

商品氯氰菊酯对斜生栅藻生长的影响及其生理生化效应

王朝晖^{1,2*}, 谢 骏³, 姜 珊¹, 史婧佳², 刘勇斌², 龚望宝³ (1.暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632; 2.暨南大学生态学系, 广东 广州 510632; 3.中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380)

摘要: 研究了商品氯氰菊酯对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)生长及生理生化指标的影响,以了解除虫菊酯农药对水生态系统的影响.在氯氰菊酯暴露下,藻细胞生长受到明显抑制,氯氰菊酯对斜生栅藻生长的 72h 半效应浓度(EC_{50})为 2.37mg/L.藻细胞所有生理生化指标对氯氰菊酯响应迅速,12h 到达最大促进或者抑制效果,48h 后趋于平稳.其中 12h 处理,可溶性糖和可溶性蛋白含量上升,中等浓度组的促进作用最强;超氧化物歧化酶(SOD)活性则呈现出低浓度促进、高浓度抑制效应.氯氰菊酯能促进藻细胞膜脂氧化产物丙二醛(MDA)的产生,且呈现出明显的剂量—效应关系,MDA 含量可以作为监测氯氰菊酯污染的生物标记指标之一.研究结果表明,SOD 活性抑制以及膜脂氧化是氯氰菊酯对斜生栅藻的重要致毒机理,但自然环境中的氯氰菊酯水平不会对淡水水体浮游藻类的生长产生抑制作用.

关键词: 氯氰菊酯; 毒性; 斜生栅藻; 生长; 超氧化物歧化酶; 丙二醛

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)04-0659-07

Effects of commercial cypermethrin on the growth of *Scenedesmus obliquus* and its physiochemical responses.

WANG Zhao-hui^{1,2*}, XIE Jun³, JIANG Shan¹, SHI Jing-jia², LIU Yong-bin², GONG Wang-bao³ (1.Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China). *China Environmental Science*, 2012,32(4): 659~665

Abstract: The effects of commercial cypermethrin on growth and physiochemical parameters of *Scenedesmus obliquus* were investigated by 72 h growth tests in a batch-culture system. The purpose was to understand influences of commercial pyrethroid insecticides on aquatic ecosystem. The growth of algal cells was inhibited by cypermethrin in a dose-dependent pattern. The 72 h median effect concentration (EC_{50}) was 2.37 mg/L. All biochemical parameters varied significantly within 12 h exposure, and were stable after 24 h exposure. Cellular contents of soluble protein and sugar were enhanced under the stress of cypermethrin, and the maximum magnification occurred at the moderate concentrations. Activity of superoxide dismutase (SOD) was stimulated at low concentrations and inhibited at high concentrations. However, content of lipid peroxidation (malondialdehyde, MDA) increased significantly with the increasing of concentration, indicating the potential of using MDA as the biomarker for cypermethrin pollution. The results from this study suggest that the inactivation of SOD activity and consequent lipid peroxidation may be crucial toxic mechanism for cypermethrin to algal cell; however background levels of cypermethrin in natural waters will not inhibit the growth of phytoplankton.

Key words: cypermethrin; toxicity; *Scenedesmus obliquus*; growth; superoxide dismutase (SOD); malondialdehyde (MDA)

拟除虫菊酯类农药是一类含有苯氧烷基的环丙烷酯,最初是从除虫菊类(*Pyrethrum*, *Cinerariae folium*)植物中所含的有效成分除虫菊素发展而成的.拟除虫菊酯类农药具有很强生物活性以及良好的环境兼容性,在防治卫生害虫和农作物害虫中有重要地位^[1].近年来,随着一批高毒农药的禁用,菊酯类农药的使用量越来越大,对

其毒性的研究也越来越引起人们的重视.

拟除虫菊酯农药已广泛用于农田、森林和家用杀虫,随着它们使用范围的扩大、使用频率的

收稿日期: 2011-07-28

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(nycytx-49);中央高校基本科研业务费专项资金

* 责任作者, 教授, twzh@jnu.edu.cn

增加,它们进入水体的机会也就越来越大,对水生生态环境产生一定影响.同时,拟除虫菊酯农药也广泛使用于水产养殖,主要用于养殖动物的寄生虫疾病防治^[2].拟除虫菊酯虽然对哺乳动物等非靶生物低毒,但它们对鱼类和其它水生动物毒性很高^[3-4],大部分 LC_{50} 值在 $5\mu\text{g/L}$ 以下^[5-6].而且拟除虫菊酯农药属于疑似环境激素类^[7-8],对浮游动物的生长和繁殖具有一定的慢性毒素和致突变能力^[9-10],并且能够影响水生态系统的结构和功能,从而对水生态环境造成长远影响^[10-12].

