珠三角表层沉积物的有机碳及其与卤系阻燃剂的关系

路风辉[1],冯岸红[2],陈满英[3],陈纪文[3],罗孝俊[4],麦碧娴[4]

(1. 顺德职业技术学院,广东 顺德 528300;2. 深圳市计量质量检测研究院,广东 深圳 518055;
3. 广东质量监督检验研究院,广东 顺德 528300;4. 中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640)

摘 要:测定了珠江三角洲 130 个表层沉积物中总有机碳(TOC)和 10 类卤系阻燃剂(HFRs)的含量,并探讨了 TOC 与 HFRs 之间的关系。结果表明:珠三角表层沉积物 TOC 范围为 0.16%~5.76%,平均值为 1.25%,呈现明显的空间变化。在工业化程度较高的东莞和广州,沉积物中 HFRs 与 TOC 有显著的相关性,而西江和珠江口沉积物中 HFRs 与 TOC 的相关性较差,可能与珠江三角洲水动力过程、电子垃圾拆解活动和 HFRs 不同的来源有关。

关键词:总有机碳;沉积物;空间分布;珠江三角洲;卤系阻燃剂

中图分类号:X142 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-9250(2015)01-0049-06 **doi**:10.14050/j.cnki.1672-9250.2015.01.007

卤系阻燃剂(Halogenated flame retardants, HFRs)是一类具有强疏水性和高亲脂性的有机化合物,易于存留于沉积物有机质和富集于生物体中。总有机碳(TOC)是不同环境介质中全部有机物质的综合指标,它强烈影响着环境中不同有机污染物的地球化学行为[1-4]。受人类活动的强烈影响,河流、河口-近海既是是全球海洋的重要碳汇,也是各类有机污染物潜在的高风险区域。近年来的研究表明,HFRs 在珠江三角洲以及电子垃圾区的生物和环境介质中均有检测,有些污染水平处在全球污染的高值区[5-8]。

珠江三角洲经济发达,人口众多,大量物质通过河流输入南海,珠江三角洲沉积物中 TOC 一直以来受到广泛的关注。珠江三角洲沉积物中 TOC 不仅来自本地排放,同时也受到上游干流携带颗粒物的影响;而 HFRs 主要来自区域内排放,受本地产业经济的影响,两者在珠江三角洲不同区域的相关性引人关注。本文选择珠江三角洲为研究区域,重点研究表层沉积物中 TOC 与 HFRs 之间的相关性,探寻不同 TOC 分布对 HFRs 在沉积物中分配的影响。分析的 HFRs 包括多氯联苯(PCBs)、氯化石蜡(CPs)、六溴环十二烷(HBCD)、四溴双酚 A(TBBPA)、十溴二苯乙烷(DBDPE)、1,2-双(2,4,6-三溴苯氧基)乙烷(BTBPE)、得克隆(DP)、多溴联苯醚(PBDEs)、3-BFRs(六溴苯(HBB)、五溴甲苯(PBT)和五溴乙苯(PBEB))等,以期为深入研究珠三角区域中有机污染物的环境归趋与影响因素等提供重要基础信息。

1 材料和方法

1.1 样品采集

沉积物样品于 2009 年 7 月至 2010 年 11 月,利用抓斗式采样器,采自珠江三角洲地区。研究区域包括了工业欠发达区(西江、北江和东江)、工业发达地区(东莞、广州、顺德和珠江口)和清远电子垃圾回收区(图 1)。共采集表层沉积物 130 个,采样点如表 1 所示。样品采集后置于密实袋内,冷藏保存并尽快运回实验室于-20 ℃保存备用。

1.2 TOC 的测定

沉积物样品冷冻干燥后研磨成粉,过 100 目筛后备用。称取样品约 1 g,用 10 mL 10%的盐酸浸泡 3 次,每次 8 h。弃去酸液,水洗至中性,放入烘箱中 60 ℃下烘干至恒重。取 20~50 mg 样品用元素分析仪(CHNS Vario EI III)测定 TOC 的含量[8-9]。

