

## 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤急性毒性及解毒代谢的影响

彭方 王茜 王兰

(山西大学生命科学学院, 太原 030006)

### EFFECT OF DELTAMETHRIN ON ACUTE TOXICITY AND DETOXIFICATION METABOLISM IN WATER FLEA, *MOINA MACROCOPA*

PENG Fang, WANG Qian and WANG Lan

(College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

关键词: 多刺裸腹蚤; 半致死浓度; 丙二醛; 细胞色素 P450 酶系; 谷胱甘肽硫转移酶; 谷胱甘肽过氧化物酶; 溴氰菊酯

**Key word:** *Moina macrocopa*; Half-lethal concentration( $LC_{50}$ ); Maglonydiadehyde; CYP450; Glutathione peroxidase; Glutathione S-transferase; Deltamethrin

中图分类号: X503.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2013)03-0530-05

溴氰菊酯(Deltamethrin, DM)属常用拟除虫菊酯类杀虫剂, 由于其低毒性和易分解性, 目前被广泛应用于农业害虫的控制<sup>[1, 2]</sup>。由于雨水、河流的冲刷, DM 会随水流进入江河、湖泊。虽然这种农药最初被认为是无毒的, 但是目前大量研究证明了它的毒性<sup>[3-6]</sup>。因此, 溴氰菊酯在水环境中的残留量以及对水生生物的毒性作用已经成为许多研究者关注的热点。

Iqbal Sayeed, *et al.*<sup>[7]</sup>用溴氰菊酯染毒淡水鱼(*Channa punctatus* Bloch), 结果发现溴氰菊酯可以引起其鳃、肝胰腺和肾组织脂质过氧化酶水平的升高。胡琼予等<sup>[8]</sup>研究了溴氰菊酯对鲫鱼(*Carassius auratus*)的毒性效应, 结果发现DM 会对鲫鱼谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GPX)和谷胱甘肽硫转移酶(Glutathione S-transferase, GST)活性产生影响, 并且会引起蛋白质和 DNA 的交联反应。研究表明<sup>[9, 10]</sup>, 溴氰菊酯对水生生物的毒性为高毒, 特别是浮游生物, 其对溴氰菊酯的敏感性顺序依次为枝角类>桡足类>原生动物>轮虫<sup>[11]</sup>。多刺裸腹蚤属于节肢动物门、甲壳纲、枝角类, 生活周期短、易采集、分布广、实验室条件下可进行稳定的孤雌生殖<sup>[12, 13]</sup>。本实验选用太原市的优势种群多刺裸腹蚤(*Moina macrocopa*)作为实验材料, 通过研究溴氰菊酯胁迫对其急性毒性, 体内丙二醛(MDA)含量及3种解毒代谢酶(细胞色素 P450、GST 和

GPX)活力的影响, 分析溴氰菊酯对枝角类的毒性作用, 并筛选灵敏的生化指标用于反映水环境中 DM 的污染状况。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料

多刺裸腹蚤(以下简称“裸腹蚤”), 采自山西省太原市小店区二里河, 在实验室 20—25℃水温条件下培养, 经过三代以上孤雌生殖, 敏感度测试达到了中华人民共和国国家标准《水质、物质对蚤类(大型蚤)急性毒性测定方法》(GB/T13266-91)<sup>[14]</sup>。实验用为1日龄幼蚤。

#### 1.2 实验试剂

溴氰菊酯(浓度: 25 g/L)为南京红太阳有限公司生产的乳油制剂, 根据其有效成分用蒸馏水配制成农药储备液, 实验时将储备液稀释成所需的不同浓度使用。细胞色素 P450 酶系总活性荧光定量检测试剂盒购自上海杰美基因试剂公司。MDA、GPX、GST 和考马斯亮蓝试剂盒购自南京建成生物公司。

