

有机氯农药在粤西海域沉积物和生物体中的累积研究*

施震^{1,2}, 张大文¹, 黄小平¹, 汪飞^{1,2}

(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, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2007 年 11 月在粤西海域采集鱼、虾和螺类等生物样品及表层沉积物样品, 探讨生物体和沉积物中滴滴涕 (DDTs) 和六六六 (HCHs) 累积水平和各组分的组成规律。调查发现, 沉积物中 HCHs 和 DDTs 的总含量分别是 $4.77\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $9.06\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 沉积物中 γ -HCH 未检出, 且 δ -HCH 和 β -HCH 所占比例较大, 表明粤西沿海区近期无新的 HCHs 输入。沉积物中 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\text{T-DDT}=0.97\approx 1$, 表明粤西沿海区基本上没有新的 DDT 的输入。生物体内 HCHs 和 DDTs 的含量分别为 $0.84\text{—}14.90\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.60\text{—}18.40\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中天竺鲷 *Apogon cyanosoma* 和日本对虾 *Penaeus japonicus* 中累积的 HCHs 主要以 α -HCH 的形式存在, 分别占 73.96% 和 100%, 而纵带箸鲷 *Brachirus swinhonis*、斑节对虾 *Penaeus monodon* 和疣荔枝螺 *Thais clavigera* 中 HCHs 的主要存在形式分别是 γ -HCH (66.10%)、 β -HCH (57.14%) 和 δ -HCH (61.48%), 这说明不同生物体对 HCHs 的累积方式存在很大差异; 疣荔枝螺、天竺鲷、斑节对虾、日本对虾和纵带箸鲷中的 $(\text{DDE}+\text{DDD})$ 占 DDTs 总量的百分比分别是 100%、100%、91.5%、91.4% 和 60.5%, 表明这些生物体具有较强的降解 DDT 能力。各种生物体内 DDTs 和 HCHs 的含量都未超过世界卫生组织所规定的食用安全标准, 但是其复合毒性对人类健康的潜在危害值得引起人们的高度关注。

关键词: 有机氯农药; 粤西海域; 沉积物; 生物体; 同分异构体

中图分类号: P762.31 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)03-0114-06

Bioaccumulation of organochlorine pesticides in organisms and sediments in the western coastal waters of Guangdong province

SHI Zhen^{1,2}, ZHANG Da-wen¹, HUANG Xiao-ping¹, WANG Fei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Levels and profiles of DDTs and HCHs in fish, shrimp, snail and sediments in the western coastal waters of Guangdong province are discussed in this paper. The total concentrations of DDTs and HCHs in sediments were $9.06\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and $4.77\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. γ -HCH in sediments was not detected; β -HCH and δ -HCH accounted for a large proportion, indicating that there was no current import of fresh HCHs into the western coastal waters of Guangdong province. High value of $(\text{DDD}+\text{DDE})/\text{T-DDT}$ (0.97) in sediments suggested that there was no current import of fresh DDT into the area. The total concentrations of DDTs and HCHs in biota were $0.60\text{—}18.40\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and $0.84\text{—}14.90\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The main forms of HCHs were α -HCH (73.96% in *Apogon cyanosoma* and 100% in *Penaeus japonicus*), γ -HCH (66.10% in *Brachirus swinhonis*), β -HCH (57.14% in *Penaeus monodon*) and δ -HCH (61.48% in *Thais clavigera*). This reflects different ways of bioaccumulation of HCHs among organisms. The $(\text{DDD}+\text{DDE})$ percentage of *Thais clavigera*, *Apogon cyanosoma*, *Penaeus monodon*, *Penaeus japonicus* and *Brachirus swinhonis* made up 100%, 100%, 91.5%, 91.4%, 60.5% of total DDTs. This indicates that DDT might be effectively biodegraded by organisms. Though none of the contents of DDT and HCH in various organisms

