

鱼塘沉积物氯酚污染及其生态风险评价

董军^{1,3}, 陈若虹¹, 栾天罡¹, 邹世春², 林里^{1*}

1. 中山大学水产品安全教育部重点实验室, 广东 广州 510275; 2. 中山大学海洋学院, 广东 广州 510275;

3. 电子科技大学中山学院, 广东 中山 528403

摘要:采用固相微萃取 (SPME) 与气相色谱-质谱联用, 分析了3种养殖模式鱼塘沉积物中氯酚类(CPs)化合物的污染特征。结果表明, 一般四大家鱼养殖模式 (A) 沉积物中总CPs质量分数 (干质量) 为9.91 ng·g⁻¹, 猪-鱼综合养殖模式 (B) 与鸭-鱼综合养殖模式 (C) 沉积物总CPs质量分数分别为7.79 ng·g⁻¹和4.84 ng·g⁻¹。总CPs及15种CPs化合物在A、B模式和鸭-鱼综合养殖模式 (C) 沉积物中的分布特征相似, 质量分数由高到低的顺序为A模式, B模式, C模式。沉积物中质量分数比较高的一氯酚、二氯酚、三氯酚和四氯酚分别是4-CP、2,4-DCP、2,4,6-TCP和2,3,4,6-TeCP。五氯酚(PCP)质量分数与4-CP、2,5+2,6+3,5-DCP、3,4-DCP、2,4,5-TCP、2,3,6-TCP、2,3,4-TCP、2,3,5,6-TeCP、2,3,4,6-TeCP、2,3,4,5-TeCP等氯酚化合物质量分数显著正相关, 显示PCP与它们之间存在降解物与产物的关系。参照美国EPA相关标准, 上述鱼塘沉积物中的PCP和Ky氯酚(2,3,4,6-TeCP、2,4,6-TCP和PCP)导致生态风险的可能性较低。

关键词:鱼塘; 沉积物; 氯酚

中图分类号: X592

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0426-05

氯酚类化合物(chlorophenols, CPs)曾广泛用于木材防腐、除锈和杀螺, 具有较强的毒性和抗降解能力, 是美国EPA优先控制的环境污染物^[1-2]。CPs通过土表径流等方式进入水体后在沉积物中富集, 构成持久性污染, 并会通过食物链对人体造成毒害^[3-5]。近年来, 有关学者对CPs尤其是五氯酚(PCP)在雨水、土壤、食物的残留水平进行了研究^[6-9]。但关于鱼塘底泥中CPs污染方面的研究尚未见到报道。本文对珠江三角洲中山市3种养殖模式鱼塘底泥中19种CPs的污染特征进行了研究, 并评估了产生生态风险的可能性, 旨在探索氯酚类化合物在淡水养殖环境中的分布规律, 为养殖水体安全监控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2007年2月, 在珠江三角洲中山市三角水产养殖区采集了3种养殖模式鱼塘的沉积物。养殖模式包括: 一般四大家鱼养殖水体(A); 猪-鱼综合养殖模式(B), 即塘中养鱼, 塘边养猪, 将猪粪尿及废水直接引入鱼塘养鱼; 鸭-鱼综合养殖模式(C), 即塘边搭架养鸭, 鱼鸭共生互利的生态养殖模式。3种养殖模式的水源为同一河流。选择A、B、C3种养殖模式代表性鱼塘各5口, 每口鱼塘取底部表层10 cm的底泥500 g各3份, 用锡纸包好, 当天运回实验室。自然风干后, 研碎混匀, 过0.45 mm筛