拟除虫菊酯类农药对水生态系统影响已有较多报道,但大多集中在水生动物毒性的研究方面^[5-7],而拟除虫菊酯类农药对藻类的毒性研究则比较少^[11,13-17].藻类作为水生态系统的初级生产者,其种类多样性和初级生产量直接影响水生态系统的结构和功能.此外,目前大部分有关农药的毒理学研究报道中使用的为纯品农药,对商品农药中乳化剂和溶剂的毒性未予考量,而溶剂与乳化剂对水生生物也具有一定毒害作用^[18].因此,在毒理学研究中,使用市售商品农药作为实验药品能更为科学和全面地评价农药对环境的影响.

因此,本文选择目前使用最为普遍、用量最大的拟除虫菊酯—氯氰菊酯作为实验材料,研究了商品氯氰菊酯对典型淡水藻类斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 的生长、细胞内含物及抗氧化酶和膜脂氧化指标的影响,以考察商品氯氰菊酯对藻类的毒性和致毒机理,为拟除虫菊酯农药在水环境的安全使用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验藻类的来源与培养

本实验藻种为斜生栅藻,来自于暨南大学水生生物研究所藻种室.实验藻种在 BG11 培养基中进行扩大培养,培养条件为温度 20°C ,光照强度为 $100\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光暗比为 12h:12h.藻细胞在对数生长期反复接种 3 次后进行实验,待达到同步培养后进行实验.

1.2 试验药品

氯氰菊酯为江门市大光明农化有限公司生

产的含 10%氯氰菊酯的市售乳油.用丙酮配制成 2000,3600,6400,11200,20000mg/L 氯氰菊酯母液,在 4°C 下避光保存.

1.3 实验设计

根据预备实验结果,0.5%(体积比)的丙酮对栅藻的生长及生理生化指标不产生明显影响,因此试验液中溶剂丙酮含量设为 0.5%,对照组中添加同样浓度的丙酮.

实验设置 1 个对照组和 5 个实验组,各组中氯氰菊酯浓度分别为 0,1,1.8,3.2,5.6,10mg/L.实验容器为 1000mL 三角瓶,培养体积 600mL.每个浓度设置 3 个平行,实验所有容器和培养基均经过 121°C 、20min 高压蒸汽灭菌.培养条件与 1.1 相同.每天手动摇瓶 3 次,实验持续 72h,实验进行的 0,3,6,12,24,48,72h,取样进行各种指标的测定.

1.4 分析测定

1.4.1 细胞数量 在藻细胞对数生长期测定叶绿素荧光(美国 Turner Designs 公司 Trilogy 实验室荧光仪),并计数藻细胞密度,得到叶绿素荧光与藻细胞密度的相关关系: $y = 0.0039x + 2627$, $R^2 = 0.98$,其中 y 为叶绿素荧光值, x 为藻细胞密度.在上述规定时间取样,测定叶绿素荧光值,并换算成藻细胞密度.

1.4.2 可溶性蛋白和氧化物歧化酶(SOD)活性的测定 酶粗提取液根据 Wang 等^[7]的方法进行,取 50mL 藻液,在 4°C 、10000r/min 条件下离心 10min,去上清液,留藻泥, -20°C 冷冻保存.加 5mL pH7.8 磷酸缓冲液,间断性超声波冰浴破碎 30min,镜检无完整细胞后,反复冻融 2~3 次.然后在 4°C 、10000r/min 下离心 10min,上清液即为酶粗提液,用于可溶性蛋白和 SOD 活性的测定.

可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮兰法^[19].用小牛血清蛋白作标准曲线($y=0.1011x-0.0917$, $R^2=0.999$),取 1mL 酶液(对照组为 1mL 磷酸缓冲液),加 5mL 考马斯亮兰溶液,混匀,测定 595nm 处吸光值.