收稿日期: 2009-10-30; 修订日期: 2010-01-05. 蔡卓平编辑

基金项目: “908” 专项 (GD908-01-01, GD908-02-02); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCXZ-YW-Q07)

作者简介: 施震 (1983—), 男, 福建省福州市人, 硕士生, 主要从事海洋环境研究。E-mail: shizhen@scsio.ac.cn

通信作者: 黄小平。E-mail: xphuang@scsio.ac.cn

*衷心感谢中山大学的黄建荣老师和国家海洋局南海环境监测中心在采样过程和样品测定时给予的支持。

exceeds the tolerable daily intake proposed by the World Health Organization, more attention should be paid to the potential risks of co-toxicity of various toxins to human health.

Key words: organochlorine pesticides; western coastal waters of Guangdong province; sediment; biota; speciation of congener

有机氯农药,特别是滴滴涕(DDTs)和六六六(HCHs),是一类主要的持久性有机污染物,因其具有高效杀虫效果而曾被广泛应用于防治农业病虫害,为世界粮食生产做出了巨大贡献。但是,有机氯类农药的化学性质稳定,在环境中持久残留,可通过地表径流、大气沉降等途径进入水环境^[1],进入水体的有机氯农药易于附着在悬浮颗粒物上从而进入沉积物^[2],并可通过生物富集和食物链传递在水生动物体内累积、放大^[3-4]。研究表明,这类化合物大多数具有致癌、致畸、致突变效应^[5],对人类和生态系统的造成潜在危害,已成为世界公认的全球性环境公害。

有机氯农药可通过呼吸作用、皮肤接触及食物摄取等途径进入人体内,其中食物摄取是有机氯农药进入人体内最主要的途径^[6]。在我国,人体内DDT的75%来源于食用的海产品^[7]。因此,非常有必要对各个地区的海产品的安全性进行评估,从而减少和避免对人类健康的危害。

目前世界上已有较多研究探讨了有机氯农药DDTs和HCHs在不同地区沉积物和水生动物体内的累积及其对人体健康的潜在危害^[8-10]。有学者在中国黄海和渤海沿岸海域^[11]、大亚湾^[12]、珠江口及附近海域^[13]等海区开展持久性有机污染物在沉积物和生物体内的累积现状研究。本研究首次对粤西海域沉积物和生物体内DDTs和HCHs的各同分异构体的组成规律进行探讨和分析,并评估该海域生物体内有机氯农药对人类健康的潜在危害。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

粤西海域地处亚热带,气候温和,年温差较小,海洋生物资源丰富,是各种经济鱼类的良好栖息场所,海洋生物种类数和多样性均高于广东省沿岸其他海区^[14]。2007年11月,在粤西沿岸3个代表性海区(1、2、3)使用生物拖网采集生物样品,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3个站位的表层沉积物样品,装入密封塑料袋,带回实验室在-20℃下保存、分析,采样位置如图1所示。

生物样品分别是:纵带箸鲷 *Brachirus swin-*

hois、天竺鲷 *Apogon cyanosoma*、斑节对虾 *Penaeus monodon*、日本对虾 *Penaeus japonicus* 和疣荔枝螺 *Thais clavigera*。

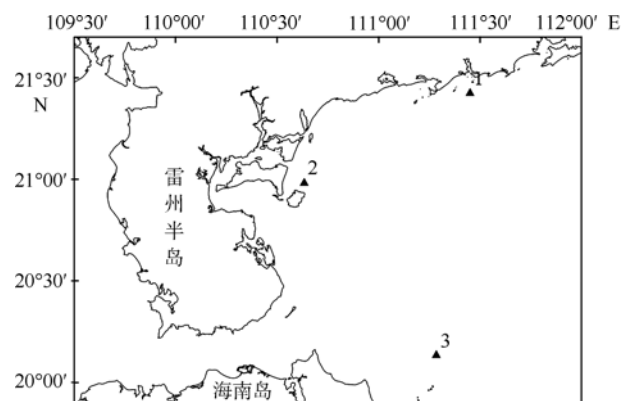


图1 粤西海域沉积物及生物采样站位

图中站点1、2、3为3个代表性海区

Fig.1 Sampling sites of sediments and biota in the western coastal waters of Guangdong province

