

# 厦门西海域表层沉积物中多环芳烃含量分布及生态风险评价\*

黎晓霞<sup>1</sup>, 蔡河山<sup>1</sup>, 张珞平<sup>2</sup>

(1. 佛山科学技术学院资源环境系, 广东 佛山 528000; 2. 厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 316000)

**摘要:** 2004年11月30日至12月1日连续两天采集厦门西海域10个站位表层沉积物样品, 参照美国EPA标准方法及采用气相色谱与质谱联用(GC/MS)技术, 对表层沉积物样品中的多环芳烃(PAHs)进行测定分析。结果表明, 厦门西海域表层沉积物样品中16种PAHs的总含量为198.2—1061.6 ng·g<sup>-1</sup>, 平均值为723.51 ng·g<sup>-1</sup>, 能检出的PAHs均以2—4环的芳香物为主; 10个站位中X1、X2、X3、X6及M2站位的PAHs主要来源于化石燃料的不完全燃烧, 其他站位以石油泄漏为主要来源。对PAHs的生态风险评价结果表明, 厦门西海域表层沉积物中PAHs的环境毒性相对较低, 说明该海域表层沉积物中PAHs对生物的危害程度较轻。

**关键词:** 厦门西海域; 表层沉积物; 多环芳烃; 风险评价

中图分类号: P762 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2008)05-0043-04

## Concentrations and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments at western Xiamen Bay and assessment of their ecological risk

LI Xiao-xia<sup>1</sup>, CAI He-shan<sup>1</sup>, ZHANG Luo-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Resource and Environment, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 316000, China)

**Abstract:** Surface sediment samples at 10 sites of the western Xiamen Bay were collected on November 30 and December 1 of 2004. The U. S. EPA analytical methods were employed to examine polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and the concentrations of PAHs were determined by GC/MS. The results showed that the total concentrations of 16 PAHs varied from 198.2 to 1061.6 ng·g<sup>-1</sup> dry weight, with an average of 723.51 ng·g<sup>-1</sup>. The dominant compositions are low molecular weight PAHs with 2—4 rings. The sources of PAHs in the sediments at X1, X2, X3, X6, and M2 sites were mostly from incomplete combustion of fossil fuel. The main possible sources of PAHs in the sediments at other sites were identified as oil spills. The toxicity of PAHs in the sediments at western Xiamen Bay was relatively low based on the assessment result of their ecological risk.

**Key words:** western Xiamen Bay; surface sediment; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); risk assessment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)有机污染物为疏水性物质, 不易溶于水, 在水中会被强烈分配到非水相中, 因此沉积物是水中PAHs的最终环境归宿<sup>[1-4]</sup>。近年来, 海域沉积物中有机污染物PAHs的污染问题日益严重,

PAHs污染持久性强, 在环境中具有潜在的致癌和致突变性, 可通过食物链危害人体健康<sup>[5,6]</sup>。

厦门西海域是集航运、旅游、养殖、纳污多功能于一体的半封闭性海湾<sup>[7]</sup>。西海域的污染主要来源于陆源排污口, 少部分来自水土流失、海水养殖

收稿日期: 2008-02-26; 修订日期: 2008-03-26。卢冰编辑

基金项目: 福建省科技重点资助项目(2004J001)

作者简介: 黎晓霞(1979—), 女, 硕士, 主要研究方向为水污染控制。

通讯作者: 蔡河山, E-mail: caihesan15@yahoo.com.cn

\* 本研究的部分样品测试工作在厦门市环境监测站实验室完成。

污染及海上船舶油污。本文以厦门西海域为研究区域,对该海域表层沉积物中的 PAHs 污染物含量及分布特征进行了调查研究,探讨了该海域表层沉积物污染水平和来源。并应用沉积物风险评价标准对区域内多环芳烃进行生态风险评估。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集站位、时间