SOD 活性采用氮兰四唑(NBT)法测定^[20],反应管内依次加入 pH7.8 磷酸缓冲液 3mL、130 mmol/L 的甲硫氨酸溶液 0.6mL、0.057mmol/L

的 NBT 溶液 0.6mL、750 μ mol/L 的 EDTA-Na₂ 溶液 0.6mL、20 μ mol/L 的核黄素溶液 0.6mL、酶液 0.5mL (对照组加入等量磷酸缓冲液)、蒸馏水 1mL, 混匀后, 对照管避光, 试验组在 50~60 μ mol/(m²·s)、20℃下反应 30min, 遮光中止反应. 以遮光的对照管为空白, 在 560nm 波长下测定各管的吸光度, 计算 SOD 活性. 以能抑制 NBT 光化学还原 50% 的酶量为 1 个 SOD 单位, 用 U 表示. SOD 酶活性以单位细胞酶活性(U/10⁸ cells)以及单位蛋白酶活性(U/ μ g protein)表示.

1.4.3 可溶性糖与丙二醛(MDA)含量的测定 取 50mL 藻液, 于 4℃、10000r/min 离心 10min, 去上清, 藻泥置于-20℃保存. 取出冷冻的藻泥, 加入 5mL 三氯乙酸溶液, 摇匀, 超声波冰浴破碎, 置于 4℃、10000r/min 离心 10min, 上清为待测液.

测定可溶性糖和 MDA 采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[21], 取 1mL 上清液, 加入 2mL TBA, 沸水中加热 15min, 迅速放入冰水中冷却, 测定 450, 532, 600nm 处的吸光值, 计算可溶性糖和 MDA 含量.

1.5 计算与统计分析

1.5.1 半效应浓度(EC₅₀)的计算 藻细胞生长的特定生长率(μ , d⁻¹)由以下公式进行计算:

$$\mu(d^{-1}) = [\ln(N_t/N_0)]/t \quad (1)$$

式中: N_0 为初始细胞密度; N_t 是培养 t d 时的细胞密度.

生长抑制百分率(EC)定义为氯氰菊酯抑制生长率的百分比:

$$EC(\%) = (\mu_c - \mu_i) / \mu_c \times 100 \quad (2)$$

式中: μ_c 是对照组的特定生长率; μ_i 是试验组 i 的特定生长率.

EC₅₀ 值采用抑制百分率的概率单位浓度对数直线回归法进行计算, 并计算 EC₅₀ 的 95% 可信限范围.

1.5.2 统计分析 实验数据用统计学方法进行处理, 结果均为平均值 $\pm$ 标准差, 用 SPSS13.0 软件进行显著性差异分析.

2 结果与分析

2.1 急性暴露氯氰菊酯对斜生栅藻生长的影响

在不同浓度的氯氰菊酯暴露下, 斜生栅藻的生长曲线见图 1. 在添加了氯氰菊酯的各实验组中, 藻细胞的生长受到明显抑制, 且抑制程度与氯氰菊酯的浓度正相关. 暴露 3h, 高浓度组(>3.2mg/L)藻细胞数量明显下降($P<0.05$), 12h 内均维持较低密度; 随后细胞密度缓慢上升, 但直至实验结束的 72h, 最高浓度组(10mg/L)细胞密度仍低于接种密度. 在暴露的前 48h, 两个低浓度组(<1.8mg/L)的生长与对照组无明显差异, 但在随后的 24h 内对照组的生长明显优于暴露组, 至 72h 所有实验组藻细胞密度均与对照组有明显差异($P<0.05$). 氯氰菊酯对斜生栅藻生长的 72h 半抑制浓度(EC₅₀)为 2.37mg/L, 95% 的可信限范围为 1.37~4.09mg/L.