收稿日期:2014-03-07;改回日期:2014-09-22
基金项目:国家自然科学基金项目(40632012,40821003)资助。
第一作者简介:路风辉(1978-),男,博士,主要从事环境监测研究,E-mail:lufenghui@foxmail.com.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

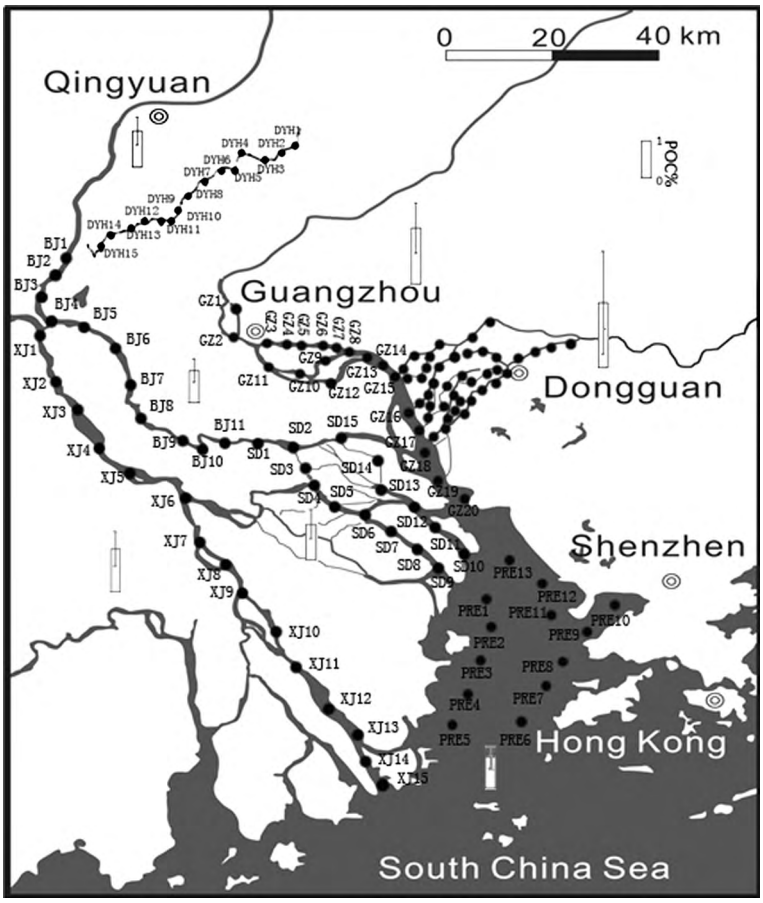

图 1 采样示意图

Fig. 1 Map for sampling sites

表 1 珠江三角洲采样基本信息表

Table 1 Sampling information of sediment from the Pearl River Delta, China

采样区域	采样地点	简称	采样个数
工业发达地区	广州	GZ	20
	东莞	DG	41
	顺德	SD	15
欠发达工业区	西江	XJ	15
	北江	BJ	11
珠江口	伶仃洋	PRE	13
电子垃圾区	大燕河	DYR	15
共计			130

1.3 样品前处理及卤系阻燃剂仪器分析

沉积物样品经冷冻干燥后研磨过筛(80 目)。称取沉积物样品 10 样品,注入 CPs 回收率指示物 ^{13}C-氯丹 25 ng 和 PCBs 混合回收率指示物 PCB30、65、204 各 250 ng。索氏抽提 24 h,抽提时加入铜片除硫。提取液旋蒸浓缩,转换溶剂为正己烷,经弗罗里硅土/硅胶复合柱分离纯化。先用 80 mL 正己烷淋洗,收集 PCBs 组分;再用 60 mL 二氯甲烷淋洗,收集 CPs 组分,PCBs 和 CPs 组分分别旋转蒸发,氮吹至近干,用异辛烷定容至 300 μL 和 500 μL,分析前分别加入 PCB 组分内标 PCB24、82、198 和 CPs 组分内标 ε-HCH[8-9]。