#### 1.3 实验仪器

多功能酶标仪(SpectraMax M5, California, USA)、恒温金属浴(CHB100, CHNIA)、电子分析天平(Model ESJ120-4)、冷冻离心机(Thermo Scientific Jouan MR23i)、-80℃低温冰箱(Thermo, Fofma 702 Series, USA)。

收稿日期: 2012-09-26; 修订日期: 2013-02-09

作者简介: 彭方(1987—), 女, 山西忻州人; 硕士研究生; 主要从事环境毒理方面的研究。E-mail: shanxitll@126.com

通信作者: 王兰(1960—), 教授; 主要研究典型环境污染物的毒性效应及分子机制。E-mail: lanwang@sxu.edu.cn

## 1.4 实验设计

**急性毒性** 选取生长状况良好的强壮 1 日龄幼蚤, 分别接种到盛有不同浓度溴氰菊酯(0、0.006、0.013、0.025、0.050、0.100  $\mu\text{g/L}$ )溶液的烧杯(250 mL)中, 每个烧杯 10 只, 设三组平行三次重复, 24、48h 后按心脏停止跳动为裸腹蚤死亡终点, 分别统计各浓度组的死亡率。

**酶活的测定** 根据溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 24h 半致死浓度( $LC_{50}$ )1/32、1/16、1/8、1/4 和 1/2, 设置 5 个溴氰菊酯浓度组和对照组, 处理时间为 12h 和 24h。选取同一条件下培养的 1 日龄幼蚤同一时间进行染毒, 设三组平行三次重复, 染毒处理完毕后, 使用 200 目滤网将水蚤过滤, 双蒸水迅速清洗残留毒液, 用滤纸吸干多余水分, 放入 1.5 mL 的 EP 管后置于液氮罐中。取样完毕后将液氮罐中的材料放入  $-80^{\circ}\text{C}$  冰箱保存。实验时加入 pH 7.2 PBS 溶液冰冻匀浆, 匀浆液经  $4^{\circ}\text{C}$  3500 g 离心 10min 后取上清, 待测。采用 TBA 显色法测定丙二醛(MDA)含量, 荧光法定量测定样品中细胞色素 P450 酶系总活性(CYP-ECOD)活性, CDNB 法测定 GST 活性, DNTB 法测定 GPX 活性, 蛋白质含量采用 Bradford 方法<sup>[15]</sup>, 以牛血清白蛋白为标准蛋白。利用美国 MD 公司 SpectraMax M5 酶标仪进行活力和含量的测定。

## 1.5 数据处理

24h 和 48h  $LC_{50}$  采用概率单位法进行数据处理。SPSS16.0 统计分析软件对实验数据进行分析, 结果采用单因素方差分析(One-Way ANOVA), 并应用 Dunnett 法将处理组和对照组进行比较分析, 与对照组比较,  $P < 0.05$  为差异显著,  $P < 0.01$  为差异极显著。

## 2 结果

### 2.1 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤的急性毒性试验

实验观察发现, 不同浓度(0、0.06、0.13、0.25、0.50、1.00  $\mu\text{g/L}$ )溴氰菊酯染毒多刺裸腹蚤 24h、48h 后, 蚤体的死亡率表现出随处理浓度的增大及处理时间的延长而增加的趋势。在实验中观察到多刺裸腹蚤中毒症状主要表现为: 游动缓慢、外壳膨胀发白、触角摆动变慢。通过概率单位法求得溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 24h、48h  $LC_{50}$  分别为 0.210、0.184  $\mu\text{g/L}$ (表 1)。

### 2.2 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤脂质过氧化水平的影响

随着溴氰菊酯处理浓度和时间的增加, MDA 含量也随之升高(图 1)。在 12、24h, 浓度为 0.006  $\mu\text{g/L}$  时, MDA 含量较对照组无明显变化( $P > 0.05$ )。在 0.013—0.100  $\mu\text{g/L}$  各个浓度组处理 12、24h 后, MDA 含量均显著上升( $P < 0.05$ )。其中, 0.100  $\mu\text{g/L}$  浓度组处理 24h 后, 机体 MDA 含量上升至最大值, 与对照组相比差异极显著( $P < 0.01$ )。

