

# 两种有机磷农药对缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 鳃超微结构的影响\*

薛秀玲<sup>1,2</sup>, 袁东星<sup>2</sup>, 樊国峰<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 厦门大学 环境科学研究中心, 福建 厦门 361005; 3. 华侨大学 环境保护设计研究所, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 在实验室模拟缢蛏生长环境, 研究结构、性质不同的两种典型有机磷农药 (OPs) 乐果和三唑磷对滩涂养殖生物缢蛏的毒性效应, 通过电镜观察乐果和三唑磷对缢蛏鳃超微结构的影响。结果发现: 乐果和三唑磷对缢蛏鳃超微结构的影响主要表现在对细胞核和各种细胞器 (如线粒体、内质网、高尔基体) 的伤害。主要病变为: 细胞核变形, 核膜凸起或凹陷, 染色质发生凝聚或边缘化; 线粒体肿大, 双层膜溶解, 内嵴部分消失; 个别线粒体内嵴完全瓦解, 形成电子透明区; 粗面内质网水肿, 核糖体部分脱落, 片层结构间距增大; 高尔基膜囊水肿, 膜溶解, 高尔基小泡破裂消失。本研究为了解不同 OPs 对缢蛏的毒性效应提供了病理形态学证据, 为预测 OPs 对近海海洋生物及人类健康的影响提供有力的证据, 为规范 OPs 的应用、制定海洋环境质量标准提供了部分基础理论依据。

**关键词:** 乐果; 三唑磷; 缢蛏; 鳃; 超微结构

中图分类号: Q945.78; X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2007)06-0568-05

## Effects of dimethoate and triazophos on ultra-structural lesions in gill of *Sinonovacula constricta*

XUE Xiuling<sup>1,2</sup>, YUAN Dongxing<sup>2</sup>, FAN Guofeng<sup>3</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 2. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Environmental Protection & Design Institute, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract** The toxic effects of two typical organophosphorus pesticides (OPs), dimethoate and triazophos, on *Sinonovacula constricta* (Lamarck) living in the intertidal sediment were investigated in this study. *S. constricta* was cultured in the simulate laboratory and the razor living surrounding. Samples were taken at 14d after exposed to OPs. The concentrations of OPs were determined with GC. The ultra-structure changes in gill epithelium of *S. constricta* were observed with an electron microscope. The ultra-structure in gill was destroyed when exposed to dimethoate and triazophos. The symptoms presented as lesions of nuclear cellular organelles such as mitochondria, rough endoplasmic reticulum and Golgi apparatus. The nuclear became malformed. The nuclear envelopes were either convex or concave. The chromatin became aggregated or on the edge. Mitochondria swelled up and the cristae of mitochondria disintegrated partly, some disintegrated completely and became transparent electronic density area. The rough endoplasmic reticulum swelled up and ribosome fell from the rough endoplasmic reticulum. The lamina structure swelled and the space between them enlarged. The follicles of Golgi apparatus swelled, the membrane dissolved and the vesicles disintegrated even disappeared. The results provided the pathologic and morphologic evidences for the toxic effects of OPs on *S. constricta*. The addition of histopathological lesions and OPs level in bivalve could be helpful to assess comprehensively the effects of OPs on *S. constricta* and the surrounding environment. Furthermore to forecast the effects of OPs on the aquatic biota and human health. The study provided a partial theoretical support for establishing a criterion of OPs of the marine environment.

**Key words** dimethoate; triazophos; *Sinonovacula constricta* (Lamarck); gill ultrastructural lesions

\* 收稿日期: 2006-11-30 修订日期: 2007-04-25

作者简介: 薛秀玲 (1975-), 女, 河南省安阳市人, 讲师, 博士, 主要从事环境化学及环境毒理学的研究工作, E-mail: xueling@hqu.edu.cn

近年来, 随着有机磷农药 (OPs) 在滩涂养殖中的频繁使用, 污染事故常有发生。乐果和三唑磷是极可能造成滩涂环境污染的两种典型 OPs 分别是研究强水溶性和强脂溶性 OPs 对生物毒性效应的代表性农药。有关 OPs 对于水生生物组织损伤的研究较少, 主要集中在鱼类和甲壳类<sup>[1-8]</sup>。有研究表明, 鱼类某些特定的疾病和组织损伤是特定污染物毒性效应的可靠生物指标<sup>[9]</sup>。

缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 俗称蛏子, 是穴居在潮间带滩涂、埋栖型双壳贝类。本研究通过对缢蛏鳃超微结构的观察, 研究 OPs 对缢蛏的毒性效应, 初步揭示 OPs 对贝类的毒理影响机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 污染实验设计

缢蛏购自厦门龙海西边养殖区, 1 a 龄。壳长 4~6 cm, 体重 4.5~6.5 g。三角褐紫藻 (*Phaeodactylum tricor-matum*) 在本实验室接种和培养。培养液采用 f/2 营养盐配方<sup>[10]</sup>, 培养温度 (20±0.5)℃; 光照 4000 lx 光暗比: 12h:12h。

暂养、驯养及实验用水为天然海水, 经沉淀、砂滤。盐度为 23.5~24.5, pH 为 8.2 水温 21~23℃。沉积物采自福建龙海西边缢蛏养殖区, 剔除杂物, 磨碎, 曝晒, 过筛。

模拟缢蛏生长环境, 首先将实验用沉积物放入洁净的玻璃养殖箱 (50 cm×34 cm×40 cm) 中, 然后加入砂滤海水, 搅拌均匀, 平衡 24 h 后, 再次更换清洁海水, 随机放入实验缢蛏, 挑选健康无损、钻洞能力强的, 平均每组约 40 只。缢蛏先在玻璃养殖箱中驯养 4 d 驯养期间投喂三角褐紫藻, 毒性实验前 1 d 停止投喂。实验中持续充气。

按照乐果 96 h  $LC_{50}$  的  $1 \times 10^{-3}$  设定乐果的毒性实验浓度为 0.1 mg/L, 按照三唑磷 96 h  $LC_{50}$  的  $50 \times 10^{-3}$  设定三唑磷毒性实验的浓度为 0.25 mg/L, 同时各设 1 个平行实验组, 和 1 个空白对照组。于染毒第 14 d 采样, 测定缢蛏体内 OPs 的含量, 并观察组织形态变化。

### 1.2 缢蛏中 OPs 残留的萃取

以反渗透水冲洗缢蛏外壳, 取出软组织, 用家用食物搅拌机搅碎、混匀, 制成浆状鲜样, 放入聚乙烯塑料袋内, 封口, 速冻, 待进一步处理。

将样品解冻, 准确称取 10.0 g 样品于 80 mL 离心管中。然后依次加入适量无水  $Na_2SO_4$ 、0.5 mL 10 mg/L 磷酸三丁酯和 0.1 mL 10 mg/L 磷酸三苯酯。加 15 mL 乙酸乙酯, 用 Branson 超声波清洗器 (248W, 美国 SmithKline 公司) 超声波萃取 10 min, 于 3000 r/min 离心 5 min, 倾出上清液, 残渣同上再萃取一次, 合并两次上清液, 倒入装有 10 mL 无水硫酸钠的漏斗, 以少量乙酸乙酯洗涤漏斗, 收集滤液于 50 mL 尖底离心管中, 于 40℃ 水浴中用氮气吹脱溶剂至约 0.5 mL, 用乙酸乙酯转移入样品瓶, 定容至 1.0 mL, 气相色谱分析。为了考察超声波萃取是否会造成农药的

降解, 取两种农药的标准样品, 超声波萃取 20 min, 用 GC 分析发现, 保留时间及峰面积均无变化, 农药未发生降解。

### 1.3 气相色谱分析

Agilent 6890 气相色谱仪: SPB-1701 毛细管色谱柱, 30 m×0.25 mm, 涂层厚 0.5 μm (美国 Supelco 公司); 进样口温度为 250℃; 火焰光度检测器 (FPD, 磷滤光片) 温度为 250℃,  $H_2$  流速为 75 mL/min, 空气流速为 100 mL/min, 载气为高纯  $N_2$ , 流速 1.5 mL/min, 无分流进样, 进样量 1.0 μL。

萃取液中三唑磷浓度的分析: 柱箱起始温度 90℃, 以 40℃/min 升温至 220℃, 保持 1 min, 再以 30℃/min 升温至 260℃, 保持 6 min, 三唑磷的保留时间为 9.96 min, 替代物磷酸三苯酯的保留时间为 10.24 min。

萃取液中乐果浓度的分析: 柱箱起始温度 120℃, 保持 1 min, 再以 30℃/min 升温至 270℃, 保持 6 min, 乐果的保留时间为 6.62 min, 替代物磷酸三丁酯的保留时间为 5.58 min。