称取样品约 30 g,用丙酮-正己烷(1∶1, V/V)混合溶剂进行索氏抽提 48 小时,抽提前加入铜片除元素硫。抽提液经旋转蒸发仪浓缩为 1～2 mL,并将其转移到 10 mL 离心管,转换溶剂为二氯甲烷-正己烷(1∶1, V/V),定容至 10 mL,并将其按照 3∶7 的比例分成两份。30%的抽提液(A)用于分析 PBDEs、DBDPE、BTBPE、HBB、PBEB、PBT 和 DP,70%的抽提液(B)用于分析 HBCD 和 TBBPA。

抽提液 A 氮吹至 1 mL,加入回收率指示物(BDE77、181、$^{13}C_{12}$-PCB141 和 $^{13}C_{12}$-BDE209),过酸性硅胶柱,用 50 mL 二氯甲烷-正己烷(1∶1, V/V)混合溶剂洗脱,浓缩至 1 mL,氮吹后用正己烷定容至 200 μL,进样前加入一定量的内标物(BDE118 和 128)[10-11]。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

抽提液 B 氮吹至 1 mL，加入回收率指示物（$^{13}C_{12}$-α，β，γ-HBCD、$^{13}C_{12}$-TBBPA），过酸性硅胶柱。先用 20 mL 正己烷淋洗，不收集，然后用 70 mL 二氯甲烷-正己烷（1∶1，V/V）混合溶剂洗脱，全部收集，浓缩至 1 mL，氮吹后用甲醇定容至 200 μL，进样前加入一定量的内标物（d_{18}-α，β，γ-HBCD）[10-11]。

CPs、PBDEs、DBDPE、BTBPE、HBB、PBEB、PBT 以及 DP 含量分析采用气相色谱-质谱联用仪、负化学电离（NCI）、选择性离子扫描模式（SIM）下完成[8-11]。载气为高纯氦气，反应气为甲烷。离子源压力为 2.4×10^{-3} Pa，离子源温度为 230 ℃，界面温度 280 ℃。采用无分流进样，进样量为 1 μL，进样口温度 290 ℃。高卤代阻燃剂（7～10 溴代 PBDEs、DBDPE、BTBPE、CPs）采用 Shimadzu GCMS-QP2010 进行定量分析，色谱柱为 DB-5HT（15 m×250 μm×0.10 μm，Agilent），其升温程序如下：初温 110 ℃，保留 1 min，以 20 ℃/min 升温至 200 ℃，保留 4.5 min，最后以 10 ℃/min 升温至 310 ℃，保留 15 min。低卤代阻燃剂（2～6 溴代 PBDEs、DP、HBB、PBT、PBEB、PCBs）采用 Agilent 6890GC/5975MS 进行定量分析，色谱柱为 DB-XLB（30 m×0.25 mm×0.25 μm，Agilent），其升温程序如下：初温 110 ℃，保留 1 min，以 8 ℃/min 升温至 180 ℃，保留 1 min，然后以 2 ℃/min 升温至 240 ℃，保留 5 min，再以同样的速度升温至 280 ℃，保留 15 min，最后以 10 ℃/min 升温至 310 ℃，保留 5 min。

采用 Anilent 1200LC/6410MS 对 HBCD 和 TBBPA 进行定量分析，离子源为 ESI(-)，选择离子扫描模式（SIM）。TBBPA 和 HBCD 非对映异构体采用 XDB-C_{18} 液相色谱柱（50 mm×4.0 mm，1.8 μm，Agilent，USA）进行分离。流动相 A 相为甲醇-水（9∶1，V/V），B 相为乙腈，进行梯度洗脱。进样体积为 3 μL。HBCD 手性异构体采用手性液相柱 Phenomonex Nucleosil β-PM（20 cm×4 mm，5 μm，Macherey-Nagel，GmbH&Co，Germany）分离，以甲醇-水（3∶7，V/V）为流动相 A，以甲醇-乙腈（3∶7，V/V）为流动相 B，进行梯度洗脱。优化质谱谱参数如下：干燥气温度为 350 ℃，流速为 10 L/min；毛细管电压为 −4000 V；喷雾针压力为 40 psi；驻留时间为 200 ms；碰撞能量为 −15 eV。PCBs、CPs 和 PBDEs 在所有样品中均有检出，其他 HFRs 检出率也高达 90%以上。