采样站位分布见图 1。厦门西海域采样站位共 10 个,其中筓筓湖外、内湖各一个(Y1、Y2 站),受城市污水影响较大,近两年刚进行过大规模疏浚,今后还会疏浚;马銮湾两个(M1、M2 站),受杏林工业区排污影响大。厦门西港 6 个(X1—X6 站),其中 X1 为嵩鼓航道;X2 为猴屿航道,位于排污口附近,受到城市污水影响较大,这两站均为厦门西港的主航道;X3、X4 为东渡港区,有港口污水排入;X5 为马銮外湾,位于杏林工业区及其污水处理厂排污口附近;X6 为宝珠屿北部内湾,水浅流缓。以上均为拟疏浚的主要区域。采样时间为 2004 年 11 月 30 日至 12 月 1 日。

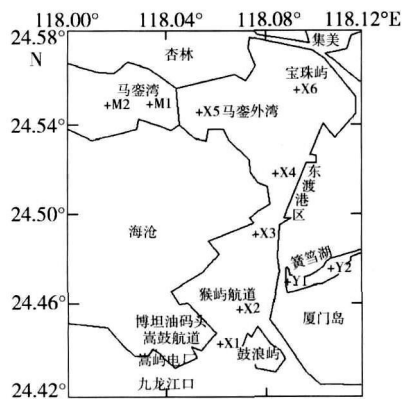


图 1 厦门西海域采样站位分布示意图

Fig 1 Sampling sites at western Xiamen Bay

### 1.2 样品采集及预处理

表层沉积物用不锈钢抓斗采样器采集。筓筓湖外湖遍布沙筛贝壳,无法采集到沉积物,故 Y1 点未采到泥样。采集后的样品密封带回实验室,在  $-18^{\circ}\text{C}$  以下冷冻 24h,然后用冷冻干燥机冷冻干燥 6h,研磨过 100 目不锈钢筛。准确称取沉积物干样 20g 于 250ml 具塞三角瓶中,加入 PAHs 内标、1g 铜粉和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  100ml。超声萃取 15min 左右,萃取完静置一段时间后吸出上清液,上清液经离心分离后转移到 100ml 具塞三角瓶中。用旋转蒸发器浓缩转移到 5ml 具塞离心管中,过硅胶氧化铝柱,其过柱顺序为:正己烷淋洗、加入样品、用 5ml

正己烷淋洗、用 5ml 乙酸乙酯淋洗。乙酸乙酯淋洗出的淋洗液用氮气吹至近干,转移到上机用的样品瓶中,用乙酸乙酯定容至 1.0ml。

所有实验用的玻璃器皿使用前经超声清洗后,依次用自来水、去离子水、Milli-Q 水洗涤,再置于马弗炉中在  $450^{\circ}\text{C}$  下灼烧 4h。

### 1.3 实验条件

PAHs 分析用 HP6890Plus 气相色谱,配以 HP5973 型质谱检测器(MSD)。分析方法参照美国 EPA8100 方法。

色谱柱:  $30\text{m} \times 0.25\text{mm} \times 0.25\mu\text{m}$  HP-5MS 低流失毛细管柱;最初炉温:  $60^{\circ}\text{C}$ ;进样口温度:  $250^{\circ}\text{C}$ ;检测器温度:  $280^{\circ}\text{C}$ ;EI 电子轰击:  $70\text{eV}$ ;离子源温度:  $250^{\circ}\text{C}$ ;四极杆温度:  $200^{\circ}\text{C}$ ;光电倍增管电压:  $1380\text{V}$ ;调谐:自动;升温程序:  $60^{\circ}\text{C}$  保持 2min,以  $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $120^{\circ}\text{C}$ ,再以  $4^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $300^{\circ}\text{C}$ ,保持 10min;载气:高纯 He,流速  $1\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ;扫描模式:SIM;扫描质量:  $30-550\text{m} \cdot \text{z}^{-1}$ ;进样:HP7683 自动进样器,无分流进样  $2\mu\text{l}$ ;数据的采集和处理:HP3365 化学工作站。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物中多环芳烃含量及分布特征

