

铬在中华稻蝗(*Oxya chinensis*)体内的累积及对抗氧化系统的影响

王 跃¹, 李丽君², 张育平¹, 孙 鸽¹, 郭亚平³, 马恩波¹

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

摘 要:昆虫体内的重金属主要是通过消化途径实现代谢过程的。本文中以不同浓度六价铬(Cr^{6+})溶液(0、7.5、15、30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)培育的小麦对中华稻蝗(*Oxya chinensis*)从4龄若虫开始进行慢性染毒,待其发育到成虫时分别测定虫体、粪便、小麦叶片内的Cr含量以及成虫体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和总抗氧化能力(T-Aoc)。结果显示,生长于0、7.5、15、30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{6+} 溶液中的小麦,其叶片中Cr浓度分别为5.77、6.85、9.88、18.33 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。随着 Cr^{6+} 浓度的增加,虫体内和粪便中Cr的累积量也逐渐增大,在30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值。中华稻蝗体内SOD活力随着处理浓度的增加,变化不明显,未达到显著水平。而CAT、GPx活力和T-Aoc随着处理浓度的增加,呈先升高后降低的趋势,在7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值。本文结果表明,中华稻蝗体内的Cr含量随着染毒浓度的增加而增大,是对环境中重金属Cr污染的一种间接反应。通过测定中华稻蝗体内的Cr含量,可以对环境中Cr污染进行评估;同时,中华稻蝗抗氧化酶系统在机体防御过氧化物损伤方面起着重要作用。

关键词:中华稻蝗;铬(Cr);超氧化物歧化酶(SOD);过氧化氢酶(CAT);谷胱甘肽过氧化物酶(GPx);总抗氧化能力(T-Aoc)

中图分类号:X503.223 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2281-06

Accumulation of Chromium in *Oxya chinensis* and Its Effects on the Antioxidant System

WANG Yue¹, LI Li-jun², ZHANG Yu-ping¹, SUN Ge¹, GUO Ya-ping³, MA En-bo¹

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

Abstract: Heavy metals in insects are mainly achieved by the ways of metabolism through digestion. In the present study, *Oxya chinensis*, from the fourth-instar nymphs to adults, were fed on wheat seedlings cultured in Cr^{6+} solutions of different contents (0, 7.5, 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The Cr contents were determined in the wheat seedlings, the body and droppings of *O. chinensis*, and the superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx) activity and total antioxidant capacity (T-Aoc) were measured in *O. chinensis*. The Cr contents in wheat seedlings were 5.77, 6.85, 9.88 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and 18.33 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, when they were cultured in different Cr^{6+} contents (0, 7.5, 15 and 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The Cr contents increased gradually in the *O. chinensis* body and droppings with the increasing of Cr^{6+} content, and the Cr contents reached maximum at 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{6+} treatment group. With the increasing of Cr^{6+} contents, the activity of SOD remained almost unchanged, however, the T-Aoc and the activity of CAT, GPx firstly increased and then decreased, and the activities reached the maximum in 7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In conclusion, the Cr content in the body of *O. chinensis* is the indirect reflect for the heavy metal pollution in the environment. Therefore, through the determination of Cr contents in *O. chinensis*, the heavy metal pollution in environment can be evaluated. The antioxidant system in *O. chinensis* plays important functions for the organism against peroxidation.

Keywords: *Oxya chinensis*; chromium (Cr); superoxide dismutase (SOD); catalase (CAT); glutathione peroxidase (GPx); total antioxidant capacity (T-Aoc)

收稿日期:2010-08-31

基金项目:国家自然科学基金(30810103907, 31071980);山西省留学基金(2008114);山西省农业科学院博士基金(YBSJJ0702)