1.4　QA/QC

在分析过程中，增加了控制样品分析流程（3 个方法空白、3 个加标空白、3 个基质加标和 3 个样品平行样）等质量控制与质量保证措施。在样品分析前，对所有样品添加回收率指示物，用于检测样品分析过程对目标物质的影响。CPs 的回收率指示物 ^{13}C-氯丹的方法空白和空白加标的回收率为 91%～99%，PCBs 的回收指示物 PCB30、65 和 204 的回收率分别为 89%～92%、98%～100%和 97%～99%；在 3 个空白加标试验中，48 种目标物 SCCPs 和 MCCPs 的回收率分别为 86%～98% 和 91%～98%。PCBs（22 种混合标样）目标物的平均回收率为 89%～96%。3 个方法空白中均未检出 CPs。10 种 PBDEs 的空白加标回收率为 91%～103%，基质加标回收率为 91%～108%。$^{13}C_{12}$-TBBPA、α-HBCD、β-HBCD 和γ-HBCD 的空白加标回收率分别为 43%～59%、102%～110%、103%～105%和 106%～108%，基质加标回收率分别为 34%～76%、67%～111%、103%～113%和 104%～134%。所有样品中回收率指示物 BDE 77、BDE 181、$^{13}C_{12}$-PCB141 和 $^{13}C_{12}$-BDE 209 的回收率分别为 100%～118%、85%～103%、84%～106%和 74%～114%。样品最终浓度未经回收率校正。程序空白中检测到少量目标化合物，但其含量都低于样品含量的 1%，样品的最终浓度未经空白校正。方法检出限（LOD）按 5 倍仪器信噪比（S/N）计算。PBDEs 的 LOD 为 0.01～1.0 ng/g；DBDPE 的 LOD 为 1.5 ng/g；TBBPA、α-HBCD、β-HBCD 和 γ-HBCD 的 LOD 分别为 0.025、0.030、0.008 和 0.023 ng/g；DP 异构体的 LOD 为 0.02～0.03 ng/g；HBB、PBT 和 PBEB 的 LOD 为 0.01～0.06 ng/g；SCCPs 的 LOD 为 0.144～3.47 ng/g；MCCPs 的 LOD 为 0.530～2.24 ng/g。PCBs（一氯～七氯）的 LOD 为 0.220～1.08 ng/g。

2　结果与讨论

2.1　珠江三角洲表层沉积物中 TOC 的空间分布特征

珠三角河流沉积物 TOC 浓度范围为 0.16%～5.76%，平均值为 1.25%。工业化和城市化水平较高的珠江广州段和东江东莞段的沉积物 TOC 含量范围（平均值）分别为 0.53%～2.70%（1.43%）和 0.16%～5.76%（1.64%）。两河段沉积物中 TOC 均值接近，但数据分布较为分散。工业化和城市化

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水平较低区域西江和北江 TOC 浓度范围为 0.37%～2.06%，均值分别为 0.92%。顺德采样地区为北江的支流，TOC 的浓度范围为 0.53%～1.56%，平均值 0.88%。珠江口（0.26%～1.17%，均值 0.79%）最低。珠江口沉积柱中 TOC 的浓度范围 0.92%～1.07%[12]，和本研究几乎一致。在珠江广州段和东江东莞段，50%沉积物的 TOC 集中于 1%～1.5%范围内，在顺德、珠江口、北江，接近 70%的沉积物 TOC 含量在 0.5%～1.0%范围内。