从图 2 可知,厦门西海域表层沉积物中 16 种 PAHs 的总含量为  $198.2-1061.6\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均值为  $723.51\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各站位表层沉积物中的 PAHs 含量存在较大差别,分布不均,最高值出现在主航道 X1 站位,含量为  $1061.6\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,靠近博坦油码头,其次为 Y2、X5 站位,含量分别为  $1018.5\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1012\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,三个站位 PAHs 的总含量均超过  $1000\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。PAHs 含量最低值出现在 X2 站位,仅为  $198.2\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,远低于其附近的 X1 站位,其他站位 PAHs 含量分别为 X4 站 ( $443.6\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、X6 站 ( $475.5\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、M2 站 ( $692.8\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、X3 站 ( $734.1\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和 M1 站 ( $875.2\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )。站位 X1 虽靠近外海,但 PAHs 含量最高,疑受博坦油码头、嵩屿电厂和船舶锚地的影响。嵩屿电厂燃烧大量煤,其烟尘沉降,煤灰侵出水入海以及大量船只在该海域出海,对多环芳烃污染有较大影响;Y2 站位为筓筓湖内湖,受城市污水及工业废水影响较大,此外周边公路的车辆滴漏经雨水冲刷进入该湖也会导致 PAHs 含量增加;X5 站位因海水交换差而累积多环芳烃,同时该站位靠近厦门西港的马銮湾封闭式养殖海

区, 受 PAHs 的污染较明显。

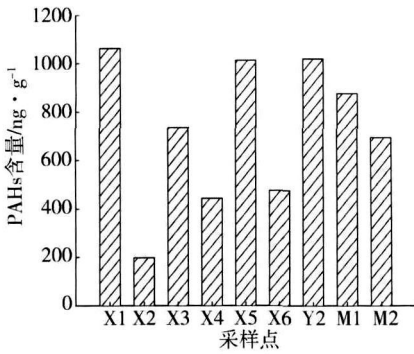


图 2 各采样点表层沉积物中 16 种 PAHs 的总量

Fig. 2 Total concentrations of PAHs in surface sediment samples

表 1 为厦门西海域表层沉积物中 PAHs 各组分浓度。由表 1 可知厦门西海域表层沉积物中能检出的 PAHs 均以 2—4 环的芳香物为主, 其中以萘含量最高, 除 X2 站位外, 其他各站位萘含量在 PAHs 总量中占明显优势, 浓度为 18.7—816.2 ng·g<sup>-1</sup>, 其次是菲、荧蒹和芘, 分别为 23.6—359.9 ng·g<sup>-1</sup>、28.1—93.9 ng·g<sup>-1</sup> 和 27.1—90.9 ng·g<sup>-1</sup>。而 5 环以上高分子量的 PAHs 组分含量低, 很多站位并未检出。表层沉积物中 PAHs 的四个优势组分萘、菲、荧蒹和芘含量之和占 16 种 PAHs 总量的 67%—89.5%。按 PAHs 的环数来区分, 厦门西海域表层沉积物中 PAHs 的含量组成为: 二环> 四环> 三环> 五环> 六环。

表 1 各站位厦门西海域表层沉积物中 PAHs 浓度  
Tab 1 Concentrations of PAHs in surface sediments at western Xiamen Bay

PAHs	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y2	M1	M2
萘	816.2	18.7	499.4	289.7	330.0	339.0	539.9	285.9	388.0
芘	0.2	0.5	1.2	0.0	2.6	ND	ND	2.5	1.7
芘烯	1.1	1.2	3.7	0.0	13.1	ND	ND	10.9	ND
芘	3.2	3.7	21.3	6.2	92.2	6.0	68.4	46.2	36.6
菲	37.8	37.3	40.4	35.7	359.9	23.6	110.8	161.7	64.5
蒹	5.1	3.1	4.2	2.2	31.0	2.6	ND	16.1	ND
荧蒹	49.2	39.9	39.3	28.7	63.9	28.1	68.7	93.9	51.8
芘	47.0	37.0	37.0	28.7	71.4	27.1	69.7	90.9	44.0
苯并蒹	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
蒹	32.5	26.6	25.9	27.0	47.9	16.1	44.3	74.6	70.8
苯并(b)蒹	37.7	21.3	33.1	17.1	0.0	21.7	31.7	68.1	11.4
苯并(k)蒹	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(a)芘	18.4	9.0	14.3	8.3	0.0	11.4	44.9	24.4	7.0
茚并芘	10.8	0.0	14.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
二苯并(a)蒹	2.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(g)二萘嵌苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	40.1	ND	17.0
ΣPAHs	1061.6	198.2	734.1	443.6	1012.0	475.5	1018.5	875.2	692.8