备测。

1.2 CPs 测定方法

样品预处理: 参照Martínez^[10]和孙磊等^[2]的测定方法, 略加改动。取5 g过筛底泥样品于离心管中, 加入3 mL 9 mol·L⁻¹的硫酸酸化, 加入15 mL丙酮-正己烷($V:V=1:1$)和少许铜片(用于除硫), 旋紧管盖。将离心管置于旋涡混合器上使底泥与溶剂充分混合, 超声波萃取30 min, 5 000 r·min⁻¹离心, 收集上清液。再加入15 mL丙酮-正己烷($V:V=1:1$)于离心管超声波萃取30 min, 5 000 r·min⁻¹离心, 合并上清液于试管, 氮吹至近干, 再加入20 mL的Milli-Q水溶解。LC-18 SPE小柱分别用5 mL甲醇和5 mL Milli-Q水预处理, 上样, 用5 mL的Milli-Q水清洗, 最后用5 mL的甲醇洗脱, 用5 mL刻度管收集。将洗脱液氮吹至近干, 加入氯化钠(150 g·L⁻¹)调节过的Milli-Q水, 并加入适量已配制成工作溶液的内标用于校正仪器误差, 最后定容至2 mL。取1.8 mL至2 mL置于GC小瓶中, 准备自动SPME及色谱分析。

SPME条件: 萃取及衍生化温度均为35 °C, 萃取时间60 min, 空顶衍生化时间为5 min。

气相色谱-质谱(GC-MS)条件: 色谱柱为30 m × 0.25 mm × 0.25 μm的HP-5 MS毛细管柱, 载气为氦气, 流量为1.0 mL·min⁻¹, 溶剂延迟为5 min, 解析温度为270 °C, 解析时间为5 min。程序升温为:

基金项目:国家自然科学基金项目(20307012); 广东省自然科学基金项目(7010723); 中山市科技计划项目(2006A154); 电子科技大学中山学院科研启动项目(2007YKQ19)

作者简介:董军(1971年生)男, 副教授, 博士, 主要从事污染生态学研究。E-mail: dj13822726106@163.com

*通讯作者:林里, E-mail: linl@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2008-12-30

初始温度 70 °C, 保留 1 min, 以 15 °C·min⁻¹ 升至 115 °C, 再以 3 °C·min⁻¹ 升至 155 °C, 最后以 20 °C·min⁻¹ 升至 300 °C 并保留 5 min, 总分析时间为 33 min。

数据采集和处理系统为安捷伦化学工作站。利用已知质量分数的 CPs 混合标样进行外标定性定量。

2 结果与讨论

2.1 不同养殖模式沉积物中 CPs 化合物质量分数水平比较

各养殖模式鱼塘沉积物中 CPs 类化合物的质量分数水平及分布特征见图 1 和表 1。由图表可知, 除 2-氯酚 (2-CP) 在一般四大家鱼养殖模式 (A) 沉积物中未能检测到外, 其他 18 种 CPs 化合物在鱼塘沉积物中的检出率为 100%, 2-CP 检出率为 67%。

不同养殖模式沉积物 (干质量) 的总 CPs 质量分数水平存在差异, A 模式总 CPs 为 9.91 ng·g⁻¹, B 模式为 7.79 ng·g⁻¹, C 模式为 4.84 ng·g⁻¹, 总 CPs 质量分数水平由高到低的顺序为 A, B, C。一般四大家鱼养殖模式沉积物中的总 CPs 含量高于猪-鱼和鸭-鱼两种综合养殖模式。

由表 1 和图 1 还可发现, 4-CP、2,5+2,6+3,5-DCP、2,4-DCP、3,4-DCP、2,4,6-TCP、2,4,5-TCP、2,3,6-TCP、3,4,5-TCP、2,3,4-TCP、2,3,5,6-TeCP、2,3,4,6-TeCP、2,3,4,5-TeCP 以及 PCP 等 15 种 CPs 化合物也表现出相似特征, 在 3 种养殖模式沉积物中的质量分数水平由高到低的顺序同样为 A > B > C。