2.2 珠江三角洲表层沉积物中 HFRs 的空间分布特征

珠三角表层沉积物中溴系阻燃剂总的含量范围为 4.05～4031 ng/g。其中 PBDEs 的含量最高，为 3.67～2517 ng/g，而 HBCD 的含量较低，为 nd～31.6 ng/g。从不同区域来看，东江东莞段 PBDEs 的平均含量最高，大燕河最低。但大燕河上游和下游沉积物中 TBBPA 含量范围分别为 nd～2.5 ng/g 和 47～305 ng/g，相差 2～3 个数量级，明显受到了临近电子垃圾拆解活动的影响。

SCCPs 和 MCCPs 总浓度范围分别为 0.37～4.7 μg/g 和 0.88～22 μg/g。与其它 HFRs 分布不同，珠江口的 SCCPs 显著高于其他河段（均值是其他河段的 2 倍），这可能与 SCCPs 较高的溶解度和缓慢的降解速度有关。珠江三角洲排放的 SCCPs 汇集到珠江口，并在潮水顶托下沉积于珠江口。高度工业化和城市化的珠江广州河段、东江东莞段和顺德河网 MCCPs 含量显著高于其他河段，变异系数相对较大，三个地区均有浓度较高的离群点，说明存在点源污染。PCBs 的总浓度范围为 7～260 ng/g，整体污染水平处于全球的中、低端。

珠江三角洲表层沉积物 HFRs 浓度地统计分析结果显示，东江东莞段是珠江三角洲 HFRs 高污染区，珠江广州段次之。其他地区污染情况依次为：大燕河＞顺德支流＞北江＞西江＞珠江口。体现了工业活动以及电子垃圾拆解活动对珠三角河流沉积物中 HFRs 的重要影响。

2.3 TOC 与 HFRs 之间的的相关性

不同区域的表层沉积物中 HFRs 和 TOC 相关性呈现较大差距（表 2）。东江东莞段沉积物中各 HFRs 与 TOC 均呈现显著的相关性（$r=0.46\sim0.82$，$p<0.01$）；其次是珠江广州段，除 DP 和 3-BFRs 外，其它 HFRs 均与 TOC 均呈现显著的相关性；再次是大燕河和北江；而顺德水道、西江和珠江口沉积物中 HFRs 和 TOC 之间相关性很差。

城市化和工业化程度较高的区域（东莞、广州）河流表层沉积物中，TOC 和 HFRs 的含量均较高，显示出两者均以本地排放为主的特征。以临近东莞的采样点为例，其 HFRs 和 TOC 的含量均很高，这可能与临近的相关产业，如电子制造、塑料制造和塑料包装等行业有关。HFRs 易在其工业生产、运输和加工过程中释放到周围环境中，这些采样点周围很可能存在含这些阻燃剂的点源排放[7-13]。

流经较高城市化区域的顺德水道，虽然如 MCCPs 等 HFRs 浓度较高，但 TOC 含量较低（图 2），表明沉积物中 TOC 和 HFRs 来源并不一致，并且 TOC 不是 HFRs 空间分布的主控因素。较高的 HFRs 含量暗示以本地排放为主，而 TOC 的来源可能受控于河流的输运。

大燕河流经区域的表层沉积物中除 DPDBE 和 PCBs 以外，其它 HFRs 和 TOC 的均有显著相关性，其相关性主要受临近电子垃圾拆解活动的影响。DYH 9-15 点 HFRs 和 TOC 含量均显著高于 DYH1-8，

表 2 珠江三角洲表层沉积物中 HFRs 与 TOC 之间的相关性

Table 2 Correlations between HFRs and TOC in the surface sediments from the Pearl River Delta

