

DDTs 和 HCHs 在珠江口南部海域管角螺的组织分布及生物转化*

田磊^{1,2} 张大文¹ 黄小平^{1**}

(¹ 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 通过测定珠江口海域典型腹足类管角螺(*Hemifusus tuba*)各组织器官中 DDTs 和 HCHs 的含量,研究了管角螺体内 DDTs 和 HCHs 的组织分布和生物转化规律。结果表明:管角螺肠中 DDTs 和 HCHs 含量远高于其他器官,表明其肠壁对有机氯农药有一定的屏蔽作用;性腺中检出较高浓度的 DDTs 和 HCHs,表明性腺是 DDTs 和 HCHs 重要的累积器官;各组织器官中的(DDE+DDD)/p,p'-DDT 比值(3.20~7.53)均高于沉积物(1.23),说明管角螺具有较强的降解 DDT 能力;腮中这一比值高于其他各器官,表明腮可能是管角螺排泄 DDTs 的潜在器官; β -HCH 是 HCHs 各器官中的主要存在形式(63.88%~88.99%),表明生物体可以高效地将 α -HCH 降解为 β -HCH;管角螺肌肉组织中 DDTs 和 HCHs 的含量虽未超过 WHO 规定的食用安全标准,但有机氯农药沿食物链放大对人类健康的潜在危害需重点关注。

关键词 有机氯农药;海洋腹足类;累积;生物转化;珠江口南部海域

中图分类号 X131 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)1-0012-06

Distribution and biotransformation of DDTs and HCHs in *Hemifusus tuba* from the southern Pearl River Estuary. TIAN Lei^{1,2}, ZHANG Da-wen¹, HUANG Xiao-ping^{1**} (¹Key Laboratory of Tropical Marine Environment Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(1): 12-17.

Abstract: Based on the measurements of DDTs and HCHs concentrations in various tissues of *Hemifusus tuba* from the southern Pearl River Estuary, the distribution and biotransformation of the two organochlorine pesticides (OCPs) in this marine gastropod were examined. The DDTs and HCHs concentrations in *H. tuba* intestine were much higher than those in other tissues, suggesting that the intestinal wall of *H. tuba* was an important barrier to DDTs and HCHs. The higher DDTs and HCHs concentrations in *H. tuba* gonad suggested that the gonad was an important site for the accumulation of DDTs and HCHs. The (DDE+DDD)/p,p'-DDT ratio in various *H. tuba* tissues (3.20-7.53) was much higher than that in sediment (1.23), indicating that *H. tuba* had stronger capability to metabolize DDT. The highest (DDE+DDD)/p,p'-DDT ratio was found in gill, suggesting that gill could play an important role in excreting the DDT metabolites (DDD and DDE) in *H. tuba*. Among the HCHs in all *H. tuba* tissues, β -HCH was the most persistent HCH isomer (63.88%-88.99%), implying that *H. tuba* was able to efficiently degrade α -HCH to β -HCH. Though the DDTs and HCHs concentrations in *H. tuba* muscles did not exceed the tolerable daily intake standard proposed by the WHO, more attention should be paid to the potential risks of OCPs biomagnification along food chain to human health.

Key words: organochlorine pesticide; marine gastropod; accumulation; biotransformation; southern Pearl River Estuary.

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCXZ-YW-Q07)、908 专项(GD908-01-03、GD908-02-02)和国家自然科学基金项目(41076069、40776086)资助。

** 通讯作者 E-mail: xphuang@scsio.ac.cn

收稿日期: 2010-07-20 接受日期: 2010-10-09

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs), 特别是滴滴涕 (DDTs) 和六六六 (HCHs), 是一类难降解的持久性有机污染物, 因其高效、广谱而曾被广泛应用于防治农业病虫害。然而, 由于其具有较大的毒性作用 (Willett *et al.*, 1998), 20 世纪 70—90 年代, 世界各国先后禁止了 DDTs 和 HCHs 等农药的生产和使用。但因其化学性质稳定, 至今在各种环境介质中仍然检测到有机氯农药的广泛存在 (Fu *et al.*, 2003; Sarkar *et al.*, 2008)。此外, 已有研究表明, DDTs 和 HCHs 可以在生物体内富集并沿食物链放大 (Sarkar *et al.*, 2008), 威胁人类身体健康。