### 1.4 电镜样品的制作与观察

OPs 染毒的第 14 d 采样测定缢蛏体内 OPs 的含量。同时取乐果、三唑磷污染的缢蛏解剖, 仔细分离出鳃和消化腺, 取样时用解剖针挑出松散型的腺上皮组织, 避开导管和结缔组织。用 2.5% 的戊二醛溶液在 4℃ 下固定保存, 1% 的锇酸溶液双固定, 2% 的醋酸双氧钴染, 乙醇逐级脱水后, 环氧树脂 618 渗透包埋, 超薄切片厚度为 50~70 nm, 饱和醋酸铀和柠檬酸铅双重染色, JEM-100CX 型透射电镜观察并拍照。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缢蛏体内蓄积乐果和三唑磷的含量

染毒 14 d 后, 0.1 mg/L 的乐果暴露下, 缢蛏体内富集乐果浓度为  $(0.021 \pm 0.002) \times 10^6$  (湿重,  $n=4$ ), 是水体中乐果浓度的 0.21 倍; 而 0.25 mg/L 的三唑磷暴露下, 缢蛏体内富集的三唑磷浓度为  $(0.379 \pm 0.031) \times 10^6$  (湿重,  $n=4$ ), 是水体中三唑磷浓度的 1.52 倍。替代物磷酸三丁酯和磷酸三苯酯的加标回收率均在 86%~119%, 说明它们分别作为乐果和三唑磷的替代物是可行的。

由此看来, 三唑磷的正辛醇-水分配系数 ( $K_{ow}$ ) 值高于乐果 ( $\lg K_{ow}$  分别为 3.34 和 -0.29<sup>[11]</sup>), 脂溶性大于乐果, 易于被缢蛏富集, 是缢蛏对三唑磷的富集倍数高于乐果的原因。

### 2.2 乐果和三唑磷对缢蛏鳃上皮细胞超微结构影响

#### 2.2.1 乐果和三唑磷对鳃上皮细胞的细胞核的影响

缢蛏的鳃小片由双层上皮细胞组成, 外侧为单层柱状细胞, 靠近鳃内腔为单层扁平细胞。细胞结构完整, 纤毛排列整齐, 纤毛横切面内“9+2”微管结构清晰可见。对照组的鳃上皮扁平细胞和柱状细胞的细胞核正常, 核膜清晰, 可见核孔, 核中有异染色质, 常染色质均匀附着于核内膜, 见图 1(a,b); 乐果暴露下, 扁平细胞的核变形,

核膜下陷, 吞噬, 出现染色质凝聚现象, 见图 1(c), 柱状细胞的细胞核变形, 核膜凸起或凹陷, 染色质凝聚和边缘化同时存在, 见图 1(d); 而三唑磷暴露下, 扁平细胞的细胞