HFRs	DG	GZ	SD	DYR	BJ	XJ	PRE
PCBs	0.46**	0.19**	0.32	0.40	0.30	0.43	−0.19
CPs	0.82***	0.76***	−0.29	0.51**	−0.24	0.08	0.12
PBDEs	0.64***	0.43*	0.55	0.49*	0.60**	−0.01	0.31
HBCD	0.66***	0.52**	0.17	0.62**	0.62**	−0.028	0.37
TBBPA	0.49**	0.45*	0.71	0.61**	0.78**	0.23	0.41
DBDPE	0.52***	0.56**	0.55	0.20	0.55*	0.019	0.83***
BTBPE	0.71***	0.59**	0.35	0.60**	0.31	0.32	0.27
DP	0.62***	0.11	0.17	0.64**	0.76***	0.20	0.083
3-BFRs	0.47***	0.09	−0.27	0.62**	0.48*	0.39	0.38

注：* 表示 $p<0.1$ 相关，** 表示 $p<0.05$ 的显著相关，*** 表示 $p<0.01$ 的显著相关。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

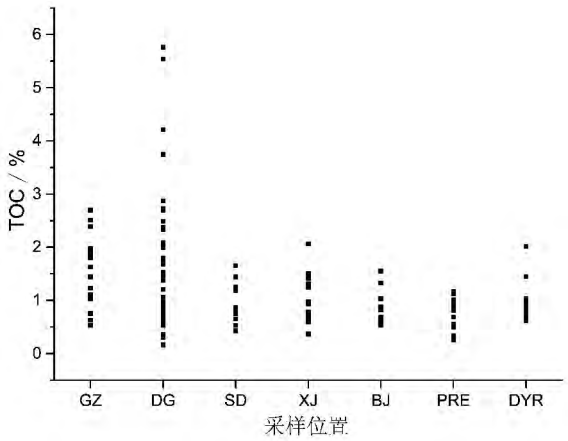

图 2　珠三角表面沉积物中总有机碳的空间分布特征

Fig. 2　Spatial distribution of TOC contents in sediments from the Pearl River Delta

表明其主要来自于电子垃圾拆解区的高浓度排放。

北江流经佛山三水等区域，城市化和工业化水平高于西江流经的区域，而低于顺德、东莞、广州等地区。北江表层沉积物中 HFRs 和 TOC 的含量均相对较低，除 PCBs、CPs 和 BPBPE 外的 HFRs 和 TOC 之间均有显著性相关，表明 HFRs 和 TOC 来源较为一致。不同于西江，北江流量较小，流经区域的排放在径流中占有一定比例，随着流经区域如三水区等地的工业化和城市化的快速发展，其本地排放为主的 HFRs 和 TOC 沉积特征将更为显著。

西江流经区域工业化和城市化水平较低，表层沉积物中 HFRs 和 TOC 没有相关性，表明其来源差异较大。西江巨大的径流和输沙量暗示 TOC 来源可能主要受控于径流输运，而 HFRs 除本地排放外，还可能来源于长距离的大气输运[6]。

珠江口汇集了珠江四个入海口的径流和泥沙，在潮汐作用下，沉积作用明显，但其沉积物中 TOC 除陆源输入外，水生来源占有较高比例[12]；沉积物中 HFRs 的来源主要来自于陆源输入（径流和大气输运），因此 TOC 和 HFRs 的来源差异明显，基本没有相关性。

3　结　论

总体而言，城市化和工业化程度较高的区域及临近污染源的河流（电子垃圾拆解区），其 HFRs 主要来自于本地排放，但受各种环境过程的影响，其在沉积物中的分布呈现较大差异，这与化合物本身的物理化学性质有关。沉积物 TOC 含量受本地排放和干流输运的双重影响，也使得 HFRs 和 TOC 的相关性呈现较大差异。正在逐步走向工业化和城镇化的区域（如北江），本地排放逐渐增加，河流表层沉积物中本地排放特征趋于显著。在干流输运为主的区域，表层沉积物中的 HFRs 和 TOC 来源复杂，除本地排放外，干流携带泥沙的沉积和大气传输都扮演着重要角色。

参　考　文　献

[1]　Klosterhaus S L, Stapleton H M, La Guardia M J, *et al*. Brominated and chlorinated flame retardants in San Francisco Bay sediments and wildlife [J]. Environment international, 2012, 47: 56－65.