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

李丽君对本研究贡献相同。

通讯作者:马恩波 E-mail:maenbo2003@sxu.edu.cn

中华稻蝗在我国大部分农区都有分布,尤以水稻田中分布较多,是山西省重要的农业害虫。当其生存环境中存在重金属污染时,重金属可通过污染土壤-栽培水稻-植食性动物这种食物链方式累积^[1]。山西省是我国重要的能源重化工基地,重金属 Cr 污染严重,王晋生等人有过报道^[2]。Cr 在自然界中存在的两种稳定状态是 3 价铬(Cr^{3+})和 6 价铬(Cr^{6+}),其毒性主要是由 Cr^{6+} 引起的^[3-5]。据报道,某些 Cr^{6+} 的化合物在生物体内具有致癌作用,皮肤接触会造成皮肤溃疡和过敏反应,长期接触铬酸盐可导致味觉和嗅觉减退以至消失,手掌皮肤干裂,还会出现肠胃症状如胃痛、胃炎甚至消化道溃疡等症状^[6]。近年来,Cr 对植物生长发育以及对动物抗氧化酶系统的影响均有大量的报道,如马丽苹等通过用不同浓度的 Cr^{6+} 溶液培育小麦,发现高浓度的 Cr^{6+} 溶液对小麦的发芽有抑制作用^[7]。李丽君等用不同浓度的 Cr^{6+} 溶液培育玉米,发现高浓度的 Cr^{6+} 溶液对玉米的发芽有抑制作用^[8]。Nudler 等通过对雄性小鼠进行 Cr^{6+} 染毒实验,发现 Cr^{6+} 对小鼠的下丘脑和垂体前叶腺产生的过氧化损伤甚至有可能影响小鼠的内分泌功能^[9],但关于 Cr 在昆虫体内的累积及抗氧化酶活性影响的报道甚少。

抗氧化酶系统包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)等。SOD 在消除体内反应产生的过氧化离子方面起重要作用,它可以清除 Cr^{6+} 引起的超氧化物阴离子(O_2^-)。CAT 可促使 H_2O_2 分解为分子氧(O_2)和水(H_2O),清除体内的 H_2O_2 ,从而使细胞免于遭受 H_2O_2 的毒害。GPx 在催化 GSH 为 GSSG,使有毒的过氧化物还原成无毒的羟基化合物过程中起主要作用,同时促进 H_2O_2 的分解,保护细胞膜的结构及功能不受过氧化物的干扰及损害^[10-11],SOD、CAT、GPx 均为生物防御体系的关键酶。总抗氧化能力(T-Aoc)代表整个机体的抗氧化水平,是体内的各种抗氧化酶共同作用的结果^[12]。本文通过 Cr^{6+} 溶液栽培小麦,喂食中华稻蝗,对慢性染毒后虫体内 Cr 的累积量进行分析,同时对虫体抗氧化酶进行测定,以揭示 Cr 污染条件下机体的毒理学效应,本研究对探讨 Cr 毒性机理具有一定意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 设备与试剂

原子吸收分光光度计(SHIMADZUAA-6300,日本);

酶标仪(Spectra MAX 190,美国);重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$),分析纯;SOD、CAT、GPx、T-Aoc 试剂盒,南京建成生物公司;小麦种子:晋太 0704,山西省农科院作物所提供。

1.1.2 实验动物

供试的中华稻蝗于 2009 年 8 月采自山西省代县(东经 112.94° ,北纬 39.06°),挑选发育期一致的 4 龄若虫在室内饲养于纱笼中。

1.2 实验方法

1.2.1 小麦种植

小麦种子浸泡 12 h 发芽后,置于铺有吸水纸的塑料盘内。盘内加入不同浓度的 Cr^{6+} 溶液。根据预实验结果,在保证小麦可以正常生长情况下,将 Cr^{6+} 浓度分别设置为 0、7.5、15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每个处理设 3 个重复。小麦培育期间根据情况每日加入一定体积的 Cr^{6+} 溶液,7 d 即可喂食中华稻蝗。