1.2 样品处理

生物样品制备参照《海洋化学调查技术规程》^[15]。样品解冻后,使用蒸馏水漂洗,置于清洁的工作台上,用不锈钢刀切取出肌肉部分,将样品匀浆,多个体样品则合并匀浆。称取10g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《海洋化学调查技术规程》^[15]。样品经避光自然风干后,用玛瑙钵粉碎研磨过80目筛。样品提取及样品净化过程与生物样品基本一致,称取20g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(Agilent7890),配用DB-5毛细管柱(柱长30m,内径0.25mm,液膜厚度0.25μm)测定沉积物和生物体中HCHs(包括α-HCH、γ-HCH、β-HCH、δ-HCH)和DDTs(包括*p,p'*-DDE、*p,p'*-DDD、*p,p'*-DDT、*o,p'*-DDT)的含量。氦气为载气,1μL无分流进样,检测器温度保持为300℃,程序升温条件为:初始温度120℃,保持1min,然后以10℃·min⁻¹的速度升至260℃,并在260℃保持10min。

2 结果

2.1 表层沉积物中有机氯农药的含量及组成

沉积物样品中 HCHs 和 DDTs 的总含量及其各同分异构体所占总量的百分比见表 1 和表 2。沉积物样品中 HCHs 的主要存在形式是 α -HCH(48.55%) 和 δ -HCH(37.14%); DDTs 的主要存在形式是 p,p' -DDE(49.37%)和 p,p' -DDT(34.22%)。

表 1 粤西海域表层沉积物中 HCHs 的含量 ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 干质量)及其各同分异构体所占总量的百分比(%)

Tab. 1 HCHs concentration ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight) and percentage (%) of each congener to total HCHs concentration in sediments from the western coastal waters of Guangdong province

	均值	范围	同分异构体占总量百分比
α -HCH	2.69	2.01—2.28	48.55
γ -HCH	nd	nd	0.00
β -HCH	0.94	nd—2.81	20.95
δ -HCH	1.66	1.57—1.78	37.14
HCHs	4.77	3.85—6.45	100.00

nd 表示未检出, 下同

表 2 粤西海域表层沉积物中 DDTs 的含量 ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 干质量)及其各同分异构体所占总量的百分比(%)

Tab. 2 DDTs concentration ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight) and percentage (%) of each congener to total DDTs concentration in sediments from the western coastal waters of Guangdong province

	均值	范围	同分异构体占总量百分比
p,p' -DDE	4.47	2.87—7.32	49.37
o,p' -DDT	1.5	nd—2.67	16.52
p,p' -DDD	nd	nd	0.00
p,p' -DDT	3.1	2.54—3.45	34.22
DDTs	9.06	6.18—13.4	100.00

2.2 生物体中有机氯农药的含量及组成

生物体样品中 HCHs 和 DDTs 的总含量见表 3 和表 4, 各同分异构体的百分组成见图 2 和图 3。疣荔枝螺肌肉中 HCHs 的含量最高($14.90\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 其后依次是纵带箬蛄($12.30\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、天竺鲷($1.92\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、日本对虾($1.41\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)和斑节对虾($0.84\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。DDTs 含量最高的是纵带箬蛄($18.40\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 其后依次是日本对虾($17.70\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、斑节对虾($8.61\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、疣荔枝螺($3.35\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)和天竺鲷($0.60\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。如图 2 所示, 天竺鲷和日本对虾中累积的 HCHs 主要以 α -HCH 的形式存在, 分别占 73.96%和 100%; 而纵带箬蛄、斑节对虾、疣荔枝螺中主要的存在形式分别是