[2]　Moon H B, Choi M, Yu J, *et al*. Contamination and potential sources of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water and sediment from the artificial Lake Shihwa, Korea [J]. Chemosphere, 2012, 88(7): 837－843.

[3]　Wei H, AzizSchwanbeck A C, Zou Y, *et al*. Polybromodiphenyl ethers and decabromodiphenyl ethane in aquatic sediments from southern and eastern Arkansas USA [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(15): 8 017－8 024.

[4]　Zhang Y, Ruan Y, Sun H, *et al*. Hexabromocyclododecanes in surface sediments and a sediment core from Rivers and Harbor in the northern Chinese city of Tianjin [J]. Chemosphere, 2012, 90(5): 1 610－1 616.

[5]　Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, *et al*. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2002, 117(3): 457－474.

[6]　Mai B X, Chen S J, Luo X J, *et al*. Distribution of polybrominated diphenyl ethers in sediments of the Pearl River Delta and adjacent South China Sea [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(10): 3 521－3 527.

[7]　He M J, Luo X J, Yu L H, *et al*. Tetrabromobisphenol-A and hexabromocyclododecane in birds from an e-waste region in South China: influence of diet on diastereoisomer-and enantiomer-specific distribution and trophodynamics [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 44(15): 5 748－5 754.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] Chen M Y, Luo X J, Zhang X L, *et al*. Chlorinated paraffins in sediments from the Pearl River Delta South China: Spatial and temporal distributions and implication for processes [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(23): 9 936－9 943.

[9] **陈满英，张秀蓝，余乐洹，等. 沉积物中氯化石蜡与多氯联苯的分离及气相色谱－质谱检测** [J]. **分析测试学报**, 2012, 31 (6): 651－657.

[10] Feng A H, Chen S J, Chen M Y, *et al*. Hexabromocyclododecane (HBCD) and tetrabromobisphenol A (TBBPA) in riverine and estuarine sediments of the Pearl River Delta in southern China, with emphasis on spatial variability in diastereoisomer-and enantiomer-specific distribution of HBCD [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(5): 919－925.

[11] Chen S J, Feng A H, He M J, *et al*. Current levels and composition profiles of PBDEs and alternative flame retardants in surface sediments from the Pearl River Delta southern China: Comparison with historical data [J]. Science of the Total Environment, 2012, 444: 205－211.

[12] **张凌，陈繁荣，殷克东，等. 珠江口及近海表层沉积有机质的特征和来源**[J]. **热带海洋学报**, 2010, 29 (1): 98－103.

[13] Kuramoch H, Kawamoto K, Miyazaki K, *et al*. Determination of physicochemical properties of tetrabromobisphenol A [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27 (12): 2 413－2 418.

Total Organic Carbons and Their Correlations with Halogenated Flame Retardants in Surface Sediments from the Pearl River Delta, China

LU Fenghui[1], FENG Anhong[2], CHEN Manying[3], CHEN Jiwen[3], LUO Xiaojun[4], MAI Bixian[4]

(1. Shunde Polytechnic, Shunde 528300, China; 2. Shenzhen academy of Metrology & Quality Inspection, Shenzhen 518055, China; 3. Guangdong Products Quality Supervision and Inspection Institute, Shunde 528300, China; 4. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Total organic carbon (TOC) and halogenated flame retardants (HFRs) in 130 surface sediments from the Pearl River Delta (PRD) were determined, and their correlations were discussed. Results suggest that concentrations of TOC in sediments significantly vary, with the range and mean value of 0.16%－5.76% and 2.10%, respectively. Correlations between HFRs and TOC are significant positive in sediments from highly industrialized areas, such as Dongguan and Guangzhou, but not in sediments from low industrialized areas, such as the Xijiang River and the estuary. Those results could ascribe to the complicated hydrodynamic processes in PRD, waste dismantling activities and the different sources of HFRs.

Key words: Total organic carbon (TOC); Halogenated flame retardants (HFRs); Sediment; the Pearl River Delta (PRD)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net