鱼塘沉积物中 CPs 的质量分数水平与底泥中

表 1 鱼塘沉积物中 CPs 类化合物质量分数水平

Table 1 The contents of CPs in the aquatic sediments

CPs	ng·g ⁻¹ 干质量		
	A	B	C
2-CP	Nd	0.25±0.03	0.07±0.00
3-CP	1.24±0.39	1.54±0.13	0.84±0.11
4-CP	2.46±0.29	2.16±0.24	1.00±0.17
2,5+2,6+3,5-DCP	0.14±0.02	0.09±0.01	0.06±0.00
2,4-DCP	0.19±0.02	0.13±0.01	0.08±0.01
2,3-DCP	0.27±0.03	0.38±0.05	0.24±0.03
3,4-DCP	0.19±0.03	0.07±0.00	0.04±0.00
2,4,6-TCP	3.20±0.27	1.96±0.15	1.90±0.25
2,3,5-TCP	0.06±0.00	0.09±0.01	0.06±0.00
2,4,5-TCP	0.09±0.01	0.05±0.00	0.04±0.00
2,3,6-TCP	0.07±0.01	0.06±0.00	0.04±0.00
3,4,5-TCP	0.55±0.02	0.07±0.00	0.04±0.00
2,3,4-TCP	0.12±0.01	0.10±0.01	0.05±0.00
2,3,5,6-TeCP	0.20±0.02	0.07±0.00	0.04±0.00
2,3,4,6-TeCP	0.24±0.02	0.16±0.02	0.13±0.01
2,3,4,5-TeCP	0.26±0.03	0.12±0.01	0.04±0.00
PCP	0.63±0.09	0.49±0.05	0.17±0.02
ΣCPs	9.91±1.27	7.79±0.72	4.84±0.60

A: 一般四大家鱼养殖水体, B: 猪-四大家鱼养殖水体, C: 鸭-四大家鱼养殖水体

有机质、腐殖酸等物质含量有关。鱼塘底泥中的有机质、腐殖酸会影响 CPs 的吸附与降解等环境行为^[11-12], 有机质具有许多大小不一的孔隙, 可以捕获或固定有机化合物, 腐质酸或富里酸等腐殖质组分的表面官能团可以与这些外来化合物发生化学作用^[13]。相对于一般四大家鱼养殖模式, 猪-鱼、禽-鱼等综合养殖模式会增加养殖环境中的有机质和腐殖酸以及其他有机酸含量, 促进 CPs 化合物的降解。同时, 沉积物中的有机酸可以与铁氧化物形

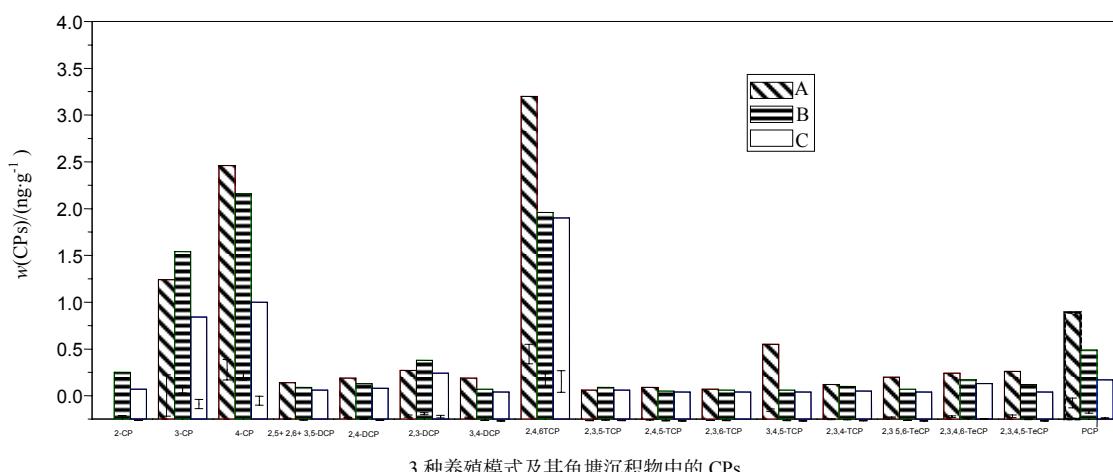


图 1 3 种养殖模式鱼塘沉积物中 CPs 类化合物分布特征

Fig. 1 Cotents of CPs in sediments from three kinds of different feeding model fish ponds