γ -HCH(66.10%)、 β -HCH(57.14%)和 δ -HCH(61.48%)。从图 3 可以发现, 生物体内的 DDTs 以其降解产物 DDE 和 DDD 的形式存在; 纵带箬蛄、天竺鲷和疣荔枝螺主要累积 p,p' -DDE, 分别占 60.45%、100.00% 和 74.63%; 斑节对虾和日本对虾中的 DDTs 主要以 p,p' -DDD 为主要的存在形式, 分别占 54.01% 和 73.37%。纵带箬蛄、斑节对虾及日本对虾中 (DDE+DDD)/T-DDT 值分别为 1.53、10.79 和 10.19, 天竺鲷和疣荔枝螺则未检测出 p,p' -DDT 和 o,p' -DDT。

表 3 粤西海域生物体内 HCHs 的含量及组成($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 湿质量)

Tab. 3 Concentration and pattern of HCHs congeners in biota from the western coastal waters of Guangdong province ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ wet weight)

	纵带箬蛄	斑节对虾	天竺鲷	疣荔枝螺	日本对虾
α -HCH	3.11	nd	1.42	2.73	1.41
γ -HCH	8.13	nd	nd	nd	nd
β -HCH	1.02	0.48	0.50	3.02	nd
δ -HCH	nd	0.36	nd	9.16	nd
HCHs	12.3	0.84	1.92	14.9	1.41

表 4 粤西海域生物体内 DDTs 的含量及组成($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 湿质量)

Tab. 4 Concentration and pattern of DDTs congeners in biota from the western coastal waters of Guangdong province ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ wet weight)

	纵带箬蛄	斑节对虾	天竺鲷	疣荔枝螺	日本对虾
p,p' -DDE	10.70	3.23	0.60	2.50	3.32
o,p' -DDT	2.81	nd	nd	nd	nd
p,p' -DDD	nd	4.65	nd	0.85	13.50
p,p' -DDT	4.17	0.73	nd	nd	1.65
DDTs	17.70	8.61	0.60	3.35	18.40

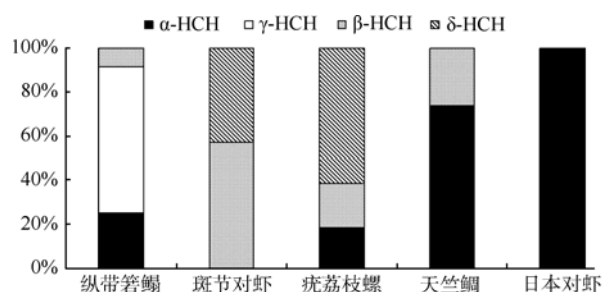


图 2 粤西海域不同生物体内 HCHs 各同分异构体的百分组成

Fig. 2 Percentage of each congener to total HCHs concentration in biota from the western coastal waters of Guangdong province

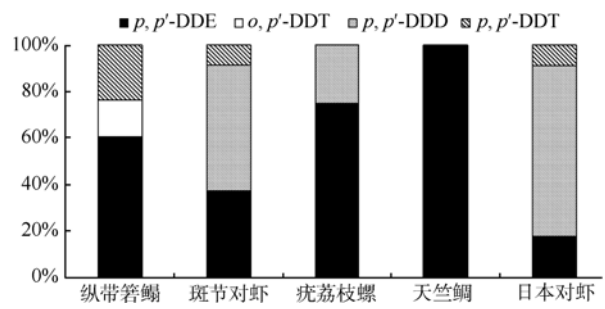


图3 粤西海域不同生物体内 DDTs 各同分异构体的百分比组成

Fig. 3 Percentage of each congener to total DDTs concentration in biota from the western coastal waters of Guangdong province