目前, 世界上已有较多研究探讨了 OCPs (主要是 DDTs) 在不同水生生物体内的组织分布及生物转化, 包括虾 (Nimmo *et al.*, 1970)、蟹 (Sheridan, 1975)、双壳类 (Kwong *et al.*, 2009) 和鱼类 (Guo *et al.*, 2008; Kwong *et al.*, 2008), 仅有少数学者探讨了 OCPs 在海洋腹足类整个软体组织的累积水平 (Wang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008)。到目前为止, 还未见关于 DDTs 和 HCHs 在海洋腹足类动物体内组织分布和生物转化研究的报道。

OCPs 具有高疏水性和脂溶性, 导致其极易附着在悬浮颗粒物上, 最终进入沉积物, 而海洋腹足类处于海洋食物链的底端, 生活在有机氯农药污染较严重的海底, 摄食过程中直接或间接摄取吸附有高含量的 OCPs 的颗粒悬浮物, 进而使 OCPs 向高营养级生物传递并放大, 对人类健康带来巨大危害。因此, 非常有必要加强对有机氯农药在海洋腹足类动物中的组织分布和累积水平的研究。本研究首次对珠江口海域典型腹足类动物管角螺 (*Hemifusus tuba*) 体内 DDTs 和 HCHs 的组织分布和生物转化规律进行探讨和分析, 并评估该生物体内 OCPs 对人类健康的潜在危害, 为近岸海域生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

珠江三角洲地区是中国经济发展最快的区域之一, 该区域汇集了广东省主要的发达城市 (广州、珠海和深圳等), 以及香港和澳门特别行政区。近 20 年来, 随着珠三角地区工业化和城镇化进程, 该地区土壤中残留的 OCPs 向水环境中大量转移 (Zhang *et al.*, 2002)。到目前为止, 珠江口海域水体和沉积物中 OCPs 的残留水平仍然较高 (Fu *et al.*, 2003)。

2009 年 12 月, 在珠江口南部海域使用生物底拖网采集管角螺生物样品 (共 14 只; 螺重为 43.91 ± 12.38 g; 壳高和壳宽分别为 90.25 ± 11.10 mm 和 40.93 ± 5.50 mm), 现场海水冲洗, 装入密封塑料袋并放入冰壶, 同时用抓泥斗采集拖网区表层沉积物样品 (S_1 和 S_2), 装入密封塑料袋, 带回实验室在 -20 °C 下保存至分析, 采样位置见图 1。

1.2 样品处理

生物样品制备参照《海洋监测规范》(GB 17378.6—2007)。解冻后, 使用蒸馏水漂洗, 置于清洁的工作台上, 用不锈钢剪刀剪切分出腮、肠、肝脏、性腺、足和余体部分, 多个体样品合并匀浆。称取 5 g 生物湿样用索式法提取于正己烷中, 提取液经硅胶层析柱净化浓缩, 作为样品净化液, 待测定。

沉积物样品制备参照《海洋监测规范》(GB 17378.5—2007), 经避光自然风干后, 用玛瑙研钵粉碎研磨过 80 目筛。其样品提取及样品净化过程与生物样品基本一致, 称取 20 g 干样用索式法提取于正己烷中, 提取液经硅胶层析柱净化浓缩, 作为样品净化液, 待测定。

1.3 样品分析

气相色谱仪 (Agilent 7890), 配用 DB-5 毛细管柱 (柱长 30 m, 内径 0.25 mm, 液膜厚度 0.25 μ m)