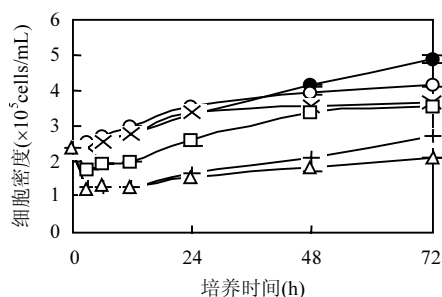


图 1 氯氰菊酯暴露下斜生栅藻的生长

Fig.1 The growth of *Scenedesmus obliquus* under the exposure of cypermethrin

● 0mg/L ○ 1mg/L
 × 1.8mg/L □ 3.2mg/L
 + 5.6mg/L △ 10mg/L

2.2 氯氰菊酯对斜生栅藻细胞内含物的影响

2.2.1 可溶性蛋白 藻细胞可溶性蛋白含量在暴露初期的 24h 内变化较为显著, 暴露组均表现出不同程度的促进作用, 而对照组则保持平稳. 低浓度组(<3.2mg/L)可溶性蛋白含量在 12h 内呈上升趋势, 促进作用随着浓度的增加而增加, 最大值为 3.2mg/L 浓度组的 12h 暴露, 达 9.66 μ g/10⁸ cells, 为同期对照组的 1.38 倍; 之后逐渐下降趋于平稳. 高浓度组(>5.6mg/L)则在 12h 内出现一些波动, 整体来说是促进作用, 但在 6h 时, 含量突然下降, 12h 时又上升, 48h 后逐渐达到平稳(图 2).

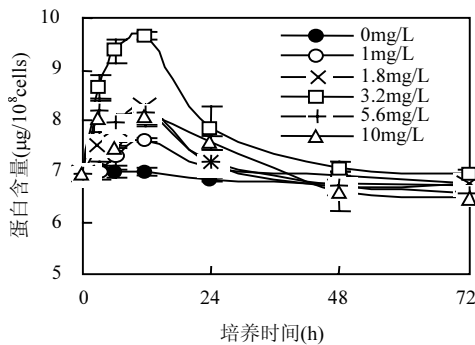


图2 氯氰菊酯暴露下斜生栅藻可溶性蛋白的变化
Fig.2 Contents of soluble protein in *Scenedesmus obliquus* under the exposure of cypermethrin

2.2.2 可溶性糖 可溶性糖含量的变化规律与可溶性蛋白相近(图 3),同样也在实验初期的 24h 内变化较为显著,高浓度组与低浓度组均表现出不同程度的促进作用,48h 后含量趋于稳定.其中 3.2mg/L 对可溶性糖的促进作用最强,最高值 (61.6mg/10⁸cells)出现在 3.2mg/L 浓度组 12h 暴露,是同期对照组的 2.27 倍.而其他 4 个浓度组的促进作用相近,比较而言,最低浓度的 1mg/L 促进作用最小,而对照组则保持平稳.

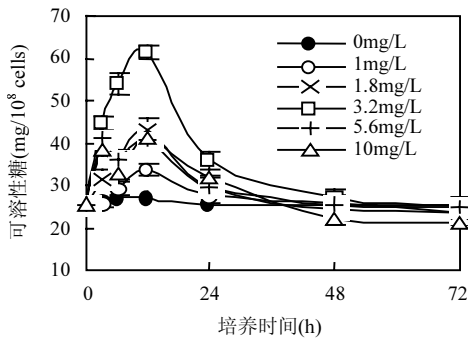


图3 氯氰菊酯暴露下斜生栅藻可溶性糖的变化
Fig.3 Contents of soluble sugar in *Scenedesmus obliquus* under the exposure of cypermethrin

2.3 氯氰菊酯对斜生栅藻抗氧化酶的影响

斜生栅藻体内 SOD 对氯氰菊酯的响应明显(图 4a).暴露 12h 时,低浓度组(<1.8mg/L)藻细胞 SOD 活性均被最大程度促进($P<0.01$),其中 1.8mg/L 浓度组达到最大值,为 1.19 U/10⁸ cells,

是对照组的 1.51 倍;而高浓度(>3.2mg/L)则被抑制至最低值,其中 10mg/L 在 12h 达到最小值 3.44 U/10⁸ cells,仅为对照组的 43.7%.随着暴露时间的延长,48 h 后各实验组的 SOD 活性趋于一致.值得注意的是,对照组 SOD 活性也在 12h 有所增加,可能是由于新的生长环境致使藻细胞出现抗逆反应,此外对照组培养基中加入的少量丙酮可能也会产生一定抗逆反应.