核严重变形, 有的地方出现凹陷, 染色质凝聚, 核膜溶胀, 模糊不清, 见图 1(e), 柱状细胞的细胞核核膜清楚, 但染色质边缘化, 见图 1(f)。

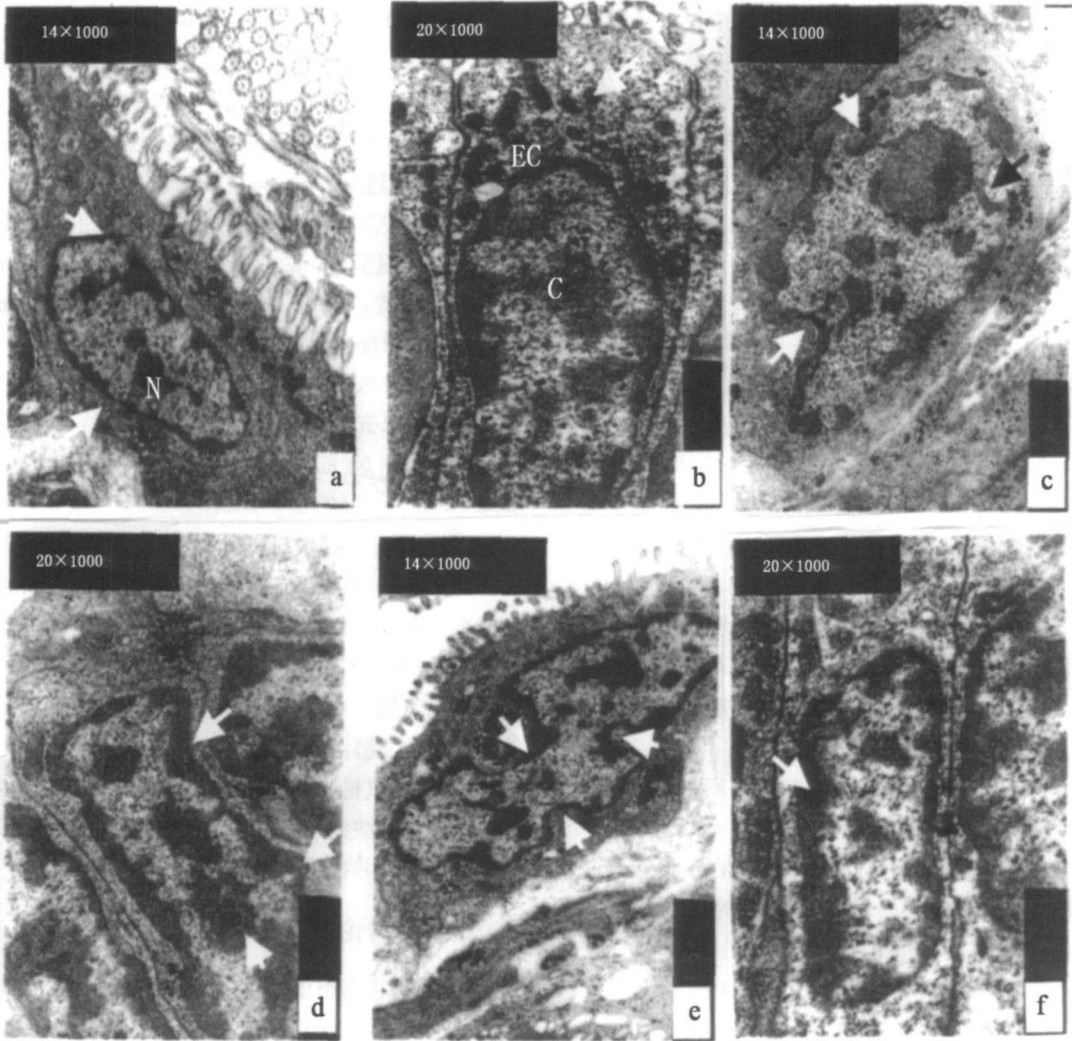


图 1 乐果和三唑磷对缙蛭鳃上皮细胞核形态的影响

Fig 1 Effect of dimethoate and triazophos on nuclear of branchial epithelium in *S. constricta*

N: 细胞核; G 染色质; EC: 常染色质; † 指示细胞核内陷或凸出。

a 对照组扁平细胞 FC; b 对照组柱状细胞 PC; c 乐果组扁平细胞 FC; d 乐果组柱状细胞 PC; e 三唑磷组扁平细胞 FC; f 三唑磷组柱状细胞 PC

水生生物的鳃是污染物进入体内的第一位点, 是对污染物最敏感的器官。Gold等<sup>[12]</sup>曾报道过石油烃、重金属污染使美洲牡蛎 (*Crassostrea virginica*) 的鳃上皮细胞水肿、增生。有关 OPs 胁迫对鱼、虾的鳃组织形态影响的研究报道很多<sup>[14-58, 13-15]</sup>。如魏焯辉<sup>[8]</sup>指出久效磷对美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*) 鳃显微结构的损伤表现为鳃小片上皮细胞水肿、脱离, 鳃小片基部粘连, 鳃小片上皮细胞角质化。Dutta等<sup>[15]</sup>报道经亚致死浓度的马拉硫磷暴露后, 鳃上皮细胞坏死破裂, 并与毛细血管脱离, 粘液分泌增多, 细胞增殖, 淋巴管肿胀。Vijaya lakshmi 等<sup>[4]</sup>发现久效磷使鲢 (*Labeo rohita*) 鳃组织坏死; 久效磷和氰戊菊酯 (1: 4) 的混合液可使鳃小片融合和萎缩。然

而有关 OPs 引起双壳类组织病变的研究却未发现。

细胞核是细胞的控制中心, 它提供了 DNA 和 RNA 转录和翻译的场所, 细胞核的损伤必然会严重影响其正常的生理功能。在三唑磷和乐果的胁迫下, 缙蛭鳃的细胞核严重变形, 核膜凸起或凹陷, 核膜溶胀, 模糊不清, 染色质凝聚和边缘化同时存在。这与 Li<sup>[23]</sup>报道的对硫磷对牙鲆鳃细胞核的影响相似, 如均引起细胞核膨胀, 核膜溶解, 染色质发生凝聚和边缘化, 但细胞核的结构未发生改变。