1.2.2 慢性染毒

将挑选出的 4 龄若虫置于 12 个纱笼内室温下饲养,每笼 100 头,用不同浓度 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 溶液培育的麦苗放入纱笼中进行喂养,每个处理 3 个重复,直至中华稻蝗发育至成虫随机取样。

1.2.3 取样及 Cr 含量测定

中华稻蝗发育至成虫后取样:每个重复取雌雄各 3 头。自养虫笼内取中华稻蝗粪便 5 g 放于 10 mL 离心管内,每个处理浓度组取 3 管。小麦培育后 7 d,用剪刀从根部剪断,取 30 根放于取样袋中,每个浓度组取 3 袋。

分别将中华稻蝗成虫、所排出的粪便以及染 Cr^{6+} 麦苗叶片放于 60°C 烘箱中烘至恒重后,在 HNO_3 + HClO_4 体系中消化。将消化液定容后,用原子吸收分光光度计测定 Cr 浓度,测定结果以 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示。

1.2.4 酶活力测定

虫体样本称重后,以 1:9(W/V)加入 Tris-HCl 匀浆液冰浴中匀浆,将匀浆液于 4°C 离心(15 000 g, 20 min)后,收集并分装上清液用于测定。

抗氧化酶(SOD、CAT、GPx、T-Aoc)的测定均按南京建成试剂盒说明进行,蛋白测定采用 BCA 法,每种测定均重复 3 次。

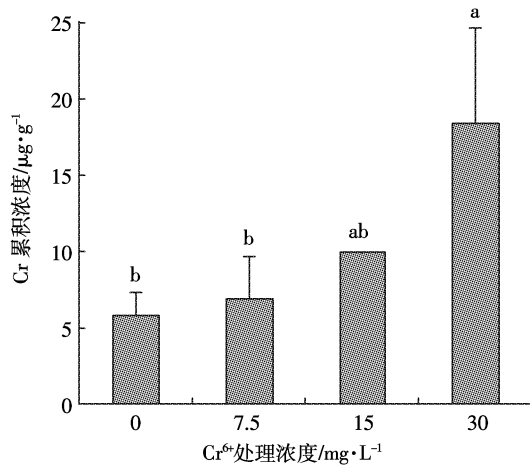
1.2.5 数据处理

实验结果以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示,采用 SPSS11.5 统计软件对结果进行方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan's 和 LSD)。

2 结果与分析

2.1 小麦叶片中 Cr 浓度

图 1 为不同浓度 Cr^{6+} 处理下麦苗中 Cr 的累积浓度。由图中可以看出,随着处理浓度的增大,麦苗中 Cr 的累积浓度不断升高,在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处达到最大值。 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组与对照组和 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组间差异显著 ($P < 0.05$),对照组、 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组和 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组间差异不显著 ($P > 0.05$)。



柱状图上方有相同字母标识说明各样区间无显著差异(LSD法, $P > 0.05$)。下同。

图 1 小麦叶片中铬的浓度

Figure 1 Concentrations of Cr in the wheat leaves

2.2 虫体中 Cr 的累积

图 2 为不同浓度 Cr^{6+} 处理下虫体中 Cr 的累积。由图中可以看出,随着处理浓度的增大,虫体中 Cr 的累积量不断升高,在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处达到最大值。 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

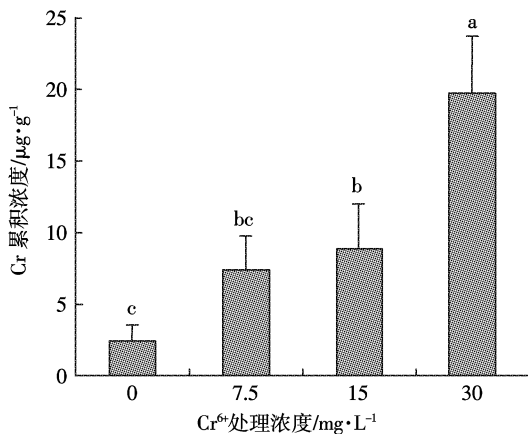


图 2 中华稻蝗体内铬的浓度

Figure 2 Concentrations of Cr in the body of *O. chinensis*

2.3 粪便中 Cr 的累积浓度

图 3 为 Cr^{6+} 处理下中华稻蝗粪便中 Cr 的累积浓度。由图中可以看出,随着处理浓度的增大,粪便中 Cr 的累积浓度逐渐升高。各处理组均与对照组间差异显著 ($P < 0.05$), 3 个处理组间 Cr 累积浓度差异显著 ($P < 0.05$)。