成 Fe(III)-羧酸配合物，在光照下构成类光 Fenton 系统，降解 CPs 化合物^[14-15]。所以，水源相同条件下，猪-鱼、鸭-鱼等综合养殖沉积物中 CPs 化合物降解程度会更高，而质量分数水平也就表现较低。至于鸭-鱼综合养殖模式与猪-鱼综合养殖模式之间的比较，则需要对两种水体中有机酸种类和含量等因素作进一步深入研究。

2.2 CPs 化合物在鱼塘沉积物的分布特征

CPs 化合物在不同养殖模式鱼塘沉积物中的分布表现出相似规律。三种养殖模式沉积物中最高质量分数的一氯酚都是 4-CP，在 A、B、C 模式鱼塘中，4-CP 分别占一氯酚总量的 66%、55% 和 52%；最高质量分数的二氯酚都是 2,4-DCP，在三种养殖模式沉积物中分别占二氯酚总量的 29%、55% 和 61%；2,4,6-TCP 是三氯酚中质量分数水平最高的，在 A、B、C 模式沉积物中分别占到三氯酚总量的 78%、84% 和 79%；B 养殖模式和 C 养殖模式沉积物中含量最高的四氯酚为 2,3,4,6-TeCP；而 A 模式沉积物中含量最高四氯酚为 2, 3,4,6-TeCP 和 2,3,4,5-TeCP，两者的质量分数相近。鱼塘沉积物中 CPs 化合物的分布特征可能与 PCP 的降解历程与产物有关。Magar 等研究了 PCP 的降解历程发现 75% 的四氯酚最后降解成为 4-CP^[16]，徐向阳等发现，2, 4-DCP 和 2, 4, 6-TCP 是 PCP 还原脱氯的重要中间产物^[17]，Bollag 等认为 2,3,4,6-TeCP 是 PCP 间位首次脱氯的主要中间产物^[18]。本研究中，4-CP、2,4-DCP、2,4,6-TCP 和 2,3,4,6-TeCP 的分布特征与上述研究结果一致。

2.3 PCP 与其他 CPs 关系

PCP 是含氯原子最多的氯酚化合物，可以脱氯产生低氯的氯酚化合物，通过相关性分析可以判断 PCP 与其他低氯氯酚关系的密切程度。PCP 含量与其它 CPs 化合物含量相关性分析见表 2。

由分析结果可知，PCP 与 4-CP、2,5+2,6+3,5-DCP、3,4-DCP、2,4,5-TCP、2,3,6-TCP、2,3,4-TCP、2,3,5,6-TeCP、2,3,4,6-TeCP、2,3,4,5-TeCP 存在显著的正相关关系。说明 PCP 与这些 CPs 化合物存在降解物与产物的关系。也可初步推断，PCP 是由水源输入鱼塘的主要 CPs 化合物，其他低氯的

CPs 主要来自 PCP 在沉积物中的降解。

2.4 鱼塘沉积物中 CPs 风险评价

国内外学者对沉积物中 PCP 残留水平的情况，已经做了一定的调查(表 3)。对比可发现，本研究沉积物中 PCP 的残留质量分数(0.17~0.63 ng·g⁻¹)远低于国内外其他地区沉积物中 PCP 的残留水平。

表 3 不同地区沉积物中 PCP 污染水平比较

Table 3 Comparisons of PCP levels in sediments

序号	地区及沉积物特征	PCP 水平	参考文献
1	渤海湾	4.2~41	19
2	湖北武汉池塘	43~44	20
3	福建闽侯河流	80~146	21
4	珠江三角洲河流沉积物	1.44~34.4	22
5	法国淡水沉积物	40	23
6	广东中山鱼塘	0.17~0.63	本研究