3 讨论

3.1 沉积物中有机氯农药累积水平及组成特征

本研究中，粤西海域表层沉积物中 HCHs、DDTs 的含量分别为 3.85—6.45ng·g⁻¹(均值为 4.77ng·g⁻¹)、6.18—13.4ng·g⁻¹(均值为 9.06ng·g⁻¹)，均符合国家海洋沉积物标准(GB 18668—2002)的一类标准，但与国内外其他海区相比(表 5)，其含量相对较高。粤西海域的 HCHs 含量低于印度孟买，高于其他海区。DDTs 含量处在全球近岸表层沉积物 DDTs 的含量范围之内(0.1—44ng·g⁻¹)^[16]，其含量与厦门西港相当，高于黑海、白令海峡、西伯利亚海、渤海湾、大连湾、大亚湾、珠江口、海南小海湾和海南东寨港，低于印度孟买和香港维多利亚港湾。

表 5 不同海域沉积物中 HCHs 和 DDTs 的含量(ng·g⁻¹干质量)

Tab. 5 Concentration of HCHs and DDTs in sediments from different regions(ng·g⁻¹dry weight)

海域名称	HCHs		DDTs		文献
	范围	均值	范围	均值	
印度孟买	0.14—15.92	5.42	3.01—33.21	12.45	[8]
多瑙河、黑海	0.03—0.23	0.13	0.02—0.04	0.03	[17]
白令海峡	0.15—0.81	0.44	nd—0.09	0.02	[18]
西伯利亚海	0.15—0.94	0.45	nd—0.12	0.02	[18]
渤海湾	0.10—1.80	0.50	0.18—22.00	4.70	[19]
大连湾	1.11—7.96	3.16	0.73—6.72	2.31	[20]
厦门西港	0.14—1.12	0.45	4.45—17.40	9.27	[21]
大亚湾	0.32—4.16	1.45	0.14—20.27	2.70	[22]
香港维多利亚港	Nd—9.40	3.57	1.38—30.30	11.98	[21]
珠江口	2.51—4.75	3.61	3.01—6.24	4.33	[23]
海南小海湾	0.12—1.49	0.41	0.03—5.38	1.44	[24]
海南东寨港	0.04—2.30	0.53	0.07—4.56	0.57	[25]
粤西	3.85—6.45	4.77	6.18—13.4	9.06	本研究

工业 HCH 主要有 4 种异构体，即 α-HCH(60%—70%)、β-HCH(5%—12%)、γ-HCH(10%—15%)、δ-HCH(6%—10%)，林丹中 γ-HCH 含量高达 99%；γ-HCH 易溶于水，且易降解为 α-HCH，α-HCH 可转化为 β-HCH^[26]。本研究中，沉积物的 α-HCH 含量最大(48.55%)，其后依次是 δ-HCH(37.14%)、β-HCH(20.95)、γ-HCH(0.00%)，γ-HCH 未检出且 δ-HCH 和 β-HCH 所占比例较大，这表明粤西沿岸海区近期无新的 HCHs 输入，沉积物中的 HCHs 为历史残留。

DDT 在好氧条件下会转化为 DDE，厌氧条件下则由微生物降解为 DDD^[27]。本研究中，在沉积物中检测到大量 DDE，而未检测到 DDD，这说明粤西海域沉积物的 DDT 降解基本是好氧生物降解。(DDD+DDE)/T-DDT 可指示 DDT 的降解程度及来源，比值低表明有新的 DDT 来源^[27]。沉积物的 (DDE+DDD)/T-DDT=0.97≈1(T-DDT 为 p,p'-DDT 与 o,p'-DDT 之和)，表明该地区基本上没有新的 DDT 输入，且已输入的 DDT 类农药的分解较完全，使用年代也较为久远。