### 2.3 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 CYP-ECOD 的影响

溴氰菊酯染毒后, 各处理组 CYP-ECOD 活性受到不同程度的影响(图 2)。当 DM 浓度为 0.006  $\mu\text{g/L}$ , 处理 12、24h 后, CYP-ECOD 活性较正常组开始显著升高( $P < 0.05$ ), 当浓度升高为 0.013  $\mu\text{g/L}$ , 两个时间段 CYP-ECOD 活性较对照组极显著升高( $P < 0.01$ )。随着染毒浓度和处理时间的增加, 在浓度为 0.100  $\mu\text{g/L}$ , 染毒 12h 后, CYP-ECOD 较对照组无显著差异( $P > 0.05$ ), CYP-ECOD 活性恢复到正常组水平。

### 2.4 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 GST 活力的影响

在不同浓度溴氰菊酯作用后, GST 活力呈现低促高

表 1 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 24h、48h  $LC_{50}$

Tab. 1  $LC_{50}$  of deltamethrin for *Moina macrocopa* in 24 and 48 hours

时间 Time	半致死浓度 $LC_{50}$ ( $\mu\text{g/L}$ )	回归方程 Regression equation	$r$ 值	95%置信区间 95% confidence interval	
				Lower	Upper
24h	0.210	$y=0.898+1.327x$	0.91	0.1048	0.1380
48h	0.184	$y=0.602+0.818x$	0.93	0.3371	0.4158

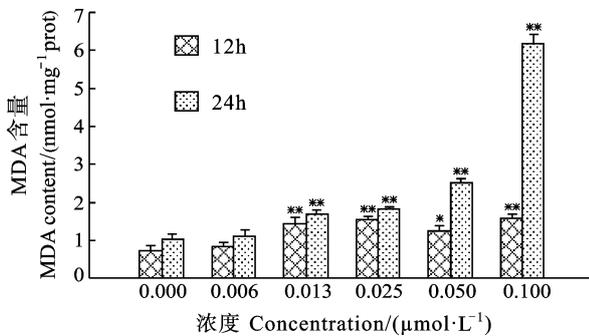


图 1 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of Deltamethrin on MDA content in *M. macrocopa*  
\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$  (Mean  $\pm$  SD,  $n=3$ ); 下同 the same applies below

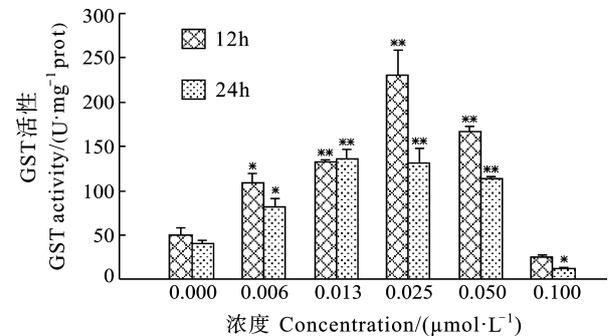


图 2 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 CYP-ECOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of Deltamethrin on CYP-ECOD activity in *M. macrocopa*

抑的变化规律(图3)。0.006  $\mu\text{g/L}$  浓度处理 12、24h, 裸腹蚤 GST 活力较对照组显著上升( $P<0.05$ )。0.013—0.050  $\mu\text{g/L}$  各个浓度组处理 12、24h, GST 活力极显著上升( $P<0.01$ )。而 DM 浓度升高为 0.100  $\mu\text{g/L}$ , 处理 24h 后, GST 活力较对照组显著降低( $P<0.05$ )。