关于沉积物中 CPs 类化合物生态风险评价的资料较少，美国 EPA 以生态影响阈值(AET)来判断 CPs 的生态风险，PCP 在沉积物中的 AET 阈值质量分数为 0.39~0.69 μg·g⁻¹，Ky-5 氯酚(2, 3, 4, 6-TeCP、2, 4, 6-TCP 和 PCP)的 AET 阈值为 1 μg·g⁻¹^[24]。本研究中鱼塘沉积物中 PCP 和 Ky-5 氯酚(2, 3, 4, 6-TeCP、2, 4, 6-TCP 和 PCP)残留量低于生态影响阈值。可以推断，氯酚在本研究区域产生生态风险的可能性较低。

3 结论

分析了地处珠江三角洲地区的中山市 3 种养殖模式鱼塘沉积物中氯酚类化合物的污染特征，结果表明，一般四大家鱼养殖模式(A)、猪-鱼综合养殖模式(B)与鸭-鱼综合养殖模式(C)沉积物中总 CPs 质量分数(干质量)分别为 9.91 ng·g⁻¹、7.79 ng·g⁻¹ 和 4.84 ng·g⁻¹。总 CPs 及 15 种 CPs 化合物在 3 种养殖模式沉积物中的分布特征相似，质量分数由高到低的顺序为 A 模式，B 模式，C 模式。沉积物中质量分数比较高的一氯酚、二氯酚、三氯酚和四氯酚分别是 4-CP、2,4-DCP、2,4,6-TCP 和 2,3,4,6-TeCP。相关分析显示，PCP 与 4-CP、2,5+2,6+3,5-DCP、3,4-DCP、2,4,5-TCP、2,3,6-TCP、2,3,4-TCP、2,3,5,6-TeCP、2,3,4,6-TeCP、2,3,4,5-TeCP

表 2 沉积物中 PCP 与其它 CPs 化合物相关性

Table 2 The correlation between PCP and other CPs

PCP	4-CP	2, 5+2, 6+3, 5-DCP	3, 4-DCP	2, 4, 5-TCP	2, 3, 6-TCP
	$r=0.806^{**}$	$r=0.938^{**}$	$r=0.848^{**}$	$r=0.935^{**}$	$r=0.893^{**}$
	$P=0.009$	$P=0.000$	$P=0.004$	$P=0.000$	$P=0.001$
PCP	2, 3, 4-TCP	2, 3, 5, 6-TeCP	2, 3, 4, 6-TeCP	2, 3, 4, 5-TeCP	2, 3, 4, 6-TeCP
	$r=0.857^{**}$	$r=0.915^{**}$	$r=0.948^{**}$	$r=0.938^{**}$	$r=0.938^{**}$
	$P=0.003$	$P=0.001$	$P=0.000$	$P=0.000$	$P=0.000$

**表示达到 1% 的极显著水平

等 11 种氯酚化合物显著相关，显示 PCP 与它们之间可能存在降解物与产物的关系。参照美国 EPA 相关标准，本研究鱼塘沉积物中的 PCP 和 Ky 氯酚（2,3,4,6-TeCP、2,4,6-TCP 和 PCP）产生生态风险的可能性较低。