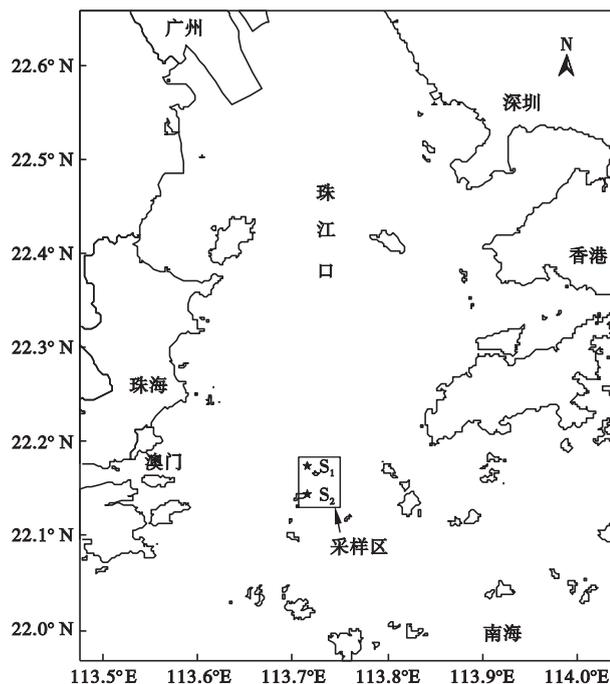


图 1 珠江口南部海域采样站示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in the southern Pearl River Estuary, China

分析生物样和沉积物中 DDTs (包括 p,p' -DDE、 p,p' -DDD、 p,p' -DDT、 o,p' -DDT) 和 HCHs (包括 α -HCH、 γ -HCH、 β -HCH、 δ -HCH) 的含量。以高纯氮气为载气, $1 \mu\text{l}$ 无分流进样, 检测器温度保持为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 程序升温条件为: 初始温度 $120 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 1 min , 然后以 $12 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 $280 \text{ }^\circ\text{C}$, 并在 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 保持 10 min 。

1.4 质量控制

利用有机氯农药标准物质的 GC 保留时间对 DDTs 和 HCHs 定性, 内标法定量, 分析由计算机自动完成。DDTs 和 HCHs 的平均回收率分别为 $(101 \pm 8.4)\%$ 和 $(95 \pm 4.5)\%$ 。

1.5 数据处理

利用 EXCEL 进行数据统计和作图。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中 OCPs 的含量及组成

采样区表层沉积物中 DDTs 和 HCHs 含量及各同分异构体组成见表 1。DDTs 和 HCHs 的平均浓度分别为 $4.16 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.323 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)。DDTs 在 S_1 处含量为 $4.19 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 主要存在形式是 p,p' -DDT (46.05%) 和 p,p' -DDD (20.23%); S_2 处 DDTs 含量为 $4.13 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 主要存在形式是 p,p' -DDT (32.97%) 和 p,p' -DDD (44.85%)。对于

HCHs, 仅在 S_1 检测到 α -HCH 和 β -HCH 两种异构体, 分别占 HCHs 的 77.83% 和 22.17%。

2.2 管角螺各组织器官中 OCPs 的含量及组成

管角螺整个软体组织 DDTs 和 HCHs 含量分别为 22.4 和 $5.57 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各器官中 DDTs 和 HCHs 的含量及组成分别见图 2 和图 3。肠中 DDTs 的含量最高 ($81.75 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 其后依次是足 ($26.50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、性腺 ($20.80 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、余体 ($20.71 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、腮 ($20.54 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 和肝 ($11.90 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。而 HCHs 含量最高的是肠 ($19.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 其后依次是肝 ($8.00 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、性腺 ($7.61 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、腮 ($5.97 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、足 ($5.74 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 和余体 ($4.26 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。可见, 肠中 DDTs 和 HCHs 含量明显高于其他器官。