3.2 生物体对有机氯农药的累积

粤西海域生物体内 HCHs 和 DDTs 的含量范围分别为 0.84—14.90ng·g⁻¹和 0.60—18.40ng·g⁻¹。各类生物体的 HCHs 含量均符合海洋生物质量标准(GB18421—2001)的一类标准(20ng·g⁻¹)。纵带箬鲷和日本对虾中的 DDT 含量超过了海洋生物质量标准的一类标准，但符合二类标准(100ng·g⁻¹)，其他生物中的 DDTs 含量均未超过一类标准。与其他海区的鱼类累积水平相比(表 6)，粤西海域中鱼类 HCHs 含量处于较高水平，而 DDTs 含量则处于中等水平。

相关研究结果普遍认为，底栖生物累积 POPs 的能力高于游泳生物^[3-4]。本研究中，底栖生物疣荔枝螺中的 HCHs 含量最高，鱼类其次，虾类最低；而

表 6 不同海域鱼类 HCHs 和 DDTs 的含量(ng·g⁻¹湿质量)

Tab. 6 Concentration of HCHs and DDTs in fishes from different regions(ng·g⁻¹ wet weight)

海域	HCHs	DDTs	参考文献
美国 Mexico 湾	nd	0.68	[28]
印度	28.00	15.00	[10]
韩国沿岸	0.38—5.60	0.85—27.0	[29]
东海舟山	nd—0.01	0.45—8.60	[11]
大亚湾	0.30	57.10	[12]
深圳湾	0.08—1.85	1.84—286.83	[30]
珠江口	1.70	58.00	[13]
粤西	0.84—14.9	0.60—18.40	本研究

DDTs的含量在虾类中最高, 鱼类其次, 疣荔枝螺中最低。据报道, 大亚湾海域的 DDTs 在鱼和蟹中累积较高, HCHs 在鱼中累积最高, 蟹其次, 虾最低^[12]; 深圳湾海域的 DDTs 在鱼类中累积最高, 蟹其次, 虾最低, 而 HCHs 在蟹中最高, 鱼其次, 虾最低^[30]。这些结果表明, 生物体对 POPs 的累积与生物种类、POPs 种类及所处外界环境条件等均有很大关系。

沉积物中的 HCHs 主要是 α -HCH 和 δ -HCH, 不同生物体中 HCHs 异构体的组成则存在很大差异。天竺鲷和日本对虾中累积的 HCHs 主要以 α -HCH 的形式存在, 分别占 73.96% 和 100%; 而纵带箸鲷、斑节对虾和疣荔枝螺中主要的存在形式分别是 γ -HCH(66.10%)、 β -HCH(57.14%) 和 δ -HCH(61.48%), 这说明不同生物体对 HCHs 的累积方式之间存在很大差异。 γ -HCH 是一种易溶于水的降解产物^[28], 纵带箸鲷体内的 HCHs 主要以 α -HCH 的形式存在表明其降解 HCHs 的能力较强, 并有可能将其方便的排出体外从而达到解毒的目的。

沉积物中 DDTs 异构体的组成是 p,p' -DDE (49.37%)> p,p' -DDT(34.22%)> o,p' -DDT(16.52%)> p,p' -DDD(0.00%), 而生物体内的 DDTs 则以其降解产物 DDE 和 DDD 的形式存在; 疣荔枝螺、天竺鲷、斑节对虾、日本对虾和纵带箸鲷中的(DDE+DDD)占 DDTs 总量的百分比分别是 100%、100%、91.5%、91.4% 和 60.5%, 与前人的研究结果是一致的^[11,30], 这表明生物体具有较强的降解 DDT 的能力。本次研究结果还显示, 纵带箸鲷、天竺鲷和疣荔枝螺主要累积 p,p' -DDE; 斑节对虾和日本对虾中的 DDTs 以 p,p' -DDD 为主, 可见不同的生物其代谢途径是存在差异的。

3.3 人体健康风险评估

世界卫生组织(WHO)提出的关于食品中的 DDTs 和 HCHs 的标准是每天不同超过 $20\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 人