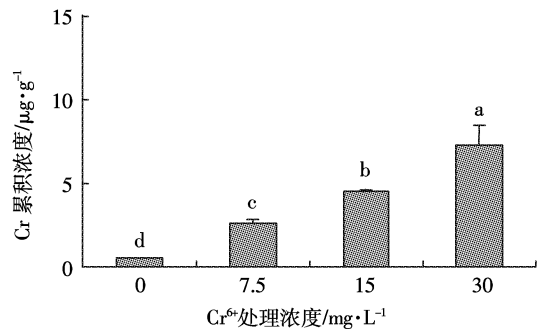


图 3 中华稻蝗粪便内铬的浓度

Figure 3 Concentrations of Cr in the droppings of *O. chinensis*

2.4 SOD 活力

从图 4 中可以看出,随着 Cr^{6+} 处理浓度的逐渐增大,中华稻蝗体内的 SOD 活力变化并不明显,对照组与 3 个处理组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

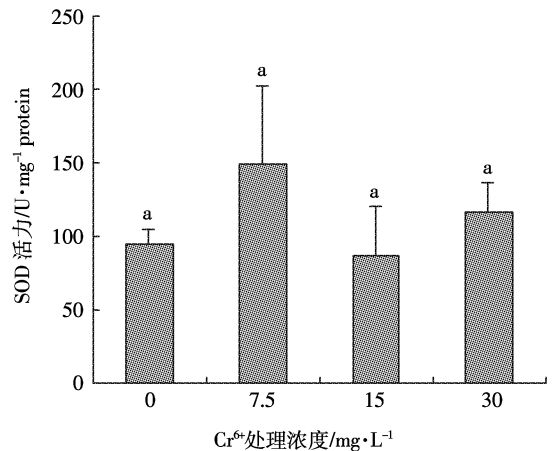
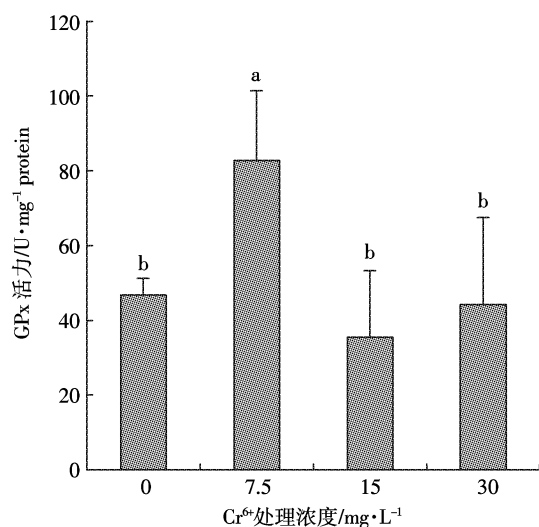