注: ND 为未检出。

## 2.2 表层沉积物中多环芳烃的来源

PAHs 除自然产生外, 主要来自石化燃料和木材等在使用过程中的泄漏、不完全燃烧产物的排放。通常 2、3 环低分子量的 PAHs 主要来源于石油类污染, 4 环及以上高分子量 PAHs 主要由于高温不完全燃烧<sup>[8]</sup>。另外, 许多研究者认为可根据同分异构体的比值来分析 PAHs 的来源, 如菲/蒹、荧蒹/芘、苯并蒹/蒹、芘/苯并(a)芘等<sup>[9-11]</sup>。Budzinski 等的研究表明: 沉积物中菲/蒹 > 10, 指示多环芳烃的原油来源; 菲/蒹 < 10 指示多环芳烃的燃烧来源<sup>[9]</sup>。Sicre 等提出荧蒹/芘 > 1, 指示 PAHs 主要来自化石燃料燃烧, 荧蒹/芘 < 1 则指示 PAHs 来自石油类产品的输入<sup>[12]</sup>。此外, 芘/苯并(a)芘是区分汽油燃烧(尾气)与燃煤污染源的重要参数之一: 当该比值小于 1 可归结为燃煤排放, 比值介于 1—6 属于尾气排放<sup>[13]</sup>。Raoux 等<sup>[14]</sup> 研究认为

为菲/蒹 < 10, 荧蒹/芘 > 1 指示 PAHs 的燃烧来源。

本研究中将不同站位检出的菲与蒹、荧蒹与芘的比值列表 2。综合上述 PAHs 来源分析方法, 推断 X1、X2、X3、X6、M2 站位表层沉积物中 PAHs 主要来源于化石燃料的不完全燃烧; X4、X5、Y2、M1 站位表层沉积物中 PAHs 主要以石油泄漏来源。此外, 各站位芘/苯并(a)芘 > 1, 说明产生 PAHs 产生汽油燃烧多于燃煤污染源, 这与近年来厦门市机动车数量迅速增加有关。

表 2 菲和蒹、荧蒹和芘的比值

Tab 2 Ratios of Phen/An and Fluo/Py

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y2	M1	M2
Phen/An	7.45	12.08	9.73	16.31	11.62	9.25	—	10.07	—
Fluo/Py	1.05	1.08	1.06	1.00	0.89	1.04	0.99	1.03	1.18

注: — 为蒹未检出, 比值无法计算; Phen 为菲, An 为蒹, Fluo 为荧蒹, Py 为芘。

### 2.3 PAHs 污染的生态风险评价

应用 Long 等(1995)提出的海洋和河口湾表层沉积物中多环芳烃的风险评价标准对厦门西海域表层沉积物进行生态风险评价, 该标准两个重要指标分别是毒性效应低值(ERL, 生物有害效应几率小于 10%)和毒性效应区间中值(ERM, 生物有害效应几率大于 50%), 若污染物浓度小于 ERL, 则极少产生负效应; 若污染物浓度大于 ERM, 则经常产生负效应; 若污染物浓度介于两者之间, 则表示对生物可能产生负效应<sup>[15]</sup>。

从表 3 可知, 厦门西海域表层沉积物中多环芳烃浓度远低于毒性效应中值, 因此该海域不存在严重的生态风险。各种 PAHs 单体的平均含量大多小于沉积物中有机污染物的风险评价指标的低值, 仅萘和芴平均含量介于低值和中值之间, 说明该海域表层沉积物中多环芳烃对生物的危害程度较轻。

表 3 厦门西海域表层沉积物中有机污染物的平均值及其风险评价指标  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 干重

Tab 3 Average concentrations of PAHs at western Xiamen Bay and their toxicity indexes  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , DW