### 2.5 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 GPX 活力的影响

在低浓度溴氰菊酯 0.006、0.013  $\mu\text{g/L}$  处理裸腹蚤 12、24h 后, GPX 活力随着浓度的增加与正常组相比有升高的趋势(图4), 0.025  $\mu\text{g/L}$  浓度处理 12、24h 和 0.050  $\mu\text{g/L}$  处理 12h 后, GPX 活力表现为极显著上升( $P<0.01$ ), 但当溴氰菊酯浓度升高为 0.100  $\mu\text{g/L}$  时, GPX 活力较对照组极显著下降( $P<0.01$ )。

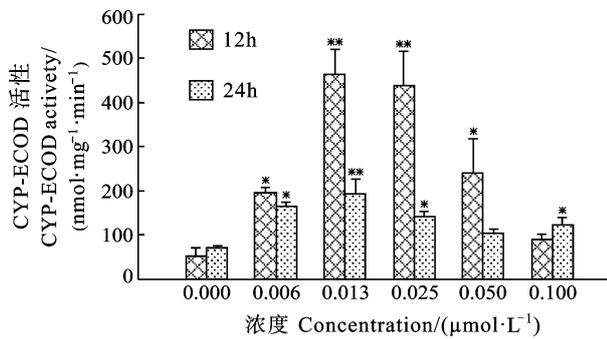


图3 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 GST 活性的影响

Fig. 3 Effects of Deltamethrin on GST activity in *M. macrocopa*

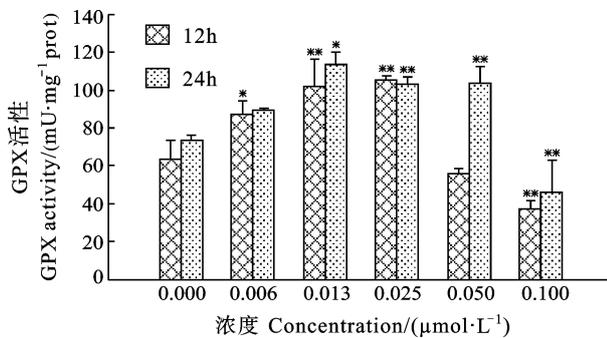


图4 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤 GPX 活性的影响

Fig. 4 Effects of Deltamethrin on GPX activity in *M. macrocopa*

## 3 讨论

### 3.1 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤的急性毒性

通过溴氰菊酯对多刺裸腹蚤的急性毒性实验, 测得其对裸腹蚤 24、48h  $LC_{50}$  分别为 0.210 和 0.184  $\mu\text{g/L}$ 。当多刺裸腹蚤暴露于较低浓度溴氰菊酯溶液中, 表现出四处游动, 试图离开烧杯, 而随着暴露浓度和时间的增加, 裸腹蚤游动变得迟缓, 活动明显受到抑制。其原因可能是化合物对生物体的毒性大小受污染物在体内积累量的影响, 也有可能是农药在生物体内代谢成活性更高的毒物, 从而导致正常的生物机体活动受到影响。

### 3.2 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤脂质过氧化水平的影响

溴氰菊酯在机体代谢过程中可能产生活性氧、自由基等物质, 这些物质攻击生物膜系统中多聚不饱和脂肪酸而诱导机体发生脂质过氧化反应, 并生成终产物 MDA。因此, MDA 含量可以间接反映机体的氧化损伤程度<sup>[16]</sup>。在本实验中, 当溴氰菊酯浓度为 0.006  $\mu\text{g/L}$  时, MDA 含量较对照组无显著差异( $P>0.05$ ), 而 0.013—0.100  $\mu\text{g/L}$  各浓度组 MDA 含量均显著升高( $P<0.05$ ), 且随溴氰菊酯浓度增加呈逐渐升高的趋势。机体清除自由基的抗氧化能力和氧化剂之间的平衡决定着 MDA 的生成量<sup>[7]</sup>, 而其代谢溴氰菊酯的过程中产生了大量的自由基等氧化物质, 这些物质打破了上述平衡, 导致自由基的大暴发, 从而引起机体的脂质过氧化, 并且其损伤程度随毒物浓度的升高而增加。在 0.100  $\mu\text{g/L}$  高浓度处理组, MDA 含量达到最大值, 较对照组差异极显著( $P<0.01$ ), 表明机体氧化损伤严重。浓度为 0.006  $\mu\text{g/L}$  的溴氰菊酯并未引起 MDA 含量的显著升高( $P>0.05$ ), 表明此浓度机体脂质过氧化水平较低, 0.013  $\mu\text{g/L}$  以上浓度机体即表现出明显的剂量效应关系, 证明多刺裸腹蚤对溴氰菊酯的敏感性较高。因此, MDA 含量可以灵敏反应农药对多刺裸腹蚤的氧化损伤的程度。