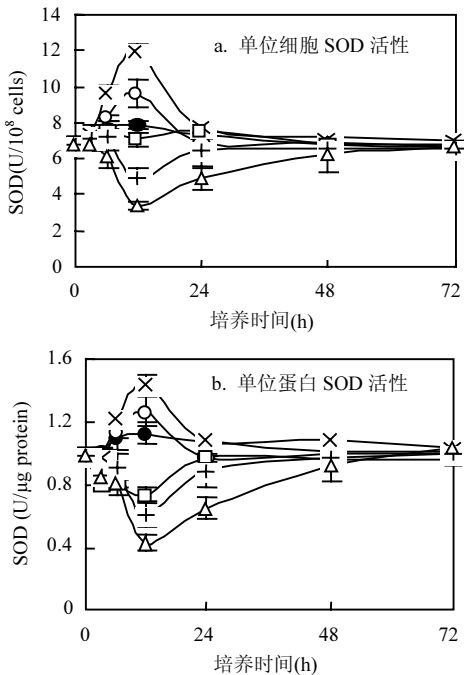


图4 氯氰菊酯暴露下斜生栅藻 SOD 活性的变化
Fig.4 Superoxide dismutase (SOD) activity in *Scenedesmus obliquus* under the exposure of cypermethrin

单位蛋白 SOD 酶活性能够剔除藻细胞大小对酶活性的影响,有利于不同种类的微藻之间 SOD 酶活性的比较.本研究中,单位蛋白 SOD 酶活性变化与单位细胞酶活性相近(图 4b),只是在 3.2mg/L 试验组的抑制作用更为明显,分析其原因,与该浓度组较高的蛋白含量有关(图 2).

2.4 氯氰菊酯对斜生栅藻膜脂氧化产物的影响

MDA 是指示藻细胞内膜脂氧化程度的重要指标.所有试验组暴露初期 MDA 含量就出现明

显上升,并且随着浓度增加而增加,呈现出明显的浓度—效应关系(图 5)。暴露 12h 后,10mg/L 组 MDA 含量达到最高值,为 $44.7\mu\text{mol}/10^8\text{cells}$,是对照组的 2.86 倍;其他浓度组也分别在暴露后 6~12h 时达到最高值,24h 后 MDA 值逐渐回落至正常水平。虽然所有供试浓度的氯氰菊酯对藻细胞 MDA 含量具有明显的促进作用,但对对照组 MDA 水平一直维持平稳。

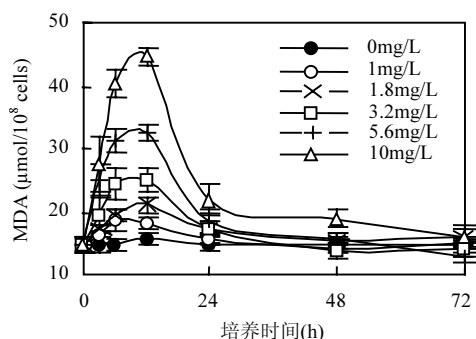


图 5 氯氰菊酯暴露下斜生栅藻丙二醛(MDA)含量的变化

Fig. 5 Variation in malondialdehyde (MDA) contents in *Scenedesmus obliquus* under the exposure of cypermethrin

3 讨论

3.1 斜生栅藻对氯氰菊酯的敏感性

氯氰菊酯对水生生物毒性大小因受试生物的不同而有一定差异。对水生浮游动物 24h LC_{50} 一般在 $5\mu\text{g}/\text{L}$ 以下,对鱼类 96h LC_{50} 约为 $0.1\sim 10\mu\text{g}/\text{L}$,而对虾类 96h LC_{50} 甚至小于 $0.1\mu\text{g}/\text{L}$ ^[5-6]。藻类对氯氰菊酯的敏感性较低,72~96h EC_{50} 一般在 $1\text{mg}/\text{L}$ 以上^[22],氯氰菊酯纯品农药对斜生栅藻 96h EC_{50} 为 $112\text{mg}/\text{L}$ ^[13]; $10\sim 50\text{mg}/\text{L}$ 的氯氰菊酯抑制双对栅藻的生长,却刺激或稍抑制聚球藻的生长^[23]。海洋藻类对氯氰菊酯的敏感性较高,96h EC_{50} 为 $100\mu\text{g}/\text{L}$ 左右^[16]。

从本实验结果来看,斜生栅藻对氯氰菊酯的敏感性虽低于水生动物以及海洋微藻,但 EC_{50} 值 ($2.37\text{mg}/\text{L}$) 远远高于 Xiong 等^[13] 的研究结果 ($112\text{mg}/\text{L}$),这可能与本研究中所使用的商品农药有关。市售商品农药包括溶剂、乳化剂等辅剂,这