从表 2 可以看出, 管角螺各个器官中累积的 DDTs 主要以 p,p' -DDE 形式存在 ($54.08\% \sim 100.00\%$), p,p' -DDT、 o,p' -DDT 和 p,p' -DDD 分别占 $0 \sim 21.06\%$ 、 $0 \sim 13.47\%$ 和 $0 \sim 11.83\%$ 。对于 HCHs, β -HCH ($63.88\% \sim 88.99\%$) 是各器官累积的主要形式, α -HCH 和 δ -HCH 分别占 $9.47\% \sim 36.13\%$ 和 $0 \sim 3.57\%$, γ -HCH 基本未检出 (除肠外)。

本研究中, $(\text{DDE}+\text{DDD})/p,p'$ -DDT 在沉积物中为 1.23, 在管角螺体内呈现如下递减趋势: 腮 (7.53) > 肠 (3.87) > 足 (3.26) > 余体 (3.20), 肝和性腺均未检出 p,p' -DDT。

表 1 珠江口南部海域表层沉积物中 DDTs 和 HCHs 含量及各同分异构体组成 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 干重)

Table 1 DDTs and HCHs concentration and composition in surface sediments from the southern Pearl River Estuary

采样站	DDTs				HCHs			
	p,p' -DDE	p,p' -DDD	o,p' -DDT	p,p' -DDT	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH
S_1	0.77	0.848	0.643	1.93	0.502	0.143	nd	nd
S_2	0.59	1.85	0.325	1.36	nd	nd	nd	nd

nd 未检出。

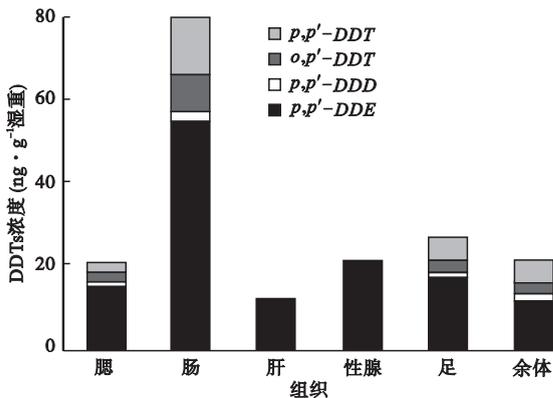


图 2 珠江口南部海域管角螺各组织中 DDTs 浓度
Fig. 2 DDTs concentration in tissues of *Hemifusus tuba* in the southern Pearl River Estuary

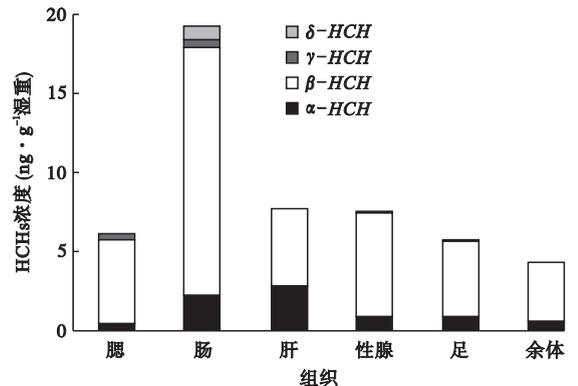


图 3 珠江口南部海域管角螺各组织中 HCHs 浓度
Fig. 3 HCHs concentration in tissues of *Hemifusus tuba* in the southern Pearl River Estuary

表 2 珠江口南部海域管角螺体内 DDTs 和 HCHs 各同分异构体的百分组成

Table 2 Relative abundance of individual DDT and HCH components (to total DDTs and HCHs, %) in *Hemifusus tuba* from the southern Pearl River Estuary

OCP 类型	同分异构体	腮	肠	肝	性腺	足	余体
DDTs	<i>p,p'</i> -DDE	72.54	67.03	100	100	61.89	54.08
	<i>p,p'</i> -DDD	6.33	3.43	nd	nd	6.75	11.83
	<i>o,p'</i> -DDT	10.66	11.31	nd	nd	10.30	13.47
	<i>p,p'</i> -DDT	10.47	18.23	nd	nd	21.06	20.62
HCHs	α -HCH	9.47	10.93	36.13	10.04	12.36	13.59
	β -HCH	87.21	82.35	63.88	88.99	86.44	86.41
	γ -HCH	nd	3.15	nd	nd	nd	nd
	δ -HCH	3.31	3.57	nd	0.97	1.20	nd

nd 未检出。

表 3 不同海域表层沉积物中 DDTs 和 HCHs 的含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 干重)