图 4 Cr^{6+} 对中华稻蝗 SOD 活力的影响

Figure 4 Effect of Cr^{6+} on SOD content in *O. chinensis*

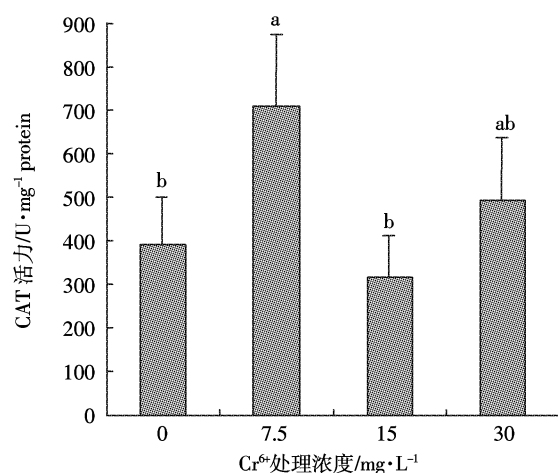
2.5 GPx 活力

从图 5 中可以看出,随着 Cr^{6+} 处理浓度的逐渐增大,GPx 活力呈先增高、后减小的趋势。当 Cr^{6+} 的处理浓度在 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,GPx 活力达到最大值,与对照组、 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组的 GPx 活力差异显著 ($P < 0.05$)。当处理浓度在 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,GPx 活力与对照组相比差异不显著 ($P > 0.05$)。

图 5 Cr⁶⁺对中华稻蝗 GPx 活力的影响Figure 5 Effect of Cr⁶⁺ on GPx content in *O. chinensis*

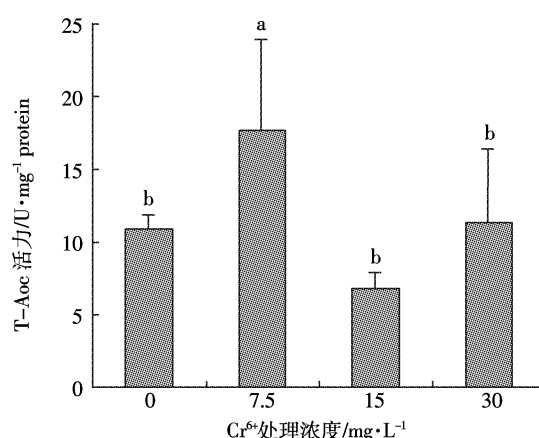
2.6 CAT 活力

从图 6 中可以看出,随着 Cr⁶⁺处理浓度的逐渐增大,CAT 活力呈先增高,后降低的趋势。CAT 活力在 Cr⁶⁺浓度为 7.5 mg·L⁻¹ 时达到最大值,与对照组和 15 mg·L⁻¹ 组相比差异显著 ($P<0.05$)。当 Cr⁶⁺浓度为 15 mg·L⁻¹ 和 30 mg·L⁻¹ 时,CAT 活力与对照组差异不显著 ($P>0.05$)。

图 6 Cr⁶⁺对中华稻蝗 CAT 活力的影响Figure 6 Effect of Cr⁶⁺ on CAT content in *O. chinensis*

2.7 T-Aoc

由图 7 中可以看出,随着 Cr⁶⁺浓度的逐渐增大,T-Aoc 呈先增高、后降低的趋势。当 Cr⁶⁺浓度在 7.5 mg·L⁻¹ 时,T-Aoc 达到最大值,与对照组、15 mg·L⁻¹ 组和 30 mg·L⁻¹ 组相比差异显著 ($P<0.05$)。当 Cr⁶⁺处理浓度在 15 mg·L⁻¹ 和 30 mg·L⁻¹ 时,T-Aoc 与对照组差异不显著 ($P>0.05$)。

图 7 Cr⁶⁺对中华稻蝗 T-Aoc 活力的影响Figure 7 Effect of Cr⁶⁺ on T-Aoc content in *O. chinensis*