2.2.2 乐果和三唑磷对缙蛭鳃上皮细胞的各细胞器(线粒体、内质网、高尔基体)的影响

对照组鳃上皮细胞的细胞质中细胞器丰富, 线粒体

双层膜清楚, 嵴明显可见。内质网双膜结构清楚, 膜上附有颗粒状的核糖体, 细胞质中还有游离的核糖体, 未见滑面内质网。高尔基体位于细胞核内侧, 由一系列扁平小囊和小泡组成, 见图 2(a)、图 3(a)和图 4(a)。

在乐果的暴露下, 鳃上皮细胞部分线粒体肿大, 双层膜溶解, 内嵴部分消失, 见图 2(b); 在三唑磷的暴露下, 鳃上皮细胞的线粒体数量减少, 部分线粒体双膜结构溶解, 模糊不清, 内嵴减少, 甚至消失; 个别线粒体内嵴完全瓦

解, 形成电子透明区 (出现空泡), 见图 2(c)。在两种 OPs 暴露下, 粗面内质网轻微水肿, 双膜结构模糊, 核糖体部分脱落, 片层结构间距增大, 见图 3(b,c); 高尔基膜囊水肿, 膜溶解, 高尔基小泡破裂、消失, 见图 4(b,c)。

三唑磷和乐果染毒后, 缙蛭鳃上皮细胞线粒体的肿胀、破坏, 以及粗面内质网的水肿、片层结构间距增大, 高尔基膜囊水肿, 膜溶解, 高尔基小泡破裂、消失, 均反映了 OPs 的毒性效应。相关研究也表明, 细胞器的破坏是生物

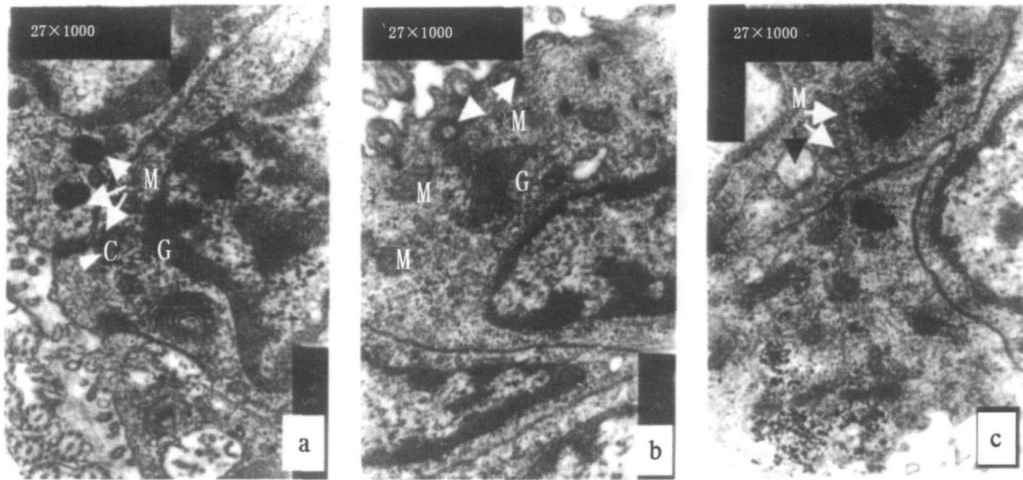


图 2 乐果和三唑磷对缙蛭鳃腺上皮细胞线粒体的影响

Fig 2 Effect of dimethoate and triazophos on mitochondria of branchial epithelium in *S. constricta*