体重。据统计, 我国平均每人每天食用鱼为 23g ^[31], 浙江舟山沿海平均每人每天食用鱼则为 105g ^[11]。因此, 我们假定 1 个 60kg 的成人每人每天食用 100g 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 $0.0032\sim0.021\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.001\sim0.031\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均未超出世界卫生组织的标准。但是需要指出的是, 我们在评价海产品的安全时仅考虑了单一有毒物质对人类健康的危害, 而未考虑各种有毒物质的复合毒性作用。美国加州大学的 Hayes 等将 3 000 只蝌蚪暴露于 10 种农药稻田中, 每种农药都不足以导致蝌蚪的发育异常, 但是野外观察结果却显示了蝌蚪的异常发育^[32]。可见, 粤西海域的单一的有机氯农药的毒性尚未对人类的健康构成危害, 但是它们的复合毒性对人类健康的危害是不容忽视的, 这将是以后研究工作的重点之一。

4 结论

1) 沉积物中的 γ -HCH 未检出, 且 δ -HCH 和 β -HCH 所占比例较大, 这表明粤西沿岸海区近期无新的 HCHs 输入; 沉积物中(DDE+DDD)/T-DDT=0.97 \approx 1, 表明粤西沿岸海区近期无新的 DDTs 输入。

2) 天竺鲷和日本对虾中累积的 HCHs 主要以 α -HCH 的形式存在, 而纵带箸鲷、斑节对虾和疣荔枝螺中主要的存在形式分别是 γ -HCH、 β -HCH 和 δ -HCH, 说明不同生物体对 HCHs 的累积方式之间存在很大差异。

3) 各生物体中(DDE+DDD)占 DDTs 总量的百分比都很高, 表明这些生物体具有较强的降解 DDT 的能力。

4) 各种生物体内的 DDTs 和 HCHs 的含量都未超过世界卫生组织(WHO)规定的食用安全标准, 但是其复合毒性对人类健康的潜在危害值得重点关注。

参考文献

- [1] PARK J S, WADE T L, SWEET S. Atmospheric deposition of organochlorine contaminants to Galveston Bay, Texas[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(19): 3 315–3 324.
- [2] 王英辉, 祁士华, 龚香宜, 等. 排湖表层沉积物中有机氯农药分布特征和生态风险[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(3): 370–374.
- [3] THOMANN R V. Bioaccumulation model of organic chemical distribution in aquatic food chains[J]. Environmental Science and Technology, 1989, 23(6): 699–707.
- [4] KIRRLUK R M, SERVOS M R, WHITE D M, et al. Using ratios of stable nitrogen and carbon isotopes to characterize the biomagnification of DDE, mirex, and PCB in a Lake Ontario pelagic food web[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1995, 52(12): 2 660–2 674.
- [5] 卢冰, 陈荣华, 王自磐, 等. 北极海洋沉积物中持久性有机污染物分布特征及分子地层学记录的研究[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 167–173.
- [6] DOUGHERTY C P, HOLTZ S H, REINERT J C, et al. Die-