### 3.3 溴氰菊酯对多刺裸腹蚤解毒代谢指标的影响

拟除虫菊酯类物质进入机体, 细胞色素 P450 酶系首先发挥作用, 插入一个氧原子到疏水性分子, 使它们变得有活性或者具有亲水性, 但是此过程中可能会产生超氧化物  $O_2^-$ , 超氧阴离子  $O_2^-$  或者  $H_2O_2$ <sup>[17]</sup>, 这些物质可被 GST 和 GPX 代谢。因此, CYP450 是参与机体解毒代谢第一阶段的重要酶<sup>[18, 19]</sup>。实验结果显示, 当低浓度溴氰菊酯 0.006、0.013  $\mu\text{g/L}$  处理多刺裸腹蚤后, CYP-ECOD 活性被显著诱导( $P<0.05$ ), 此为机体产生的应激反应, 一方面可能是溴氰菊酯代谢产生的活性氧、自由基不断增加, 已合成的 P450 活性被诱导; 另一方面, P450 某些基因转录被激活, 导致其合成效率显著升高<sup>[17]</sup>。在 0.050  $\mu\text{g/L}$  处理 24h 和 0.100  $\mu\text{g/L}$  处理 12h 后, CYP-ECOD 活性较对照组无显著差异( $P>0.05$ ), 可能是由于 P450 酶系包括许多家族和亚家族, 其功能有相同也有不同<sup>[20]</sup>, 其中多种亚家族酶都具有 CYP-ECOD 活性, 一种或几种酶表达受到影响, 其他同工酶可继续发挥类似的催化活性。CYP-ECOD 活性具体由 P450 酶系中的哪些亚家族提供, 目前尚不清楚, 还有待于进一步研究证实。

在本实验中, GST 在低浓度溴氰菊酯的诱导下活性升高, 而随着浓度的升高, 其活性显著降低( $P<0.05$ )。本结果与溴氰菊酯胁迫后对罗非鱼(*Oreochromis aureus*) GST 的动态变化趋势一致<sup>[21]</sup>。在 12、24h, 0.006—0.050  $\mu\text{g/L}$  各个浓度处理组, GST 活力显著升高( $P<0.01$ ), 表明低浓度溴氰菊酯会诱导机体产生 GST, 主要用于催化谷胱甘肽与 P450 代谢过程中产生的自由基、过氧化物等发生反

应, 通过清除这些物质以减少与细胞内生物大分子结合的可能性, 保护机体免受氧化损伤<sup>[21]</sup>。0.100  $\mu\text{g/L}$  高浓度处理裸腹蚤 24h 后, GST 活力较对照组显著降低( $P < 0.05$ ), 表明代谢产生的活性氧(ROS)等氧化物已不能被机体及时清除, 其累积毒性严重抑制了 GST 的功能和合成, 裸腹蚤解毒代谢功能明显下降。但 Kostaropoulos, *et al.*<sup>[22]</sup> 在研究农药对昆虫的毒性作用时发现: GST 分子是作为一种结合蛋白与拟除虫菊酯结合, 以降低对参与解毒代谢的酶的毒性作用, 所以认为 GST 是通过一种隔离的机制增加机体的防御功能。然而, GST 这两种机制在多次裸腹蚤中还有待于证实。就本实验结果而言, GST 较适于作为水环境溴氰菊酯污染的监测指标。

