mg·L⁻¹时,SOD 活性最高,虫体可能受到 Cd²⁺的伤害,此浓度是虫体对 Cd²⁺从适应到中毒反应的阈值^[20]。随 Cd²⁺胁迫程度提高,4龄若虫 SOD 活性提高表明虫体防御反应增强^[19]。雌性 5龄若虫受到 Cd²⁺的重度胁迫,难以通过提高 SOD 活性的方法清除过量的 O₂^{·-}^[6]。Cd²⁺为 50 mg·L⁻¹时,可能是进入雌性成虫体内较少的 Cd²⁺不利于有效酶结构形成,虽尚未对 SOD 活性产生诱导,却破坏或消耗了酶蛋白,使 SOD 活性低于对照^[8]。Cd²⁺为 100~200 mg·L⁻¹时,一方面 Cd²⁺的诱导效应可能使雌性成虫的 SOD 活性增强,另一方面 Cd²⁺可能取代 SOD 中的 Zn,形成

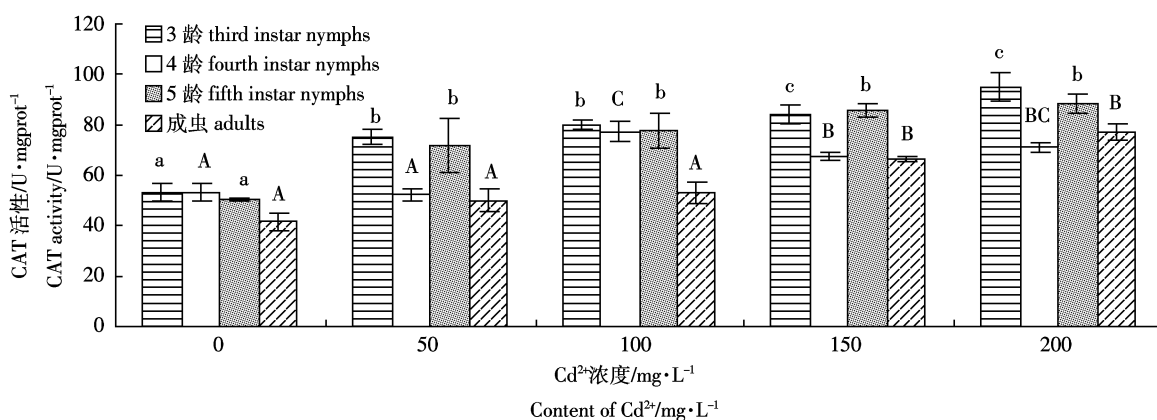


图 4 不同 Cd²⁺浓度处理对雄性中华稻蝗 CAT 活性的影响

Figure 4 Effect of Cd²⁺ on CAT activity in male *O. chinensis*

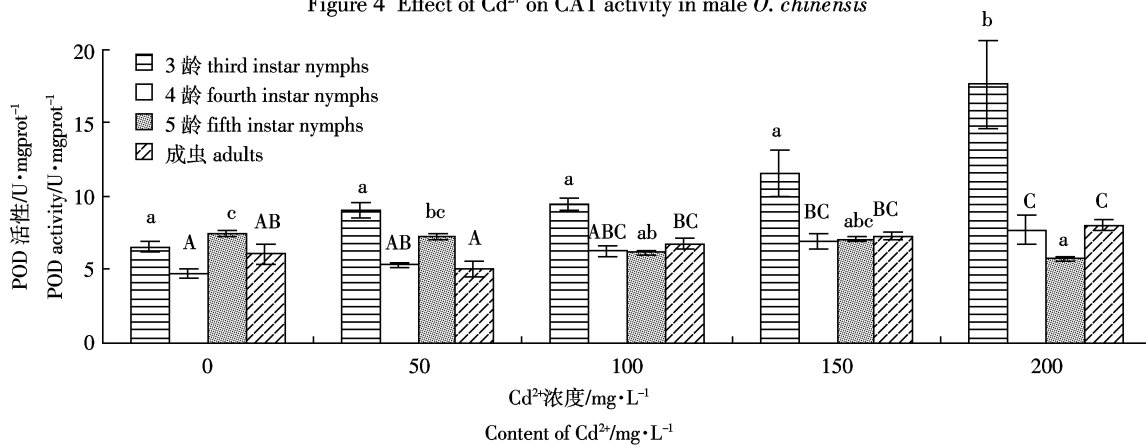
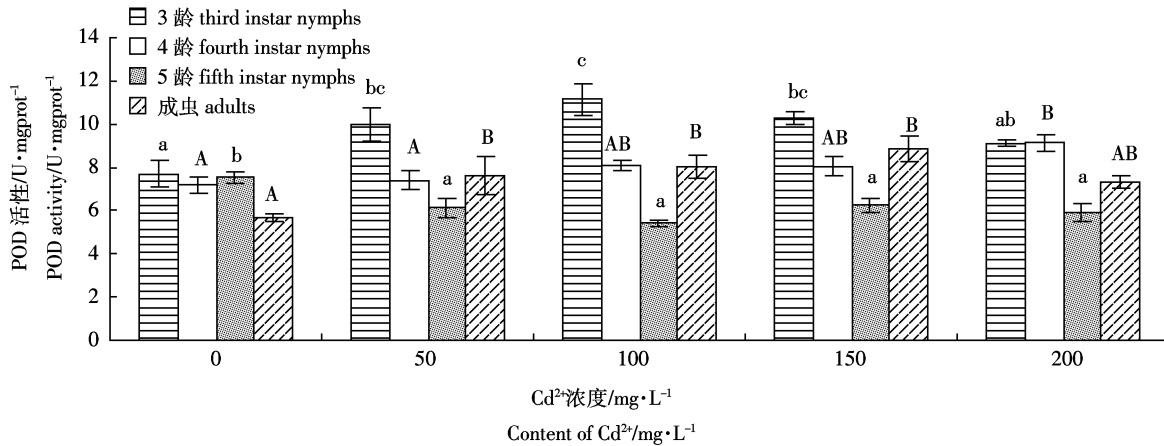