- tary exposures to food contaminants across the United States[J]. Environmental Research Section A, 2000, 84: 170–180.
- [7] NAKATA H, KAWAZOE M, ARIZONO K, et al. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyl residues in foodstuffs and human tissues from China: status of contamination, historical trend, and human dietary exposure[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, 43(4): 473–480.
- [8] PANDIT G G, SAHU S K, PURANIK V D. Distribution and fate of persistent organochlorine pesticides in coastal marine environment of Mumbai[J]. Environment International, 2006, 32(2): 240–243.
- [9] JIANG Q T, LEE T K M, CHEN K, et al. Human health risk assessment of organochlorines associated with fish consumption in a coastal city in China[J]. Environmental Pollution, 2005, 136: 155–165.
- [10] KANNAN K, TANABE S, TATSUKAWA R. Geographical distribution and accumulation features of organochlorine residues in fish in tropical Asia and Oceania[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29: 2 673–2 683.
- [11] 马绍赛, 周明莹, 赵俊. 黄、渤海沿海贝类体内六六六(HCH)与滴滴涕(DDT)残留水平评价与分析[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(5): 70–74.
- [12] 丘耀文, 张干, 郭玲利, 等. 大亚湾海域典型有机氯农药生物累积特征及变化因素研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 51–58.
- [13] 蔡福龙, 林志锋, 陈英, 等. 热带海洋环境中BHC和DDT的行为特征研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(2): 1–7.
- [14] 广东省海岛资源综合调查大队, 广东省海岸带和海域资源综合调查领导小组办公室. 广东省海岛资源综合调查报告[M]. 广州: 广东科技出版社, 1995: 300–306.
- [15] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋化学调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 109–112.
- [16] FOWLER S W. Critical review of selected heavy metal and chlorinated hydrocarbon concentrations in the marine environment[J]. Marine Environmental Research, 1990, 29(1): 1–64.
- [17] MALDONADO C, BAYONA J M. Organochlorine compounds in the north-western Black Sea water: distribution and water column process[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(3): 527–540.
- [18] YAO Z W, JIANG G B, XU H Z, et al. Distribution of organochlorine pesticides in seawater of the Bering and Chukchi Sea[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(1): 49–56.
- [19] 王泰, 黄俊, 余刚. 海河与渤海湾沉积物中PCBs和OCPs的分布特征[J]. 清华大学学报, 2008, 48(9): 82–85.
- [20] 吕景才, 赵元凤, 徐恒振, 等. 大连湾、辽东湾养殖水域有机氯农药污染状况[J]. 中国水产科学, 2002, 9(1): 73–77.
- [21] HONG H, XU L, ZHANG L P, et al. Environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediments of Xiamen and Victoria Harbors[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31: 229–236.
- [22] 丘耀文, 周俊良, MASKAOUI K, 等. 大亚湾海域多氯联苯及有机氯农药研究[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(1): 46–51.
- [23] 陈伟琪, 洪华生, 张路平, 等. 珠江口表层沉积物和悬浮颗粒物中的持久性有机氯污染物[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43: 230–235.
- [24] 穆倩, 祁士华, 王君, 等. 小海湾沉积物中有机氯农药的浓度水平和分布特征[J]. 安全与环境工程, 2006, 14(2): 9–12.
- [25] 刘华峰, 祁士华, 苏秋克, 等. 海南东寨港表层沉积物中有机氯农药的组成特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 97–101.
- [26] SAHSUVAR L, HELM P A, JANTUNEN L M, et al. Henry's law constants for α -, β -, and γ -hexachlorocyclohexanes (HCHs) as a function of temperature and revised estimates of gas exchange in Arctic regions[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 983–992.
- [27] HITCH R K, DAY H R. Unusual persistence of DDT in some western USA soils[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1992, 48(2): 259–264.
- [28] LEWIS M A, SCOTT I G, BEARDEN W D, et al. Fish tissue quality in near-coastal areas of the Gulf of Mexico receiving point source discharges[J]. The Science of Total Environment, 2002, 284: 249–261.
- [29] YIM U H, HONG S H, SHIM W J, et al. Levels of persistent organochlorine contaminants in fish from Korea and their potential health risk[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, 48: 358–366.
- [30] 丘耀文, 郭玲利, 张干. 深圳湾典型有机氯农药的生物累积及其人体健康风险[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 42–47.
- [31] CHEN J, GAO J. The Chinese total diet study in 1990. Part 1. Chemical contaminants[J]. Journal of AOAC of International, 1993, 76(6): 1 193–1 205.
- [32] HAYES T B, COLLINS A, LEE M, et al. Hermaphroditic, demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses[J]. Proceedings of the National Academy of sciences, 2002, 99(8): 5 476–5 480.