些附加物对环境的危害有时甚至高于农药本身。拟除虫菊酯市售农药一般以二甲苯作为溶剂、8%的农乳 2201 作为乳化剂配制而成的乳油,而溶剂和乳化剂本身也具有一定的毒性^[18]。此外,氯氰菊酯难溶于水,在水中溶解度为 $5\sim 10\mu\text{g}/\text{L}$ ^[24]。使用纯品农药作为实验药品,当试验液中氯氰菊酯浓度大于其在水中溶解度时,如果不添加适当的乳化剂,水体中氯氰菊酯的实际浓度远低于配制浓度。而刘涛等也发现,高效氯氰菊酯商品乳油对斜生栅藻毒性较高,72h 和 96h EC_{50} 分别为 $4.03, 2.87\text{mg}/\text{L}$ ^[14]。由此说明,试液中的有效浓度是决定氯氰菊酯生物毒性的重要因素。本课题组研究发现,氯氰菊酯商品农药与纯品农药(以丙酮为溶剂、8%的吐温 60 为乳化剂)对海洋微藻的毒性没有明显差别^[16-17],而且在预备实验中我们也发现使用吐温 60 为乳化剂、丙酮为溶剂,氯氰菊酯原药(有效成分含量 $>96\%$)对斜生栅藻的毒性与商品农药相近。因此,本实验结果与文献报道的差异,主要是由于试验液中氯氰菊酯有效浓度的差异所致。鉴于商品农药中附加剂也具有一定环境危害,作者认为使用商品农药来研究其毒性效应能更为准确地评估其对生态环境的影响。

拟除虫菊酯属于高亲脂性化合物,在自然水体中极易与悬浮颗粒吸附,而且较易降解,因此,在自然水体中菊酯类农药的残留量较低^[25]。在井水和自来水中无氯氰菊酯残留,而河水中可以检测出氯氰菊酯^[26],城市污水中也能监测出氯氰菊酯,但残留量一般小于 $1\mu\text{g}/\text{L}$ ^[27]。本实验设置的氯氰菊酯浓度为 mg/L 级别,远高于自然水体中氯氰菊酯的残留浓度。因此,可以得出环境中的氯氰菊酯浓度不会对淡水水体浮游藻类的生长产生抑制作用,但极低浓度的氯氰菊酯对藻类的生长是否具有促进作用还有待进一步研究。

3.2 氯氰菊酯对斜生栅藻致毒机理的探讨

在氯氰菊酯暴露下,斜生栅藻可溶性蛋白和可溶性糖含量以及 SOD 活性和 MDA 含量均在短时间内做出反应,但在暴露后期基本恢复至正常水平。氯氰菊酯作为一种高亲脂性化合物($\log K_{ow}\approx 6.6$),与细胞接触后,能迅速通过膜脂质双分子层进入细胞内部^[25],从而使细胞迅速做出响应;

但随着暴露时间的延长,藻类细胞逐渐适应毒害环境,而且农药浓度由于降解、吸附而下降^[16],藻细胞各类指标也逐渐恢复至正常水平。

可溶性蛋白是存在于细胞中的非膜结合蛋白体系,在植物体内有贮存营养、抵抗极端环境等作用,同时植物体内的可溶性蛋白质大多数是参与各种代谢的酶类,测其含量是了解植物体总体代谢水平的一个重要指标。本实验中斜生栅藻可溶性蛋白含量在暴露初期得到极大促进,并且在中等浓度下促进作用最为显著。说明藻细胞受到中度胁迫时,能迅速合成大量可溶性蛋白,从而提供更多的代谢酶类抵抗不良环境。随着毒物降解、浓度降低,且对周围不良环境的逐渐适应,可溶性蛋白的含量逐渐恢复至正常水平。

可溶性糖包括还原糖(葡萄糖、果糖、麦芽糖等)和非还原糖(蔗糖等),与植物的生长发育、呼吸代谢等各个方面都息息相关。在氯氰菊酯胁迫下,可溶性糖含量同样明显增加。说明在毒性胁迫环境下,植物为了适应逆境的条件,会主动积累可溶性糖和可溶性蛋白等营养物质。