M: 线粒体; C: 嵴; G: 高尔基体

a 对照组; b 乐果组; c 三唑磷组。

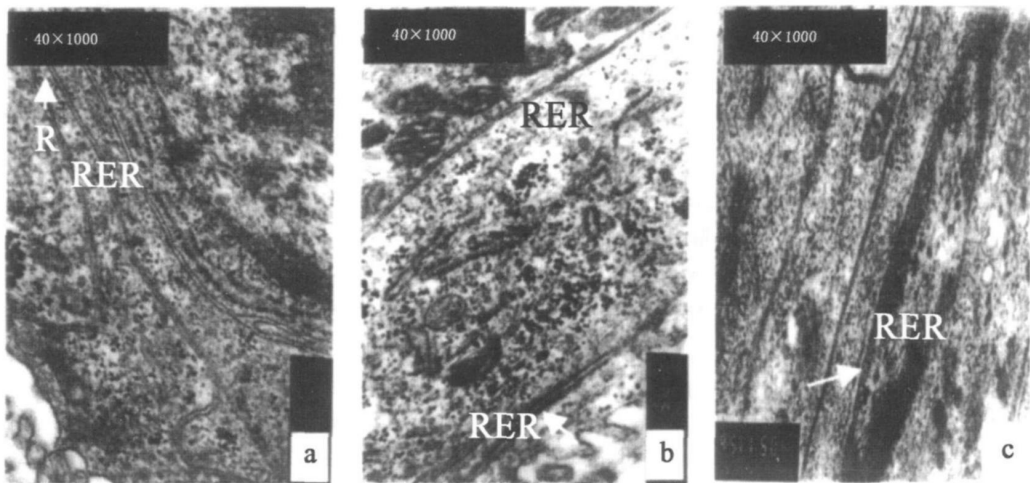


图 3 乐果和三唑磷对缙蛭鳃腺上皮细胞内质网的影响

Fig 3 Effect of dimethoate and triazophos on RER of branchial epithelium in *S. constricta*

RER 内质网; R 核糖体

a 对照组; b 乐果组; c 三唑磷组。

对毒物的常见响应。魏渲辉<sup>[8]</sup>指出久效磷对美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*) 鳃的超微结构影响主要为内质网、线粒体、微小管和核膜的水肿及部分溶解, 表现为由细胞膜损伤发展到细胞核损伤的动态过程。邴欣等<sup>[5]</sup>发现经久效磷处理 4d 后的真鲷, 内质网水肿, 线粒体外膜溶解, 糖

原颗粒增多, 部分核内染色质聚集, 核膜变形, 局部溶解; 处理 10 d 后, 核内染色质明显固缩, 核膜严重水肿, 甚至溶解; 部分线粒体嵴完全溶解; 糖原颗粒更多。汝少国等<sup>[7]</sup>研究久效磷对中国对虾鳃组织毒性效应时, 也发现各种细胞器的损伤。在本研究中, 三唑磷和乐果对缙蛭

鳃的超微结构的影响相同,都表现在细胞核和细胞器的损伤,说明两种 OPs对缢蛏的毒性效应有相似性,均造成细胞内膜系统的损害,使膜的渗透功能受损,细胞水肿。由于三唑磷脂溶性强,在缢蛏体内蓄积量较大,细胞线粒

体的损伤更为明显。在 OPs暴露下,缢蛏鳃的显微结构中观察到的基底膜结缔组织的大面积增生<sup>[16]</sup>亦可从超微结构变化中观察到的细胞水肿(线粒体肿大,粗面内质网扩张、高尔基膜囊水肿)中得到验证。

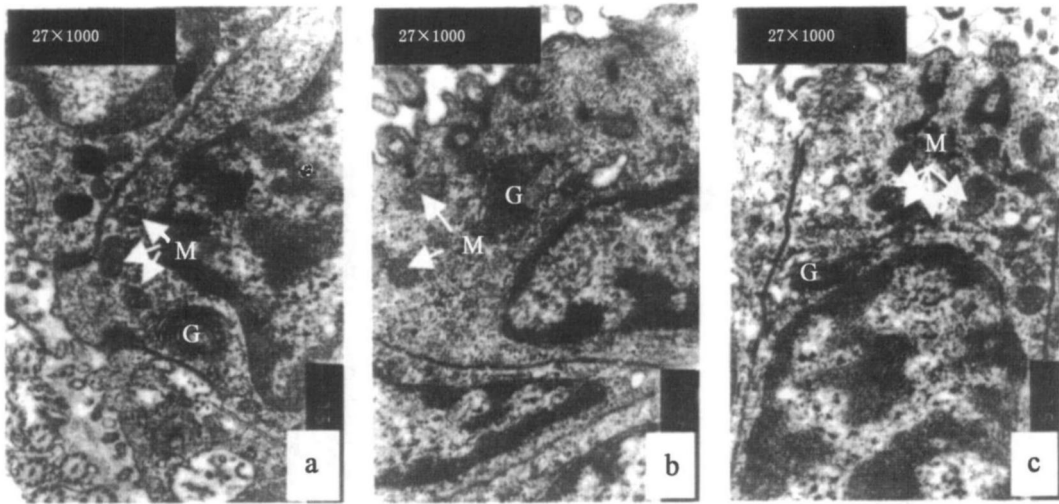


图 4 乐果和三唑磷对缢蛏鳃上皮细胞高尔基体的影响

Fig 4 Effect of dimethoate and triazophos on Golgi apparatus of branchial epithelium in *S. constricta*