图 5 不同 Cd²⁺浓度处理对雌性中华稻蝗 POD 活性的影响

Figure 5 Effect of Cd²⁺ on POD activity in female *O. chinensis*

图6 不同 Cd²⁺浓度处理对雄性中华稻蝗 POD活性的影响Figure 6 Effect of Cd²⁺ on POD activity in male *O. chinensis*

CuCd-SOD,使 SOD 活力降低,两者抵消后使 SOD 活性与对照组差异不显著^[13]。雄性 5 龄和成虫的 SOD 活性保持在一定范围内的原因可能有两种:一是由于 5 龄、成虫虫体老化,产生了轻度中毒反应^[22],对 O₂·刺激的敏感性下降,使其抵抗外界不利因素胁迫的能力下降^[19];另一原因与雌性成虫相同。

雌性 3 龄若虫体内的 H₂O₂ 可被及时有效地清除,限制潜在 ROS 对虫体的过氧化损伤。Cd²⁺超过 150 mg·L⁻¹ 时,CAT 活性下降表明 Cd²⁺的胁迫已超过机体的适应能力,是机体中毒的前兆^[20]。CAT 活性变化趋势与 SOD 活性一致,说明 Cd²⁺胁迫使 ROS 代谢失衡,导致这 2 种酶活性发生变化^[24]。对于 4、5 龄若虫,Cd²⁺抑制 CAT 活性,造成 H₂O₂ 积累,导致细胞膜结构损伤。CAT 活性变化趋势与 SOD 不一致,说明 CAT 活性不仅受 SOD 活性影响,且与抗氧化系统中其他成分有关。Cd²⁺为 50 mg·L⁻¹ 时,成虫 CAT 活性显著低于对照,可能是低浓度 Cd²⁺未对 CAT 活性产生诱导。从 Cd²⁺为 100 mg·L⁻¹ 开始,CAT 活性与对照差异不显著可能与雄性成虫的 SOD 第 1 种原因相似。Cd²⁺导致 CAT 活性发生变化,且 CAT 活性与 Cd²⁺浓度之间存在相关性;雌、雄虫体间的生理差异使其对 Cd²⁺的抗氧化能力不同。雌性成虫 CAT 活性最低,说明虫体老化,抗氧化能力较低;3 龄雄性若虫年轻化,CAT 活性最高,可起到保护虫体的作用,小菜蛾等亦有类似现象^[23,25]。

Cd²⁺处理后的雌性 3、4 龄若虫及成虫体内酶系统中各成分间的平衡可能被破坏,但 POD 活性升高可降低 H₂O₂ 浓度,有利于维持虫体膜结构的完整性。Cd²⁺为 50 mg·L⁻¹ 时,雌性成虫的 POD 活性低于对照,

可能是由于 SOD 活性低于对照的原因。Cd²⁺抑制雌性 5 龄若虫的 POD 活性,易造成 ROS 的累积,引起 DNA 链断裂、碱基核糖基氧化等,影响虫体正常的生理活动^[22]。Cd²⁺处理后的 3 龄雄性若虫,POD 活性变化趋势符合生物体对外界不利因素胁迫反应的典型特征,与徐礼生等在菖蒲幼苗观察到的结果相似^[26]。Cd²⁺高于 100 mg·L⁻¹ 时,POD 活性降低是虫体中毒的前兆^[20]。Cd²⁺使 4 龄雄性若虫启动了虫体内的应激机制,POD 活性提高抑制脂质过氧化作用的发生。Cd²⁺抑制 5 龄雄性若虫的 POD 活性,诱发机体脂质过氧化^[6]。雄性成虫的 POD 活性高于对照,可起到保护虫体的作用。