GPX 是生物体内解毒代谢第二阶段另一种重要的抗氧化酶, 可催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  转变为  $\text{H}_2\text{O}$  或使脂质过氧化物还原为正常状态, 以防止细胞膜和其他生物组织受到破坏<sup>[23]</sup>。实验结果表明, 在 12、24h, 溴氰菊酯浓度为 0.013、0.025  $\mu\text{g/L}$  时, GPX 活性较对照组显著增强( $P < 0.05$ ), 说明低浓度溴氰菊酯作后, GPX 活性被激活, 溴氰菊酯代谢产生的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、脂质过氧化物等被清除, 避免机体受到氧化损伤; 随着浓度的增大, 溴氰菊酯的累积毒性增加, 机体产生的大量  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、自由基等不能被及时清除, GPX 结构可能遭到破坏, 而新生的 GPX 又难以合成, 致使在 0.100  $\mu\text{g/L}$  浓度组, GPX 活力迅速降至正常范围以下( $P < 0.01$ )。在整个处理过程中 GPX 呈现低浓度促进高浓度抑制的毒理学效应。

总之通过实验发现 GST 和 GPX 在溴氰菊酯胁迫后活性都有明显的变化, 可以灵敏反应其毒性作用。因此认为, GST 和 GPX 适于作为监测水环境中溴氰菊酯污染的生化指标。同时, 本研究结果可为构建生物监测模型提供前期的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] Yousef M I, Awad T I, Mohamed E H. Deltamethrin-induced oxidative damage and biochemical alterations in rat and its attenuation by Vitamin E [J]. *Toxicology*, 2006, **227**: 240—247
- [2] Yang Q G, Sun L X, Zhang D H, *et al.* Partial characterization of deltamethrin metabolism catalyzed by chymotrypsin [J]. *Toxicology in Vitro*, 2008, **22**: 1528—1533
- [3] Wei H, Wu N, Shen H, *et al.* Oxidative stress of deltamethrin to the liver of crayfish, *Procambarus clarkia* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, **34**(5): 733—739 [魏华, 吴楠, 沈竑, 等. 溴氰菊酯对克氏原螯虾的氧化胁迫效应. 水产学报, 2010, **34**(5): 733—739]
- [4] Eybe T, Bohn T, Audinot J N, *et al.* Uptake visualization of deltamethrin by NanoSIMS and acute toxicity to the water flea *Daphnia magna* [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**: 134—140
- [5] Dayal M, Parmar D, Dhawan A, *et al.* Effect of pretreatment of cytochrome P450 (P450) modifiers on neurobehavioral toxicity induced by deltamethrin [J]. *Food and Chemical*, 2003, **41**: 431—437
- [6] Dorts J, Silvestre F, Huynh T T, *et al.* Oxidative stress, protein carbonylation and heat shock proteins in the black tiger shrimp, *Penaeus monodon*, following exposure to endosulfan and deltamethrin [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2009, **28**: 302—310
- [7] Sayeed I, Parvez S, Pandey S, *et al.* Oxidative stress biomarkers of exposure to deltamethrin in freshwater fish, *Channa punctatus* Bloch [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **56**: 295—301
- [8] Hu J Y. The Study on the Toxicity of Deltamethrin on *Carassius Auratus* and the Residue Detection [D]. Thesis for Master of Science. Sichuan Agricultural University, Sichuan. 2007 [胡琼予. 溴氰菊酯对鲫的毒性作用研究及残留检测. 四川农业大学, 学位论文, 2007]
- [9] El-Sayed Y S, Saad T T, El-Bahr S M, *et al.* Acute intoxication of deltamethrin in monosex Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* with special reference to the clinical, biochemical and haematological effects [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2007, **24**: 212—217
- [10] Xia W. Molecular Toxicology of Deltamethrin to *Carassius Auratus* [D]. Thesis for Master of Science. Central China Normal University, Hubei. 2008 [夏伟. 溴氰菊酯对鲫的分子毒理效应研究. 华中师范大学, 学位论文, 2008]
- [11] Chen L Y, Cai D J. A study on the effect of deltamethrin on zooplanktons in fish pond [J]. *China Environmental Science*, 1996, **16**(6): 466—469 [陈良燕, 蔡道基. 溴氰菊酯农药对鱼塘浮游动物影响的研究. 中国环境科学, 1996, **16**(6): 466—469]
- [12] Wu Y L, Jiang M L, Yang H Z. Effect of starve on the carbohydrate and protein metabolism of *Moina macrocopa* [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2011, **30**(5): 721—727 [王玉珑, 姜美玲, 杨惠珍. 饥饿胁迫对多刺裸腹蚤糖与蛋白质代谢的影响. 四川动物, 2011, **30**(5): 721—727]
- [13] Shaw J R, Pfrender M E, Eads B D, *et al.* Daphnia as an emerging model for toxicological genomics [J]. *Comparative Toxicogenomics*, 2008, **2**: 165—219
- [14] State Environmental Protection Administration. Water quality—Determination of the acute toxicity of substance to Daphnia (*Daphnia magna* straus). Beijing. 1991 [国家环境保护总局. 水质、物质对蚤类(大型蚤)急性毒性测定方法. 北京: 国家环境保护局. 1991]
- [15] Zhang L X, Zhang T F, Li L Y, *et al.* The Biochemical Experimental Method and Technology [M]. Beijing: Higher Education Press. 1981, 164—169 [张龙翔, 张庭芳, 李令媛, 等. 生化实验方法和技术. 北京: 高等教育出版社. 1981, 164—169]
- [16] Deng S P, Zhao Y T, Zhu C H, *et al.* Effect of cadmium on the antioxidant enzyme activity and lipid peroxidation in