G: 高尔基体; M: 线粒体

a 对照组; b 乐果组; c 三唑磷组。

鳃是缢蛏进行呼吸和摄食的主要器官。OPs胁迫下,鳃细胞核及染色质首先遭到破坏。鳃中最敏感的细胞器是线粒体,其次是粗面内质网,最不敏感的是高尔基体。Kent等<sup>[17]</sup>认为线粒体是 OPs介导的细胞毒性的主要作用靶点。线粒体是细胞呼吸及能量代谢的中心,线粒体的破坏,将无法提供足够的能量供纤毛摆动,致使纤毛摆动次数减少,造成鳃组织的氧交换能力下降,使机体处于缺氧状态。粗面内质网通过附着或解离核糖体,控制蛋白质的合成。高尔基体是细胞分泌物的最后加工和包装的场所,通过外排作用,将分泌物排出细胞之外。鳃中细胞线粒体的瓦解,粗面内质网的水肿、扩张和囊泡化,高尔基膜囊水肿、分离,高尔基小泡扩张、破裂等结构的严重破坏,都将影响气体交换的正常进行,导致蛋白质合成、运输中断,破坏糖蛋白和溶酶体的合成,造成生物体抗病能力的下降,进而破坏了整个细胞的生理活动。

### 3 结 论

两种 OPs均造成了鳃细胞超微结构的损伤,破坏了细胞核和各种细胞器,其中最敏感的细胞器是线粒体,其次是粗面内质网,最不敏感的是高尔基体。该实验结果从病理形态学方面证明了 OPs对缢蛏的毒性效应,并初步揭示了 OPs对贝类的毒理影响机制。

结合组织病理变化和贝类组织器官内 OPs含量的化学分析,可综合评价 OPs对缢蛏及其生长环境的影响,为预测 OPs对近海海洋生物及人类健康的影响提供有力的证据,为规范 OPs的应用、制定海洋环境质量标准提供部

分基础理论依据。

### 参考文献:

- [1] DUTTA H M, MUNSHI J S D, ROY P K, *et al* Ultra-structural changes in the respiratory lamellae of the catfish *Heteropneustes fossilis* after sublethal exposure to Malathion [J]. *Environmental Pollution*, 1996, 92(3): 329-341
- [2] LIH Y, ZHANG S C, JIANG M, *et al*. In vitro study on cytotoxic effects of the organophosphorus pesticide Profenofos on the gill cell line, FG-9307, of the flounder (*Paralichthys Olivaceus*) [J]. *Chin J Oceanol Limnol* 2001a, 19(1): 57-62
- [3] LIH Y, ZHANG S C. In vitro cytotoxicity of the organophosphorus pesticide Parathion to FG-9307 Cells [J]. *Toxicology in Vitro*, 2001b, 15(6): 643-647
- [4] VIJAYALAKSHMI S, TILAK K S. Effect of pesticides on the gill morphology of *Labeo Rohita* [J]. *J Ecotoxicology Environm ental Monitor*, 1996, 6(1): 59-64
- [5] 邢欣, 汝少国, 姜明, 等. 久效磷对真鲷鳃、肝和肾细胞超微结构的影响 [J]. *海洋科学*, 2002, 26(9): 42-45.
- [6] 汝少国, 李永祺, 姜明, 等. 久效磷对中国对虾细胞超微结构的影响 I 对肝胰脏和肌肉的毒性效应 [J]. *水产学报*, 1996, 20(1): 1-5.
- [7] 汝少国, 李永祺, 刘晓云, 等. 久效磷对中国对虾细胞超微结构的影响 II 对鳃的毒性效应 [J]. *应用生态学报*, 1997, 8(6): 655-658.
- [8] 魏渲辉, 汝少国, 姜明, 等. 久效磷对美国红鱼鳃  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATP酶活性和超显微结构的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2289-2294

(下转第 582 页)

表 2 PCBs 十种单体的检出限  
Tab 2 Limited determinations of 10 PCBs

PCBs 组份	CB 28	CB 52	CB 155	CB 101	CB 112	CB 118	CB 153	CB 138	CB 180	CB 198
仪器检出限 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	0.206	0.210	0.166	0.201	0.147	0.289	0.198	0.171	0.150	0.136
方法检出限 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	0.686	0.700	0.555	0.668	0.492	0.964	0.660	0.570	0.499	0.452