Table 3 Concentration of DDTs and HCHs in surface sediment from different regions

海域名称	DDTs	HCHs	文献
韩国沿岸	0.006 ~ 135 (0.68)	nd ~ 5.46 (0.32)	Hong <i>et al.</i> , 2006
印度孟加拉湾	0.04 ~ 4.79	0.17 ~ 1.56	Rajendran <i>et al.</i> , 2005
渤海湾	0.18 ~ 22 (4.7)	0.1 ~ 1.8 (0.5)	王泰等, 2008
厦门海域	2.53 ~ 23	0.263 ~ 0.945	张元标和林辉, 2004
大亚湾	8.69 ~ 34.34 (19.05)	1.79 ~ 4.64 (2.72)	Wang <i>et al.</i> , 2008
海南小海湾	0.03 ~ 5.38 (1.44)	0.12 ~ 1.49 (0.41)	穆倩等, 2007
海南东寨港	0.07 ~ 4.56 (0.57)	0.04 ~ 2.30 (0.53)	刘华峰等, 2007
珠江口南部海域	4.06 ~ 4.26 (4.16)	nd ~ 0.645 (0.323)	本研究

括号中数字表示平均值, nd 未检出。

DDT 的降解程度及来源, 环境介质中高百分含量的 *p,p'*-DDT 被认为是存在新的 DDTs 输入 (Fu *et al.*, 2003)。本研究中, S_1 样点表层沉积物中高的 *p,p'*-DDT 含量及较低的 $(\text{DDE} + \text{DDD})/p,p'$ -DDT 比值 (0.838), 均显示仍有新的 DDTs 源输入, 而 S_2 样点中 $(\text{DDE} + \text{DDD})/p,p'$ -DDT = 1.79, 远 > 1, 表明该地区近期没有新的 DDT 输入, 且已输入的 DDT 类农药降解较完全。 S_1 样点沉积物中 α -HCH 和 β -HCH 两种异构体分别占 HCHs 的 77.83% 和 22.17%, 这与工业 HCH 组成相似 (即 α -HCH 60% ~ 70%、 β -HCH 5% ~ 12%、 γ -HCH 10% ~ 15%、 δ -HCH 6% ~ 10%), 表明 S_1 处仍有新的 HCHs 输入。

3.2 管角螺体内 OCPs 的累积

一般来说, 水生生物累积 OCPs 主要通过两种途径: 一种是通过腮膜从水中吸收; 另一种是通过摄食从肠道吸收, 不同生物的积累途径不尽相同 (Sheridan, 1975; Thomann *et al.*, 1992; Wang & Wang, 2005)。如青蟹 (*C. sapidus*) 主要通过鳃从水体中累积 DDT, 肠道吸收微乎其微 (Sheridan, 1975)。一些研究认为, 鱼类主要通过水相累积 DDT (Thomann *et al.*, 1992; Wang & Wang, 2005);

3 讨论

3.1 沉积物中 OCPs 累积水平及组成特征

本研究中, 采样区表层沉积物中 DDTs 和 HCHs 的含量分别为 $4.16 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.323 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。研究区域表层沉积物 DDTs 含量低于大亚湾和厦门海域, 与渤海湾相当, 高于海南小海湾、海南东寨湾、印度孟加拉湾及韩国沿岸平均水平 (表 3)。HCHs 含量低于大亚湾, 与渤海湾、海南小海湾、海南东寨湾及韩国沿岸平均水平相当。