在逆境胁迫下,植物体内都能够产生大量的活性氧物质(如 O_2^- 、 $-OH$ 及 H_2O_2 等)^[28],活性氧物质能够破坏蛋白质、叶绿体、细胞膜的流动性及核酸等,扰乱有机体的动态平衡^[29]。为了消除或减少活性氧物质对植物造成的损伤,植物在抗氧化物质的基础上形成了多种防护机制^[30-31]。 O_2^- 是最重要的活性氧物质,其大量存在主要来源于过剩电子传递给 O_2 进而形成了 O_2^- , O_2^- 具有非常大的破坏作用,能够引起细胞的死亡和器官的衰老。 SOD 被认为是防卫 O_2^- 伤害的第一步,它可以将 O_2^- 转化为氧化能力较弱的 H_2O_2 ,并在其他酶的作用下最终转化为 H_2O 和 O_2 ^[28]。

低浓度的氯氰菊酯虽然对藻细胞生长、内含物含量基本没有影响,但是对 SOD 活性有明显的促进作用。在暴露初期,低浓度($<3.2mg/L$)对 SOD 活性具有促进作用,而当农药浓度超过 $3.2mg/L$ 则被抑制。结果说明藻细胞能及时调动抗氧化机制,促进抗氧化机能,从而降低低强度逆境对藻细胞生长和生理机能的影响。但随着氯氰菊酯浓度的增加,超过了细胞的耐受极限,脂质过氧化带来的损伤大

于细胞自身的修复能力, SOD 活性受到明显抑制,自由基产生和消除之间的平衡被破坏,细胞开始受到毒害,斜生栅藻的生长也受到明显抑制。

氯氰菊酯暴露组 MDA 含量均在短时间内出现明显上升趋势,而且在 SOD 活性高的浓度组 MDA 的促进作用较小,说明 SOD 活性的提高能缓解膜脂氧化程度,从而对细胞膜具有一定的保护作用;但当胁迫强度增加,在本实验中具体表现为氯氰菊酯浓度增加, SOD 受到破坏,活性下降,最终导致膜脂氧化程度急剧上升,藻细胞生长也受到明显抑制。由此可见, SOD 活性抑制以及膜脂氧化是氯氰菊酯对斜生栅藻的重要致毒机理。此外, MDA 含量变化敏感,呈现出明显的剂量—效应关系,可以作为监测氯氰菊酯污染的生物标记指标之一。

4 结论

4.1 氯氰菊酯对斜生栅藻具有一定毒性,对藻细胞生长 72h 半效应浓度(EC_{50})为 $2.37mg/L$,但自然水体中氯氰菊酯残留不会对栅藻的生长产生抑制作用。

4.2 藻细胞各种生理生化指标如可溶性蛋白、可溶性糖、超氧化物歧化酶(SOD)及丙二醛(MDA)对氯氰菊酯响应迅速,在暴露后 24h 内达到最大促进或者抑制作用,48h 后恢复至正常水平。

4.3 SOD 活性的抑制以及膜脂过氧化可能是氯氰菊酯对斜生栅藻产生毒害作用的重要原因。

4.4 MDA 含量变化敏感,呈现出明显的剂量—效应关系,可以作为监测氯氰菊酯污染的生物标记指标之一。

参考文献:

- [1] Amweg E L, Weston D P, Ureda N M. Use and toxicity of pyrethroid pesticides in the Central Valley, California, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005,24:966-972.
- [2] Das B K, Mukherjee S C. Toxicity of cypermethrin in Labeo rohita fingerlings: biochemical, enzymatic and haematological consequences [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology and Pharmacology*, C 2003,134:109-121.
- [3] 王朝晖,尹伊伟,林小涛,等.拟除虫菊酯农药对水生生态系统的生态毒理学研究综述 [J]. 暨南大学大学学报, 2000,21(3):123-