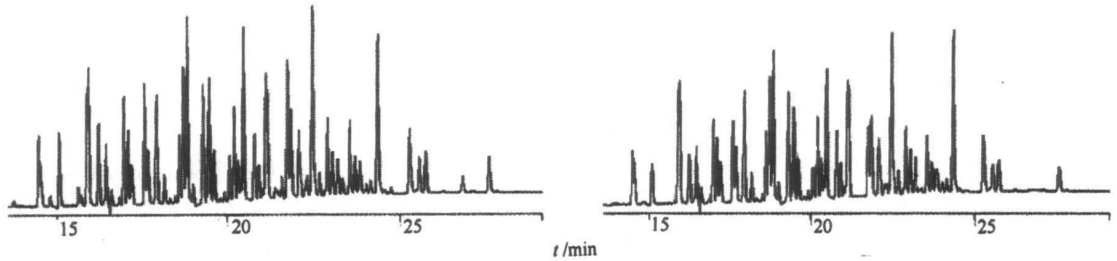


图 1 PCBs 标准溶液 (左) 与加标回收 (右) 色谱

Fig. 1 Chromatograms of standard solution (L) and recovery (R) of PCBs

小部分损失比较大。计算回收率和方法的相对偏差的结果见表 3 实验结果表明本方法对不同浓度的待测组分均有稳定的回收率和较好的重现性。

表 3 PCBs 的加标回收率和相对标准偏差

Tab 3 Recoveries and relative standard deviations of PCBs

加标量 / $\text{ng}$	回收率 / (%)	精密度 / (%)
50.9	84.1 ~ 100.8	4.7
102.3	84.5 ~ 97.6	4.8
204.6	87.9 ~ 101.5	4.4

### 3 结 语

建立了海水中 PCBs 的前处理及气相色谱分析方法。PCBs 加标量为 50.9 ng 样品时, 回收率范围是 84.1% ~

100.8%, 相对标准偏差为 4.7%; 加标量为 102.3 ng 样品时, 回收率范围是 84.5% ~ 97.6%, 相对标准偏差为 4.8%; 加标量为 204.6 ng 样品时, 回收率范围是 87.9% ~ 101.5%, 相对标准偏差为 4.4%。本方法具有灵敏、快速、简便等特点, 能满足海水中 PCBs 的监测要求。

#### 参考文献:

- [1] 董亮, 封跃鹏, 彭鸿俊. 环境样品中 PCBs 的测定 [J]. 中国环境监测, 2002, 18(1): 35-37
- [2] 黄业茹, 施钧慧, 唐莉. GC/MS 分析环境样品中的多氯联苯 (PCBs) [J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(4): 216-224
- [3] 储少岗, 徐晓白. 环境样品中非邻位取代共平面多氯联苯的测定 [J]. 环境化学, 1997, 16(4): 327-332

(上接第 572 页)

- [9] AUD W T. The application of hist-cytopathological biomarkers in marine pollution monitoring: A review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48: 817-834
- [10] SIEGELMAN H W, GUILLARD R L. Large scale culture of algae [M]. New York: Academic Press, 1971: 110-115
- [11] 蔡道基. 农药环境毒理学研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999
- [12] GOLD B G, SMA A R, ZAPATA-PEREZ O, et al. Histopathological effects of petroleum hydrocarbons and heavy metals on the American oyster (*Crassostrea virginica*) from Tabasco, Mexico [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31: 439-445
- [13] DUTTA H M, MUNSHI J S D, ROY P K, et al. Variation in toxicity of Malathion to air and water-breathing teleosts [J]. Bulletin Environment Contaminant Toxicology, 1992, 49: 279-

284

- [14] ROY P K, MUNSHI J S D. Malathion induced structural and morphometric changes of gills of a freshwater major carp, *Cirrhinus mrigala* (Ham.) [J]. Journal of Environmental Biology, 1991, 12: 79-87
- [15] DUTTA H M. Histopathological changes induced by malathion in the gills of bluegill *Lepomis macrochirus* [J]. Bulletin Environment Contaminant Toxicology, 1989, 43: 123-130
- [16] 薛秀玲, 袁东星. 有机磷农药对缙蛭 [*Sinonovacula constricta* (Lamarck)] 显微结构的影响 [J]. 环境化学, 2006, 25(3): 310-314
- [17] KENT, C, MARION, E. Organophosphorus compound-induced modification of SH-SY5Y human neuroblastoma mitochondrial transmembrane potential [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1999, 160(1): 33-42