3 讨论

近年来,环境污染日益严重,重金属污染也成为人们关注的焦点。在污染农田中,农作物的根系和茎叶具有较强的重金属富集能力^[13-14]。本文图 1 显示,以不同浓度 Cr⁶⁺溶液培育的小麦,其叶片中 Cr 的累积量随着 Cr⁶⁺溶液浓度的增大而升高。表明小麦对于 Cr 有一定的富集能力,Cr⁶⁺通过小麦根系进入植物体,在其体内积累。从图 2 可以看出,中华稻蝗在取食不同浓度 Cr⁶⁺溶液培育的小麦后,其体内 Cr 的累积量随着小麦中 Cr 的累积量增加而提高。结果表明中华稻蝗能够忍受一定的重金属 Cr 污染。Gillis 等对摇蚊的研究表明,摇蚊幼虫对重金属 Cd 有一定的耐受力^[15]。Zwereva 等发现甲虫对重金属 Cu 和 Ni 具有耐受性^[16]。从图 3 可以看出,随着染毒浓度的提高,中华稻蝗排出体外的粪便中 Cr 含量逐渐增大,说明中华稻蝗对于环境中的重金属毒害具有自我调节、保护能力,可以通过食物消化代谢方式排出一部分重金属 Cr。本文通过在实验室条件下模拟自然环境中重金属 Cr 在生态系统中的传递途径,研究结果表明重金属 Cr 可以通过食物链的方式传递到中华稻蝗体内。

本文图 4 所示,随着 Cr⁶⁺浓度的逐渐增加,中华稻蝗 SOD 活力基本保持在一定范围内,说明在实验范围内,中华稻蝗体内的 SOD 活力受 Cr⁶⁺影响不大。这与 Cr⁶⁺对草鱼肝脏 SOD 活力的影响^[17]以及 Cr⁶⁺对小鼠 SOD 活力的影响结果不一致^[18]。可能的原因是中华稻蝗 SOD 对 Cr⁶⁺不敏感,这一结果还有待进一步证明。

低剂量的 Cr⁶⁺(7.5 mg·L⁻¹) 可诱导 H₂O₂ 产生,CAT 活力随之提高,有利于降低 H₂O₂ 对机体产生的

危害。随着 Cr^{6+} 染毒浓度的提高, CAT 活力开始下降, 一方面由于机体产生抗氧化酶的能力有限, 另一方面由于过量 Cr^{6+} 诱导产生的过氧化物离子对机体的抗氧化能力造成损害, 说明低剂量 Cr^{6+} 对 CAT 活力有诱导作用, 高剂量 Cr^{6+} 对 CAT 活力有抑制作用。这与其他人的报道一致, 如李丽君在 Cd 对中华稻蝗的染毒实验中发现, CAT 活力随染毒浓度的增加呈现先升高, 后降低的趋势^[18]。吴昊等在 Cd 对 4 龄中华稻蝗的染毒实验表明, CAT 活力随处理浓度的增加呈现先升高、后降低的趋势^[19]。本实验结果显示, 随着 Cr^{6+} 浓度的继续升高, CAT 活力未继续下降, $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组间差异不显著。分析其可能的原因是, 高剂量 Cr^{6+} 诱导产生金属硫蛋白(MT), 而 MT 活力中心与重金属离子结合, 减轻 Cr 对机体的抗氧化损害, 使 CAT 活力基本不变。

GPx 活力中心是硒代半胱氨酸(Se-Cys), 它是一种分布在细胞质中的含硒酶, GPx 的生物学功能主要是清除脂类过氧化物以及 H_2O_2 ^[20]。低剂量 Cr^{6+} 染毒后, 中华稻蝗体内产生大量的过氧化物, 如 H_2O_2 , GPx 活力提高可及时清除体内过量的 H_2O_2 , 保持 H_2O_2 产生与清除的平衡。在高 Cr^{6+} 浓度范围内, Cr^{6+} 的毒害作用可能超过了机体的承受力, GPx 活力中心被破坏, 导致 GPx 活力减小, 说明低剂量 Cr^{6+} 对 GPx 活力有诱导作用, 高剂量 Cr^{6+} 对 GPx 活力有抑制作用, 这在 Cd 对中华稻蝗 GPx 活力影响中亦有报道^[11]。随着染毒浓度的提高, GPx 活力基本不变, 这也可能是过量的 Cr 导致 MT 表达量增加, 结合大量 Cr, 使 GPx 活力保持稳定, 但还有待进一步的验证。