对于雌性虫体,Cd²⁺为 50~100 mg·L⁻¹ 时,3 龄虫的 3 种酶活性由于底物浓度增加而被诱导,清除 O₂·及 H₂O₂ 的能力增强,O₂·及 H₂O₂ 代谢基本处于平衡状态。Cd²⁺为 200 mg·L⁻¹ 时,SOD、CAT 活性下降,POD 活性继续升高,H₂O₂ 的清除主要由 POD 完成,抗氧化系统中固有的平衡可能被破坏,不利于 ROS 的清除^[3]。SOD 和 CAT 活性变化趋势相同,说明 CAT 活性变化主要取决于 SOD 活性,3 种保护酶功能互补,保护机体免受自由基伤害^[27]。4 龄若虫的 SOD、POD 主要起维持 O₂·、H₂O₂ 代谢平衡的作用,两种酶活性的提高是机体对 Cd²⁺引发的氧化应激的适应调解过程^[28]。同样,5 龄若虫及成虫的 SOD 活性的变化直接影响 CAT 和 POD 活性的变化,3 种抗氧化酶协同作用承担清除 ROS 的任务。对于雄性 3 龄若虫,Cd²⁺作用下的 SOD、POD 活性变化模式基本一致,说明 POD 活性变化主要依赖于 SOD 活性,3 种酶协同作用保护虫体免受 Cd²⁺的胁迫。对于 4 龄、5 龄、成虫中华稻蝗,

SOD、CAT、POD 活性变化趋势不同,说明 Cd^{2+} 对这 3 种酶的胁迫没有同步性,对抗氧化酶活性的影响模式比较复杂^[29]。

4 结论

Cd^{2+} 导致中华稻蝗体内 SOD、CAT、POD 酶活性发生变化;SOD、CAT、POD 活性提高可有效地清除过量的 ROS,阻止 Cd^{2+} 引起的机体氧化损伤;酶活性降低,不利于 ROS 的清除,使膜的结构和功能遭到破坏;3 种酶协同作用,在维持中华稻蝗正常生理生化活动中起着重要的作用。

参考文献:

- [1] 赵中秋,席梅竹. Cd 对植物的氧化胁迫机理研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):47-51.
ZHAO Z Q, XI M Z. Advances in research on mechanisms of Cd-induced oxidative stress in plants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):47-51.
- [2] 茹淑华,苏德纯,王激清. 土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4):29-33.
Ru S H, Su D C, Wang J Q. Characteristics of Cd pollution in soil and the mechanisms of phytoremediation for soil contamination[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4):29-33.
- [3] 张治安,陈展宇,王振民,等. 镉胁迫对大豆下胚轴保护酶活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005a, 27(3):237-240.
Zhang Z A, Chen Z Y, Wang Z M, et al. Effect of cadmium stress on activities of protective enzymes of soybean hypocotyls[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005a, 27(3):237-240.
- [4] Dixit V, Pandey V, Shyam R. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(358):1101-1109.
- [5] 杨丽华,方展强,郑文彪,等. 镉对鲫鱼鳃和肝脏超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(3):13-16.
Yang L H, Fang Z Q, Zheng W B, et al. Experiment with effect of cadmium on activity of superoxide dismutase in gill and liver tissue of curcian [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(3):13-16.
- [6] 贾秀英,董爱华,马小梅. 镉致蟾蜍肝、肾脂质过氧化损伤[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1):92-94.
Jia X Y, Dong A H, Ma X M. Effect of Cd^{2+} on lipid peroxidation in liver and kidney of *Bufo gargarizans*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(1):92-94.
- [7] 刘井兰,于建飞,吴进才,等. 昆虫活性氧代谢[J]. 昆虫知识, 2006, 43(3):752-756.
Liu J L, Yu J F, Wu J C, et al. Insect reactive oxygen metabolism[J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43(3):752-756.
- [8] 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):529-533.
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 soiyu*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4):529-533.
- [9] 胡文琴,王恬,孟庆利. 动物中活性氧的产生及清除机制[J]. 家畜生态, 2004, 25(3):64-67.
Hu W Q, Wang T, Meng Q L. Mechanisms of generating and scavenging reactive oxygen species in animals[J]. *Ecology of Domestic Animal*, 2004, 25(3):64-67.
- [10] Rashed M N. Cadmium and lead levels fish (*Tilapia nilotica*) tissues as biological indicator for lake water pollution[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 68:75-89.
- [11] Francisco J, Roero J R, Francisco B, et al. Reduction of brain antioxidant defense upon treatment with Butylated hydroxyanisole(BHA) and sudan III in Syrian golden hamster[J]. *Neurochemical Research*, 2000, 25, 3:389-393.
- [12] Lee M Y, Shin H W. Cadmium-induced changes in antioxidant enzymes from the marine alga *Nannochloropsis Oculate*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15:13-19.
- [13] 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*, 2005a, 20:412-416.
- [14] Li L, Liu X, Guo Y, et al. Oxidative stress related enzymes in response to chromium(VI) toxicity in *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea)[J]. *Journal of Environmental Science*, 2005b, 17(5):823-826.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 陈亮,郭红岩,沈红,等. 低浓度铅暴露对鲫鱼肝脏抗氧化系统的影响[J]. 环境化学, 2002, 21(5):485-489.
Chen L, Guo H Y, Shen H, et al. Effect of trace lead on the antioxidant system of fish liver[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(5):485-489.
- [18] 王明金,刘红琴,何聃,等. 不同浓度 Pb 对向日葵幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 中国环境管理, 2007, 2:30-32.
Wang M J, Liu H Q, He D, et al. Effects of different concentrations of Pb on growth and antioxidant system in helianthus seedling[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2007, 2:30-32.
- [19] 陈小敏,杨芳,白燕,等. Te(IV)胁迫对两种螺旋藻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 水生生物学报, 2008, 32(2):148-153.
Chen X M, Yang F, Bai Y, et al. Effects of tellurium stress on the growth and antioxidant system of *Spirulina platensis* and *S. Maximum* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(2):148-153.
- [20] 高春生,王春秀,张书松. 水体铜对黄河鲤鱼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.
- [21] 丁磊, 吴康, 张伟明, 等. 镉对鲫血清抗氧化酶的影响[J]. 水利渔业, 2005, 25(6):91-92.
Ding L, Wu K, Zhang W M, et al. Effects of cadmium on antioxidant enzymes in serum of *Carassius auratus* [J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, 25(6):91-92.
- [22] 张景飞, 王晓蓉. 20号柴油低浓度长期暴露对鲫鱼肝脏抗氧化防御系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):345-348.
ZANG J F, WANG X R. Effect of No. 20 diesel on antioxidant defenses in liver of *Caraasius auratus* under a long-term exposure and low-concentration [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):345-348.
- [23] 颜红金, 王之光. 低强度激光照射对老龄小鼠的抗氧化系统的影响[J]. 激光生物学报, 2001, 10(3):203-207.
Yan H J, Wang Z G. Effects of low intensity laser irradiation on antioxidative system in ageing mice[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2001, 10(3):203-207.
- [24] 潘鲁青, 任加云, 吴众望. 重金属离子对中华绒螯蟹肝胰脏和鳃丝SOD、CAT活力的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(2):189-194.
Pan L Q, Ren J Y, Wu Z W. Effects of heavy metal ions on SOD, CAT activities of hepatopancreas and gill of the *Crab eriocheirsinensis* [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2004, 34(2):189-194.
- [25] 刘玉娣, 赵士熙. 小菜蛾过氧化氢酶和过氧化物酶与耐药性的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(3):304-307.
Liu Y D, Zhao S X. Correlation of catalase and peroxidase to pesticide tolerance in diamondback moth *Plutella xylostella* (L.) [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2002, 31(3):304-307.
- [26] 徐礼生, 周守标, 吴龙华, 等. 菖蒲幼苗对Cd胁迫的响应及其Cd富集能力分析[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(2):61-65.
Xu L S, Zhou S B, Wu L H, et al. Analyses on responses of *Acorus calamus* seedling to Cd stress and Cd accumulation ability[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2008, 17(2):61-65.
- [27] Pastor A, Medina J, delRamo J. Determination of lead in treated crayfish *Procambarus clarkii*: Accumulation in different tissues[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1988, 41:412-418.
- [28] 苏金为, 王湘平. 镉诱导的茶树苗膜脂过氧化和细胞程序性死亡[J]. 植物生理与分子生物学报, 2002, 28(4):292-298.
Su J W, Wang X P. Cadmium-induced membrane lipid peroxidation and programmed cell death in tea seedling[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(4):292-298.
- [29] 谭树华, 邓先余, 蒋文明, 等. 高浓度铬对克氏原螯虾抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1356-1360.
Tan S H, Deng X Y, Jiang W M, et al. Effects of high level chromium on antioxidant enzyme system in gill and hepatopancreas of *Procambarus clarkia* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1356-1360.
- [30] Skórzyńska-polit E, Drazkiewicz M, Krupa Z. The activity of the antioxidative system in cadmium-treated *Arabidopsis thaliana* [J]. *Biologia Plantarum*, 2003/4, 47, 1:71-78.

致谢:感谢山西大学应用生物学研究所龙文敏硕士、郑先云博士等在实验中给予的帮助。