- Sanguinolaria acuta* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(4): 689—695 [邓思平, 赵云涛, 朱春华, 等. 镉对尖紫蛤抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响. *水生生物学报*, 2012, **36**(4): 689—695]
- [17] Xia S J, Wu Z L. *Fundamentals of Molecular Toxicology* [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology. 2001, 69—71 [夏世均, 吴中亮. *分子毒理学基础*. 武汉: 湖北科学技术出版社. 2001, 69—71]
- [18] Yadav S, Johri A, Dhawan A, *et al.* Regional specificity in deltamethrin induced cytochrome P450 expression in rat brain [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, **217**: 15—24
- [19] Rakotondravelo M L, Anderson T D, Charlton R E, *et al.* Sublethal effects of three pesticides on activities of selected target and detoxification enzymes in the aquatic midge, *Chironomus tentans* (Diptera: Chironomidae) [J]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **51**: 360—366
- [20] David R M, Jones H S, Panter G H, *et al.* Interference with xenobiotic metabolic activity by the commonly used vehicle solvents dimethylsulfoxide and methanol in zebrafish (*Danio rerio*) larvae but not *Daphnia magna* [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**: 912—917
- [21] Wu W, Chen J Z, Leng C M, *et al.* The effect of deltamethrin on glutathione and glutathione-S-transferase in the body of tilapia [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(4): 474—477 [吴伟, 陈家长, 冷春梅, 等. 溴氰菊酯对罗非鱼谷胱甘肽及 S 转移酶的影响. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 474—477]
- [22] Kostaropoulos I, Papadopoulos A, Metaxakis A, *et al.* Glutathione S-transferase in the defence against pyrethroids in insects [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, **31**: 313—319
- [23] Kim K T, Klaine S J, Cho J, *et al.* Oxidative stress responses of *Daphnia magna* exposed to TiO<sub>2</sub> nanoparticles according to size fraction [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 2268—2272