

杨佰娟, 郑立, 陈军辉, 等. 2009. 南黄海中部表层沉积物中多环芳烃含量分布及来源分析 [J]. 环境科学学报, 29(3): 662 - 667

Yang B J, Zheng L, Chen J H, *et al* 2009. Concentration and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments collected in the Southern Yellow Sea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(3): 662 - 667

# 南黄海中部表层沉积物中多环芳烃含量分布及来源分析

杨佰娟<sup>1</sup>, 郑立<sup>1</sup>, 陈军辉<sup>1,\*</sup>, 张新庆<sup>1</sup>, 黎先春<sup>1</sup>, 王小如<sup>1,2</sup>

1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛现代分析技术及中药标准化重点实验室, 青岛 266061

2. 厦门大学化学化工学院化学系, 现代分析科学教育部重点实验室, 厦门 361005

收稿日期: 2008-04-24 修回日期: 2008-09-24 录用日期: 2009-02-04

**摘要:** 采用气相色谱与质谱联用 (GC/MS) 技术, 在一个航次内对南黄海表层沉积物中 16 种优先监控的 PAHs 的污染状况进行了调查, 采用菲/蒽、荧蒽/芘、荧蒽/(荧蒽+芘)、吡咯芘/(吡咯芘+苯并(g,h,i)芘) 等特定比值对 PAHs 来源进行了分析. 结果表明, 南黄海表层沉积物中检出 PAHs 的总含量为  $90.4 \sim 732.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 各站点均以 4~6 环为主; 与其它站位相比, 倾废区的 H01 站位受到 PAHs 污染较为明显, 无论是 16 种 PAHs 总量还是高分子量组分最高值都出现在该站点, 虽然该海区沉积物中 PAHs 的含量没有超出生物影响低值, 但苯并(b)荧蒽、吡咯芘和苯并(g,h,i)芘等一些没有最低安全标准的 PAHs 也有不同程度的检出, 对海洋生物具有潜在的毒副作用. PAHs 可能来源于原油、生物和煤燃烧造成的污染.

**关键词:** 多环芳烃; 表层沉积物; 南黄海中部

文章编号: 0253-2468(2009)03-662-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

## Concentration and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments collected in the Southern Yellow Sea

YANG Baijuan<sup>1</sup>, ZHENG Li<sup>1</sup>, CHEN Junhui<sup>1,\*</sup>, ZHANG Xinqing<sup>1</sup>, FRANK SenChun Lee<sup>1</sup>, WANG Xiaoru<sup>1,2</sup>

1. Qingdao Key Lab on Analytical Technology Development and Standardization of Chinese Medicines, First Institute Oceanography, SOA, Qingdao 266061

2. Department of Chemistry and the Key Laboratory of Analytical Science of the MOE, College of Chemistry and Chemical Engineering Xiamen University, Xiamen 361005

Received 24 April 2008; received in revised form 24 September 2008; accepted 4 February 2009

**Abstract:** The concentrations of sixteen representative Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in surface sediment samples collected from the Southern Yellow Sea were determined by GC/MS. The distribution and potential sources of PAH contamination in the region were investigated. The types of PAHs found in the surface sediments were mainly 4~6 ring PAHs, and they are unevenly distributed among the different sampling sites covering an area of 139 km<sup>2</sup>. The area is known for continuous waste dumping activities in recent years, and indeed sites adjacent to such activities were found to have high levels of PAHs. Some high molecular weight PAH compounds such as benzo[b]fluoranthene, dibenzo[a,h]anthracene and benzo[g,h,i]perylene were detected in some samples. The health implication of these contaminants needs careful assessment since toxicity guidelines are not available for these species. The potential sources of PAHs are discussed using various source-specific PAH indexes such as Phenanthrene/Anthracene, Fluoranthene/Pyrene, Fluoranthene/(Fluoranthene+Pyrene) and Indeno[1,2,3-cd]pyrene/(Indeno[1,2,3-cd]pyrene+Benzo[g,h,i]perylene). The composition of the observed PAHs reflects that they originate from both petroleum utilization and incomplete combustion.