T-Aoc 代表机体总的抗氧化能力, 中华稻蝗对于环境中 Cr 污染引起的过氧化物超标有一定的自我调节能力。在低剂量 Cr^{6+} 范围内, 体内产生过多的过氧化物导致细胞的氧化损伤, 中华稻蝗通过产生更多的抗氧化酶如 CAT 和 GPx 等, 以降低体内的过氧化物浓度, 避免其对机体造成损害。但这种调节能力是有限的, 当继续提高 Cr^{6+} 的浓度后, 机体已不能及时修复 Cr^{6+} 引起的过氧化物损伤, 因而造成机体抗氧化能力下降, 说明低剂量 Cr^{6+} 对 T-Aoc 有诱导作用, 高剂量 Cr^{6+} 对 T-Aoc 有抑制作用。已有研究中也类似现象, 如 Khaper 等报道, 生物体可以通过体内 SOD、GPx、CAT 减轻过氧化物损伤^[21]; Sarkar 等报道, 生物体对重金属的耐受性有一定限度, 超过一定范围, 重金属引起的氧化性可对生物体造成致命性伤害^[22]。 Cr^{6+} 浓度继续升高, 总抗氧化能力基本不变, 其原因可能

是 Cr^{6+} 诱导机体产生 MT 结合了一部分 Cr^{6+} , 但还有待进一步的验证。

4 结论

总之, 当环境中存在 Cr^{6+} 时, Cr^{6+} 可累积于中华稻蝗体内, 并对 SOD、CAT、GPx 活力和 T-Aoc 产生不同影响。在低浓度范围内 ($\leq 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Cr^{6+} 对 CAT、GPx 活力和 T-Aoc 起诱导作用, CAT、GPx 降低 Cr^{6+} 对中华稻蝗的氧化损伤; 在高浓度范围内则起抑制作用, CAT、GPx 不能起到保护中华稻蝗免受 Cr^{6+} 产生的氧化损伤。本文通过测定中华稻蝗体内及粪便中的重金属 Cr 含量及其体内抗氧化系统的应答反应可以间接判断水稻田中 Cr 的污染状况, 同时还可以揭示植食性动物受 Cr 污染后机体的毒理学效应。

参考文献:

- [1] Loumbourdis N S. Heavy metal contamination in a lizard, *Agama stellio 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.
- [2] 王晋生, 姚娟娟, 董淑爱, 等. 六价铬污染井水对居民健康影响的调查[J]. 中华预防医学杂志, 1990, 24(1): 6-8.
WANG Jin-sheng, YAO Jiao-juan, DONG Shu-ai, et al. Effects of Cr^{6+} -polluted well-water on inhabitant's health[J]. *The Journal of Preventive Medicine*, 1990, 24(1): 6-8.
- [3] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 89-92.
LIU Qing, WANG Zi-jian, TANG Hong-xiao. The research progress for morphology, toxicity and biological effectiveness of heavy metals[J]. *Environment Science*, 1996, 17(1): 89-92.
- [4] O'Brien T J, Ceryak S, Patierno S R. Complexities of chromium carcinogenesis: role of cellular response, repair and recovery mechanisms[J]. *Mutation Research*, 2003, 533(1-2): 3-36.
- [5] 考庆君, 吴坤. 铬的生物学作用及毒性研究进展[J]. 中国公共卫生, 2004, 20(11): 1398-1400.
KAO Qing-jun, WU Kun. The research progress for biological effects and toxicity of chromium[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2004, 20(11): 1398-1400.
- [6] 徐衍忠, 秦绪娜, 刘祥红, 等. 铬污染及其生态效应[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(增刊): 8-10, 28.
XU Yan-zhong, QIN Xu-na, LIU Xiang-hong, et al. The study of chromium pollution and ecological effects[J]. *Environment Science and Technology*, 2002, 25(suppl): 8-10.
- [7] 马丽苹, 张敏, 康怀彬. Cr^{6+} 对小麦种子萌发及生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2004, 10(6): 27-28.
MA Li-ping, ZHANG Min, KANG Huai-bin. Effect of Cr^{6+} on wheat seed germination and growth[J]. *Auhui Agricultural Science Bulletin*, 2004, 10(6): 27-28.