致谢：中山大学叶志鸿教授对英文摘要修改提出了宝贵的意见，李向丽博士、李金天博士、杨菁工程师在样品采集过程中给予了大力支持，在此表示衷心的感谢。

参考文献：

- [1] COHEN E, GAMLEL A, KATAN J. The Fungitoxicity of chlorophenols to the pathogenic fungi, *fusarium oxysporum* and *rhizoctonia solani*: a structure-activity relation study[J]. Journal of Pest Science, 1988, 24: 139-146.
- [2] 孙磊, 蒋新, 周健民, 等. 红壤中痕量五氯酚的气相色谱法测定[J]. 分析化学, 2003, 31(6): 716-719.
- SUN Lei, JIANG Xin, ZHOU Jianmin, et al. Method for determination of trace pentachlorophenol in red earth by gas chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2003, 31(6): 716-719.
- [3] MALONEY S W, MANEM J, MALLEVIALLE J, et al. Transformation of trace organic compounds in drinking water by enzymatic oxidative coupling[J]. Environmental Science and Technology, 1986, 20 (2): 249-253.
- [4] PALLERLA S, CHAMBERS R P. Reactor development for biodegradation of pentachlorophenol[J]. Catalysis Today, 1998, 40: 103-111.
- [5] 唐全, 徐向阳, 朱有为. 五氯酚在污染沉积物泥浆固液两相中厌氧生物降解[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 683-687.
- TANG Quan, XU Xiangyang, ZHU Youwei. Anaerobic biodegradation of pentachlorophenol (PCP) in solid-liquid phase of contaminated sediment slurry[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 683-687.
- [6] HEEMKEN O P, REINCKE H, STACHEL B, et al. The occurrence of xenoestrogens in Elbe river and North Sea[J]. Chemosphere, 2001, 45: 245-259.
- [7] CZAPLICKA M. Determination of phenols and chlorophenols in bottom sediments[J]. Chromatographia, 2001, 53S: 470-473.
- [8] DAVIM L, GNUDI F. Phenolic compounds in surface water[J]. Water Research, 1999, 53: 9-8.
- [9] 张建玲, 赵辉, 邱尚志. 固相萃取-高效液相色谱法测定饮用水中酚类化合物和 2,4-滴[J]. 环境化学, 2006, 25(2): 240-241.
- ZHANG Jianling, ZHAO Hui, QIU Shangzhi. Determination of 2,4-D in drinking water by SPE- HPLC[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(2): 240-241.
- [10] MARTINEZ U A, RODRIGUEZ I, CELA R, et al. Development of a solid-phase extraction method for the simultaneous determination of chlороanisoles and chlorophenols in red wine using gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Analytical Chimica Acta, 2005, 549: 117-123.
- [11] LYAMUREM Y F, DICK R P, BAHAM J. Organic amendments and phosphorus dynamica I: phosphorus chemistry and sorption[J]. Soil Science, 1996, 161: 426-435.
- [12] RICHNOW H H, SCIFERT R, HEFTER J, et al. Metabolites of xenobiotica and mineral oil constituents linked to macromolecular organic matter in polluted environments[J]. Organic Geochemistry, 1994, 22: 671-681.
- [13] CIZKOVA H, BRIX H, KOPECHY J, et al. Organic acids in the sediments of wetlands dominated by *phragmites australis*: evidence of phytotoxic concentrations[J]. Aquatic Botany, 1999, 64(3/4): 303-315.
- [14] LI F B, WANG X G, LI Y T, et al. Enhancement of the reductive transformation of pentachlorophenol by polycarboxylic acids at the iron oxide-water intergrace[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 321: 332-341.
- [15] CHEOK H M, HE J Z, WUN J N. Pentachlorophenol dechlorination by an acidogenic sludge[J]. Water Research, 2008, 42(14): 3789-3798.
- [16] MAGAR V S, STENSEL H D, PUHAKKA J A, et al. Sequential anaerobic dechlorination of pentachlorophenol: competitive inhibition effects and a kinetic model[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(10): 1604-1611.
- [17] 徐向阳, 祁华宝, 王其于. 厌氧颗粒污泥还原脱氯与降解五氯酚 (PCP) 的研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(2): 145-150.
- XU Xiangyang, QI Baohua, WANG Qiyu. The dechlorination and bio-degradation of PCP by anaerobic granular sludge[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science, 2001, 27(2): 145-150.
- [18] BOLLAG J, MYERS C. Detoxification of aquatic and terrestrial sites through binding of pollutants to humic substances[J]. Science of the Total Environment, 1992(117/118): 357-366.
- [19] 刘金林, 胡建英, 万祎, 等. 海河流域和渤海湾沉积物和水样中五氯酚的分布[J]. 环境化学, 2006, 25(5): 539-542.
- LIU Jinlin, HU Jianying, WAN Wei, et al. Distribution of pentachlorophenol in sediment and water from Haihe Basin and Bohai Bay[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(5): 539-542.
- [20] 王学东, 熊璐, 李爱民, 等. 环境中五氯酚残留检测方法的优化研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2006, 40(4): 541-543.
- WANG Xuedong, XIONG Jun, LI Aimin, et al. Study on the optimal method for determination of pentachlorophenol residues in environment by GC- μ ECD[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2006, 40(4): 541-543.
- [21] 吕华东, 黄心宜, 林玉玲, 等. 环境中五氯酚污染监测与人体摄入蓄积情况[J]. 福建环境, 1996, 2: 23-25.
- LU Huadong, HUANG Xinyi, LIN Yuling, et al. Monitoring of pentachlorophenol in environment and the study of its intake and accumulation in human body[J]. Fujian Environment, 1996, 2: 23-25.
- [22] HONG H C, ZHOU H Y, LUAN T G, et al. Residue of pentachlorophenol in freshwater sediments and human breast milk collected from the Pearl River Delta, China[J]. Environment International, 2005, 31(5): 643-649.
- [23] MUIR J, EDULJEE G. PCP in the freshwater and marine environment of the European Union[J]. The Science of the Total Environment, 1999, 236: 41-56.
- [24] USEPA. The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the USA, Volume 1: National sediment quality survey. 1997, EPA 823-R-97-006