化合物	ERL	ERM	平均值	风险效应
萘	160	2100	389.5	ERL—ERM
萘烯	44	640	3.34	< ERL
芴	16	500	0.96	< ERL
芴	19	540	31.53	ERL—ERM
菲	240	1500	96.86	< ERL
蒽	85.3	1100	7.12	< ERL
荧蒽	600	5100	51.51	< ERL
芘	665	2600	50.32	< ERL
蒽	384	2800	40.61	< ERL
苯并(a)蒽	261	1600	0.00	< ERL
苯并(a)芘	430	1600	15.3	< ERL
二苯并(a)蒽	63.4	260	0.27	< ERL
$\Sigma\text{PAHs}$	4022	44792	723.51	< ERL

### 3 结 论

(1) 各站位表层沉积物中 16 种 PAHs 的总含量为 198.2—1061.6  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , X1、Y2 和 X5 站位含量较高, 均超过 1000  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。表层沉积物中能检出的 PAHs 均以 2—4 环的芳香物为主, 除 X2 站位外, 萘在其他站位均为优势组分。X1、X2、X3、X6 和 M2 站位上表层沉积物中 PAHs 主要来源于化石燃料的不完全燃烧, 其他站位表层沉积物中 PAHs 的主要来源为石油泄漏。

(2) 运用沉积物风险评价标准对厦门西海域内表层沉积物中的多环芳烃进行生态风险评估, 结果表明表层沉积物中 PAHs 各组分仅萘和芴平均含量介于低值和中值之间, 其余均低于风险评价低

值, 说明该海域表层沉积物中 PAHs 对生物的危害程度较轻。

### 参考文献:

- [1] 丘耀文, ZHOU J L, MASKAOU I K, 等. 大亚湾海域水体和沉积物中多环芳烃分布及其生态危害评价[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 72—80.
- [2] 丘耀文, 张 干, 郭玲利, 等. 深圳湾生态系统多环芳烃(PAHs)特征及其生态危害[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1056—1061.
- [3] 杨永亮, 麦碧娴, 潘 静, 等. 胶州湾表层沉积物中多环芳烃的分布及来源[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 38—43.
- [4] VOICE T C, RICE C P, WEBER W J JR. Effect of solids concentration of the sorptive partitioning of hydrophobic pollutants in aquatic systems[J]. Environ Sci Technol, 1983, 17(10): 513—518.
- [5] 董 煜, 邹联沛, 钱光人, 等. 苏州河上海市区段表层沉积物中多环芳烃的分布及特征[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(4): 312—315.
- [6] 陶庆会, 汤鸿霄. 多氯联苯污染沉积物质量评价研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(1): 1—6.
- [7] 尹 杰. 关于海洋倾废区管理的探讨—以青岛胶州湾外三类疏浚物海洋倾废区为例[J]. 海岸工程, 2001, 1: 47—51.
- [8] FERNANDEZ M B, SICRE M A, BOIREAU A, et al. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary [J]. Mar Pollut Bull, 1999, 38(1): 7—15.
- [9] BUDZINSKI H, JONES I, BELLOCQ J. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary[J]. Mar Chem, 1997, 58: 85—97.
- [10] SICRE M A, MARTY J C, SALIOT A. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in the different sized aerosols over the Mediterranean Sea: occurrence and origin[J]. Atmospheric Environment, 1987, 21: 265—278.
- [11] SOUSSI H H, GARRIGUES P H, EWALD M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: Case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas[J]. Mar Pollut Bull, 2000, 40: 387—396.
- [12] SICRE M A, MARTY J, SALIOT A, et al. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in the Mediterranean aerosol[J]. Int J Environ Anal Chem, 1987, 29(1): 73—94.
- [13] 朱先磊, 刘维立, 卢妍妍, 等. 燃煤烟尘多环芳烃成分谱特征的研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(5): 4—8.
- [14] RAOUX C, GARRIGUES P. Mechanism model of polycyclic aromatic hydrocarbons contamination of marine coastal sediments from the Mediterranean sea[C] // Proceedings of the 13th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. Bordeaux, France: Gordon and Breach Publishers, 1993: 443—450.
- [15] LONG E R, MACDONALD D D, SMITH S L, et al. Incidence of adverse biological effects with fallges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environ Monit, 1995, 19(1): 81—97.