- 127.
- [4] Adam O, Badot P, Degiorgi F, et al. Mixture toxicity assessment of wood preservative pesticides in the freshwater amphipod *Gammarus pulex* (L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009,72:441-449.
- [5] Clark J, Goodman L, Borthwick P, et al. Toxicity of pyrethroids to marine invertebrates and fish: a literature review and test results with sediment-sorbed chemicals [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1989,8:393-401.
- [6] Coats J R, Symonik DM, Bradbury S P, et al. Toxicology of synthetic pyrethroids in aquatic organisms: an overview [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1989,8:671-679.
- [7] 邴 欣,汝少国.四种拟除虫菊酯类农药的环境雌激素活性研究 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(2):152-156.
- [8] 李文艳,杨宏莉,蒋 雪,等.氯氰菊酯和高效氯氰菊酯的生殖毒性研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2010,27(7):652-654.
- [9] 谭亚军,李少南,吴小毛.几种杀虫剂对大型蚤的慢性毒性 [J]. *农药学报*, 2004,6(3):62-66.
- [10] Medina M, Barata C, Telfer T, et al. Effects of cypermethrin on marine plankton communities: a simulated field study using mesocosms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 58:236-245.
- [11] Ma J. Differential sensitivity of three cyanobacterial and five green algal species to organotin and pyrethroids pesticides [J]. *Science of the Total Environment*, 2005,341:109-117.
- [12] Sánchez-Fortún S, Barahona M V. Comparative study on the environmental risk induced by several pyrethroids in estuarine and freshwater invertebrate organisms [J]. *Chemosphere*, 2005,59: 553-559.
- [13] Xiong L, Xie P, Sheng X, et al. Toxicity of cypermethrin on growth, pigments, and superoxide dismutase of *Scenedesmus obliquus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005,60: 188-192.
- [14] 刘 涛,熊 丽,生秀梅,等.高效氯氰菊酯对斜生栅藻的毒性研究 [J]. *化学与生物工程*, 2006,23(7):37-39.
- [15] 姜彬慧,张雪娇,姜 莉,等.溴氰菊酯对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)的毒性效应 [J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 2009,36(1):73-76.
- [16] Wang Z, Yang Y, Yue W, et al. The growth behavior of three marine phytoplankton species in the presence of commercial cypermethrin [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010,73:1408-1414.
- [17] Wang Z, Nie X, Yue W, et al. Physiological responses of three marine microalgae exposed to cypermethrin [J]. *Environmental Toxicology*, 2011, DOI: 10.1002/tox.20678
- [18] 林秋奇,骆育敏,尹伊伟.两种乳化剂对大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*)胚胎、鱼苗的亚慢性毒性 [J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 1998,19(5):116-119.
- [19] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976,72:248-254.
- [20] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to polyacrylamide gels [J]. *Analytical Biochemistry*, 1971,44:276-286.
- [21] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导 [M]. 广州:华南理工大学出版社, 2006.
- [22] Hill I R. Aquatic organisms and pyrethroids [J]. *Pesticide Science*, 1989,27:429-465.
- [23] Megharaj M, Venkateswarlu K, Rao A S. Influence of cypermethrin and fenvalerate on a green alga and three cyanobacteria isolated from soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1987,14:142-146
- [24] World Health Organisation (WHO). Alpha-cypermethrin. Environmental Health Criteria. World Health Organisation, Geneva. 1992.
- [25] Hill I R, Shaw J F, Maund S J. Review of aquatic field tests with pyrethroid insecticides [A]. In: Hill I R, Heimbach F, Leeuwangh P, et al. (eds) *Freshwater Field Tests for Hazard Assessment of Chemicals*. Boca [C] Raton FL: Lewis Publisher, 1994,249-271.
- [26] 臧晓欢,王 春,高书涛,等.分散液相微萃取一气相色谱联用分析水样中菊酯类农药残留 [J]. *分析化学*, 2008,36(6):765- 769.
- [27] 陈 明,任 仁,王子健,等.城市污水处理厂水样中菊酯类农药残留分析 [J]. *中国环境监测*, 2007,23(1):27-30.
- [28] Farber J L. Mechanisms of cell injury by activated oxygen species [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1994,102(Suppl 10):17-24.
- [29] Smirnov N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation [J]. *New Phytologist*, 1993,125:27-58.
- [30] Kumar S, Habib K, Fatma T. Endosulfan induced biochemical changes in nitrogen-fixing cyanobacteria [J]. *Science of the Total Environment*, 2008,403:130-138.
- [31] Sabatini S E, Juárez Á B, Eppis M, et al. Oxidative stress and antioxidant defenses in two green microalgae exposed to copper [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009,72:1200-1206.

作者简介: 王朝晖(1968-),女,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向为水环境科学和生态毒理学.发表论文 100 余篇。