Chlorophenols Pollution in Aquiculture Sediments and its Ecological Risk Assessment

Dong Jun^{1,3}, Chen Ruohong¹, Luan Tiangang¹, Zou Shichun², Lin Li^{1*}

1. Key Laboratory of Aquatic Food Product Safety of Ministry of Education, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275, China;

3. Zhongshan College, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan, 528403, China

Abstract: Concentration levels of chlorophenols (CPs) pollutants in aquiculture sediments were determined by solid phase microextraction (SPME) and gas chromatography-mass spectra (GC-MS). The investigated aquaculture models were traditional feeding (A), pig-fish compound aquaculture (B) and duck-fish compound aquaculture (C), which presented a similar distribution pattern of the total CPs and 15 individual CPs chemicals. Data showed that the total CPs concentrations were 9.91, 7.79 and 4.84 ng·g⁻¹ for model A, B, and C, respectively. Among all CPs, the major chlorophenol pollutants in the three sediments were 4-CP、2,4-DCP、2,4,6-TCP and 2,3,4,6-TeCP. It was observed that PCP has a positive correlation with 4-CP, 2,5+2,6+3,5-DCP, 3,4-DCP, 2,4,5-TCP, 2,3,6-TCP, 2,3,4-TCP, 2,3,5,6-TeCP, 2,3,4,6-TeCP, or 2,3,4,5-TeCP, respectively, suggesting that those chemicals were intermediate products from PCP degradation. According to the evaluation system of USEPA, the residuary level of PCP and Ky-chlorophenols in the aquiculture sediments might pose low ecological risk to the environment and human beings.

Key words: fishpond; sediments; Chlorophenols

基金项目：国家自然科学基金项目(20307012); 广东省自然科学基金项目(7010723); 中山市科技计划项目 (2006A154); 电子科技大学中山学院科研启动项目(2007YKQ19)

作者简介：董军（1971 年生）男，副教授，博士，主要从事污染生态学研究。E-mail: dj13822726106@163.com

*通讯作者：林里，E-mail: linl@mail.sysu.edu.cn

收稿日期：2008-12-30