$(\text{DDE} + \text{DDD})/p,p'$ -DDT 已被广泛用于评估

Guo 等 (2008) 通过分析 OCPs 在鱼体的组织分布认为, 鳃和肠道同等重要。本研究中, 管角螺腮中的 DDTs 与 HCHs 含量与其他内部器官中的含量相当, 而肠中 DDTs 和 HCHs 含量远高于其他器官, 这表明: 1) 鳃吸收可能是有机氯农药进入管角螺体内的主要途径; 2) 肠对 OCPs 有一定的屏蔽作用, 管角螺可能通过这一机制来减少有毒物质对自身内部器官的危害, 但这种肠道屏蔽作用在生物体累积 POPs 过程中的作用还需进一步评估。

本研究中, 性腺是除肠外累积 DDTs 和 HCHs 第二多的器官, 性腺作为 DDTs 和 HCHs 的靶器官在鼓鱼 (*C. guatucupa*) (Lanfranchi *et al.*, 2006) 和贻贝 (Roberts, 1976) 中也有发现。然而, 大多数研究表明, 肝是 OCPs 等在水生生物体内累积的主要器官如虾 (Nimmo *et al.*, 1970)、蟹 (Sheridan, 1975)、贻贝 (Kwong *et al.*, 2009) 和鱼体 (Guo *et al.*, 2008)。水生生物间累积模式的差异可能与 OCPs 在生物体内的传递途径、代谢能力及食性不同有关。毒理学研究证实, 持久性有机污染物不仅对生物体生殖系统有急慢性毒性, 还可以从母体传递给子代, 对子代的生长发育造成潜在威胁。鼓鱼产卵前卵巢

OCPs 含量显著高于产卵后的 (Lanfranchi, 2003)。Mlambo 等(2009)指出, DDT 在不造成体罗非鱼 (*O. mossambicus*) 性腺出现明显组织损伤的情况下, 导致卵巢卵母细胞萎缩和睾丸精小管损伤几率增大, 并且造成幼体成活率降低、畸形率增加。以上研究表明, 管角螺性腺中较高浓度的 DDTs 和 HCHs 有可能会对其生殖系统造成潜在损伤, 进而对其子代的成活率及种群数量产生影响。

3.3 管角螺体内 OCPs 的代谢转化

生物体既可以将 DDT 转化成 DDD, 进一步还原脱氯生成 DDE, 也可以在氧化条件下直接脱去氯化氢生成 DDE (Covaci *et al.*, 2004)。本研究沉积物中的 DDTs 主要是 *p,p'*-DDT 和 *p,p'*-DDD, 生物体内主要以 *p,p'*-DDE 形式存在, 表明将 DDT 转化成 DDE 是管角螺代谢 DDT 的主要途径。值得注意的是, 同样作为净累积器官的性腺和足(肌肉), DDTs 组成差异较大, 这表明, DDTs 的累积不仅与 DDT 各异构体的物理化学性质有关, 而且还与足和性腺的物质组成及代谢/排泄能力有关。

本研究中, 生物体各器官中 (DDE+DDD)/*p,p'*-DDT 比值均大于沉积物, 进一步说明了管角螺可以有效代谢部分 DDT。研究结果还显示, 腮中这一比值高于其他各器官, 表明腮在机体排泄 DDTs 降解产物 (DDE 和 DDD) 过程中扮演着重要角色。腮是亲脂性化学物质进出生物体的主要器官, 因此, 腮可能是管角螺排泄 DDTs 的潜在器官 (Mckim *et al.*, 1986)。

β -HCH 是 HCHs 各异构体中物化性质最稳定的, 可以在环境中滞留比较长的时间, 因此 β -HCH 是 HCHs 在各类软体动物和鱼体中的主要存在形式 (Wang *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2008)。不仅如此, 研究发现生物体可有效的将 α -HCH 降解为 β -HCH (Willett *et al.*, 1998), 本研究也得出了相似的结论, 本研究发现, 沉积物中的 HCHs 绝大部分为 α -HCH (77.83%), 而生物体各组织器官主要累积 β -HCH (63.9%~89.0%), 表明管角螺能有效的将 α -HCH 降解为 β -HCH。