- [8] 李丽君, 郑普山, 周怀平, 等. 铬对玉米种子萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2001, 29(2): 32-34.
LI Li-jun, ZHENG Pu-shan, ZHOU Huai-ping, et al. Effect of chromium on seed germination[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2001, 29(2): 32-34.
- [9] Nudler S I, Quinteros F A, Miler E A, et al. Chromium VI administration induces oxidative stress in hypothalamus and anterior pituitary gland from male rats[J]. *Toxicology Letters*, 2009, 185(3): 187-192.
- [10] 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 Yi-ping, GONG He. The research progress of insect antioxidant system[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 1998, 10(5): 240-243, 221.
- [11] 孙 鸽, 杨美玲, 吴海花, 等. 镉染毒对中华稻蝗 SOD、GPx 活力和 MDA 含量的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2009, 32(S1): 119-122.
SUN Ge, YANG Mei-ling, WU Hai-hua. Effects on SOD, GPx activity and MDA content in *Oxya chinensis*[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2009, 32(S1): 119-122.
- [12] 马向明, 杨在宾, 杨维仁, 等. 不同水平维生素 A 对肉牛机体抗氧化能力的影响[J]. 畜牧兽医杂志, 2005, 24(5): 4-9.
MA Xiang-ming, YANG Zai-bin, YANG Wei-ren, et al. Effects of different vitamin A level on antioxidant ability of beef cattle[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2005, 24(5): 4-9.
- [13] 王海鸥, 钟广蓉, 刘晓峰, 等. 小麦在铜、镉胁迫下体内含硫基物质对解毒机制的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(3): 158-161.
WANG Hai-ou, ZHONG Guang-rong, LIU Xiao-feng, et al. The study on sulfhydryl compound to the mechanism of detoxification in wheat under copper and cadmium stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(3): 158-161.
- [14] 万 敏, 周 卫, 林 葆. 镉积累不同类型的小麦细胞镉的亚细胞和分子分布[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 671-675.
WAN Min, ZHOU Wei, LIN Bao. Subcellular and molecular distribution of cadmium in two wheat genotypes differing in shoot/root Cd partitioning[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6): 671-675.
- [15] Gillis P L, Wood C M. Investigating a potential mechanism of Cd resistance in *Chironomus riparius* larvae using kinetic analysis of calcium and cadmium uptake[J]. *Aquat Toxicol*, 2008, 83(3): 180-187.
- [16] Zwereva E, Serebrov V, Glupov V, et al. Activity and heavy metal resistance of non-specific esterases in leaf beetle *Chrysomela lapponica* from polluted and unpolluted habitats[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2003, 135(4): 383-391.
- [17] 耿晓修, 丁诗华, 孙翰昌, 等. 六价铬对草鱼肝脏 SOD 和 GSH-Px 活力的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 333-336.
GENG Xiao-xiu, DING Shi-hua, SUN Han-chang, et al. Effects of hexavalent chromium on sod and GSH-Px activities in liver of *ctenopharyngodon idellus*[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2006, 28(2): 333-336.
- [18] Li L J, Zhang F, Liu X M, 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.
- [19] 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 Hao, SUN Ge, WU Hai-hua, et al. Effect of cadmium on antioxidant enzymes of fourth-instar *Oxya chinensis*[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(5): 829-831.
- [20] 夏世钧, 吴中亮. 分子毒理学基础[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2001: 87.
XIA Shi-jun, WU Zhong-liang. The basis of molecular toxicology[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001: 87.
- [21] 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.
- [22] 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]. *Biometals*, 1998, 11(2): 153-157.