3.4 人体健康风险评估

对于人类来说, 消费已被污染的食品, 特别是处于较高营养级的海鱼和哺乳类, 是有毒物质进入人体的一个主要途径 (李雪梅等, 2007)。本研究中, 管角螺的足(除肠外)是累积 DDTs 最多的器官, 通过计算平均每人每天海鲜类水产品的消费量, 可以

得出人体通过海鲜类水产品摄入 DDTs 和 HCHs 的量。因此, 假定一个 60 kg 的成人每人每天食用 100 g 的海产品, 那么在本研究中, 每天进入人体内的 DDTs 和 HCHs 的含量分别是 0.044 和 0.0096 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于世界卫生组织 (WHO) 的标准 (20 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。可见, 腹足类体内 OCPs 的毒性尚未对人类的健康构成危害。然而, 海洋腹足类处于海洋食物链的底端, 同时, 有机氯农药具有沿着食物链放大的潜力, 例如, 有报道称 DDE 在北海冰穴的食物链 (包括浮游动物、深海无脊椎动物、北极鳕、海鸟、环斑海豹) 的食物网生物放大因子为 9.7 (Fisk *et al.*, 2001), 因此, OCPs 对人类健康的潜在危害需要重点关注。

4 结论

肠中 DDTs 和 HCHs 含量远高于其他器官, 表明管角螺肠壁对有机氯农药有一定的屏蔽作用; 性腺中检出较高浓度的 DDTs 和 HCHs, 说明性腺是 DDTs 和 HCHs 在管角螺体内重要的累积器官。

腮中 (DDE+DDD)/*p,p'*-DDT 比值高于其他各器官, 表明管角螺腮可能是排泄 DDTs 的潜在器官; β -HCH 是 HCHs 在管角螺体内的主要存在形式, 表明生物体可以高效的将 α -HCH 降解为 β -HCH。

肌肉组织中 DDTs 和 HCHs 的含量虽未超过 WHO 规定的食用安全标准, 但有机氯农药沿食物链放大对人类健康的潜在危害需重点关注。

致谢 感谢国家海洋局南海环境监测中心在样品测定时给予的帮助。

参考文献

- 李雪梅, 张庆华, 甘一萍, 等. 2007. 持久性有机污染物在食物链中积累与放大研究进展. 应用与环境生物学报, **13**(6): 901-905.
- 刘华峰, 祁士华, 苏秋克, 等. 2007. 海南东寨港表层沉积物中有机氯农药的组成特征. 中国环境科学, **27**(1): 97-101.
- 穆倩, 祁士华, 王君, 等. 2007. 小海湾沉积物中有机氯农药的浓度水平和分布特征. 安全与环境工程, **14**(2): 9-12.
- 王泰, 黄俊, 余刚. 2008. 海河与渤海湾沉积物中 PCBs 和 OCPs 的分布特征. 清华大学学报(自然科学版), **48**(9): 1462-1465.
- 张元标, 林辉. 2004. 厦门海域表层沉积物中 DDTs、HCHs 和 PCBs 的含量及其分布. 台湾海峡, **23**(4): 423-428.
- Covaci A, Gheorghe A, Schepens P. 2004. Distribution of or-

- ganochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls and alpha-HCH enantiomers in pork tissues. *Chemosphere*, **56**: 757-766.
- Fisk AT, Hobson KA, Norstrom RJ. 2001. Influence of chemical and biological factors on trophic transfer of persistent organic pollutants in the Northwater Polynya marine food web. *Environmental Science & Technology*, **35**: 732-738.
- Fu JM, Mai BX, Sheng GY, et al. 2003. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: An overview. *Chemosphere*, **52**: 1411-1422.
- Guo Y, Meng XZ, Tang HL, et al. 2008. Tissue distribution of organochlorine pesticides in fish collected from the Pearl River Delta, China: Implications for fishery input source and bioaccumulation. *Environmental Pollution*, **155**: 150-156.
- Hong SH, Yim UH, Shim WJ, et al. 2006. Nationwide monitoring of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments from coastal environment of Korea. *Chemosphere*, **64**: 1479-1488.
- Kwong RWM, Yu PKN, Lam PKS, et al. 2008. Uptake, elimination, and biotransformation of aqueous and dietary DDT in marine fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **27**: 2053-2063.
- Kwong RWM, Yu PKN, Lam PKS, et al. 2009. Biokinetics and biotransformation of DDTs in the marine green mussels *Perna viridis*. *Aquatic Toxicology*, **93**: 196-204.
- Lanfranchi AL, Menone ML, Mighoranza KSB, et al. 2006. Striped weakfish (*Cynoscion guatucupa*): A biomonitor of organochlorine pesticides in estuarine and near-coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*, **52**: 74-80.
- Lanfranchi AL. 2003. Compuestos organoclorados en la biota de zonas estuariales bonaerenses (Doctoral Thesis). Facultad Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata; 188.
- Mckim JM, Schmieder PK, Erickson RJ. 1986. Toxicokinetic modeling of [¹⁴C] pentachlorophenol in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aquatic Toxicology*, **9**: 59-80.
- Mlambo SS, van Vuren JHJ, Barnhoorn IEJ, et al. 2009. Histopathological changes in the reproductive system (ovaries and testes) of *Oreochromis mossambicus* following exposure to DDT. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **28**: 133-139.
- Nimmo DR, Wilson AJ, Blackman RR. 1970. Localization of DDT in the body organs of pink and white shrimp. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **5**: 333-341.
- Rajendran RB, Imagawa I, Tao H, et al. 2005. Distribution of PCBs, HCHs and DDTs, and their ecotoxicological implications in Bay of Bengal, India. *Environment International*, **31**: 503-512.
- Roberts D. 1976. Mussels and pollution// Bayne BL, ed. *Marine Mussels: Their Ecology and Physiology*. London: Cambridge University Press; 67-80.
- Sarkar SK, Bhattacharya BD, Bhattacharya A, et al. 2008. Occurrence, distribution and possible sources of organochlorine pesticide residues in tropical coastal environment of India: An overview. *Environment International*, **34**: 1062-1071.
- Sheridan PF. 1975. Uptake, metabolism and distribution of DDT in organs of the Blue Crab *Callinectes sapidus*. *Chesapeake Sciences*, **16**: 20-26.
- Thomann RV, Connolly JP, Parkerton TF. 1992. An equilibrium model of organic chemical accumulation in aquatic food webs with sediment interaction. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **11**: 615-629.
- Wang XH, Wang WX. 2005. Uptake, absorption efficiency and elimination of DDT in marine phytoplankton, copepods and fish. *Environmental Pollution*, **136**: 453-464.
- Wang YW, Wang TH, Li A, et al. 2008. Selection of bioindicators of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in mollusks in the Chinese Bohai Sea. *Environmental Science & Technology*, **42**: 7159-7165.
- Wang YW, Yang RQ, Jiang GB. 2007. Investigation of organochlorine pesticides (OCPs) in mollusks collected from coastal sites along the Chinese Bohai Sea from 2002 to 2004. *Environmental Pollution*, **146**: 100-106.
- Wang ZY, Yan W, Chi JS, et al. 2008. Spatial and vertical distribution of organochlorine pesticides in sediments from Daya Bay, South China. *Marine Pollution Bulletin*, **56**: 1578-1585.
- Willett KL, Ulrich EM, Hites RA. 1998. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers. *Environmental Science & Technology*, **32**: 2197-2207.
- Zhang G, Parker A, House A, et al. 2002. Sedimentary records of DDT and HCH in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Science & Technology*, **36**: 3671-3677.

作者简介 田磊,男,1983年生,硕士研究生。主要从事海洋环境研究。E-mail: tianlei@scsio.ac.cn
责任编辑 李凤芹