**Keywords:** polycyclic aromatic hydrocarbons; surface sediment; middle of Southern Yellow Sea

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (No. 200705011); 中国海监技术支撑体系项目; 2008 年海洋环境保护及节能减排专项

Supported by the Public Welfare Project of Marine Science Research (No. 200705011), the Project of on technical support system of Marine Surveillance and the Project of Marine Environmental Protection and Energy-Saving Emission, 2008

作者简介: 杨佰娟 (1977—), 女, E-mail: baijuan66@yahoo.com.cn; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: chen2000junhui@163.com

Biography: YANG Baijuan (1977—), female, E-mail: baijuan66@yahoo.com.cn; \* Corresponding author, E-mail: chen2000junhui@163.com

## 1 引言 (Introduction)

多环芳烃类化合物 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 是一种普遍存在的环境污染物,具有强致癌性,已经被美国 EPA 列为优先控制的环境污染物.海洋环境中的 PAHs 主要来源于人类活动和能源利用过程,如石油、煤、木材等的燃烧过程,石油及石油化工产品的生产过程,通过地面径流、污水排放及机动车辆等燃料不完全燃烧后的废气随大气颗粒的沉降等过程进入海洋环境中 (田蕴等, 2004). 目前,我国对多环芳烃的监测主要集中在工业发达地区附近的河口 (袁东星等, 2001), 内湾 (张路, 2003), 近岸海域中的水体、沉积物及生物体 (田蕴等, 2003). 南黄海是长江口至济州岛连线以北的椭圆形半封闭海域,是华北一带的海路要道,但南黄海中部多环芳烃的分布至今未见报道. 本研究在 1 个航次内对南黄海海区 15 个站位表层沉积物中 16 种优先监控的 PAHs 的含量、组成进行调查,并对几个污染特征及原因进行探讨,旨在为近海海域有机污染的治理提供科学依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 样品采集

2007 年 9 月采集了南黄海中部表层沉积物,采样站位如图 1 所示. 盛装沉积物样品的玻璃器皿均在采样前经重铬酸钾浸泡,自来水、MillQ 水、HPLC 级丙酮荡洗,表层沉积物用抓斗采泥器采集,采集的沉积物样品立即在  $-20^{\circ}\text{C}$  下冷冻,分析前经冷冻干燥,研磨后过 100 目筛.

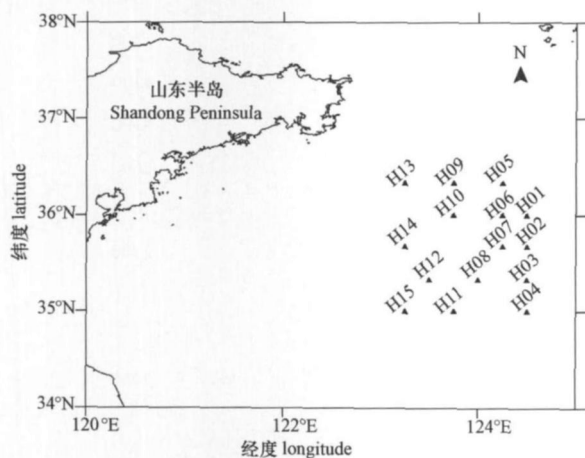


图 1 南黄海海域采样站位  
Fig. 1 Map of sampling stations

### 2.2 样品处理

2.2.1 加速溶剂萃取 (D DNEX ASE100) 准确称取过 100 目筛 5 g 冷冻干燥后沉积物样品,加入 34 mL 的萃取池中,加入 0.5 g Cu 粉除硫. 所用溶剂为二氯甲烷 (农残级, Merck), 温度为  $100^{\circ}\text{C}$ , 压力为  $1.17 \times 10^7 \text{ Pa}$ , 预热 5 min, 静态萃取 7 min. 提取液用 K-D 浓缩器浓缩至 0.5 mL.

2.2.2 净化 采用 Clean Silica SPE 净化, 具体操作步骤为: 首先用 6 mL 正己烷调节净化柱, 然后将提取液加于柱头, 用 25 mL 二氯甲烷 (农残级, Merck) 淋洗净化柱, 收集洗脱液, 用温和  $\text{N}_2$  气流吹扫净化得到的洗脱液, 使其浓缩至 500  $\mu\text{L}$ , 加入内标, 进气相色谱-质谱仪, SM 方式检测, 选择离子碎片为 136, 128, 152, 162, 153, 166, 178, 202, 228, 252, 264, 276, 278.

### 2.3 测定与分析

2.3.1 仪器分析 所用仪器包括 Agilent 6890N 气相色谱仪, 5973N 质谱仪 (GC-MS), 色谱柱: HP-5MS, 30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ . 气相色谱操作条件: 气化室温度为  $250^{\circ}\text{C}$ ; 传输线温度为  $280^{\circ}\text{C}$ ; 色谱柱升温程序: 色谱柱温程序:  $70^{\circ}\text{C}$  初温, 以  $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $150^{\circ}\text{C}$ , 再以  $7^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $300^{\circ}\text{C}$ , 保留 7 min. 进样方式为不分流进样. 进样量为 1  $\mu\text{L}$ . 质谱: E 离子源, 倍增器电压 1200 V, 离子源温度为  $230^{\circ}\text{C}$ , 四极杆温度为  $150^{\circ}\text{C}$ , 选择离子检测 (SM).

2.3.2 样品分析 PAHs 标准样品由百灵威化学技术有限公司提供. 目标化合物为萘 (Naph)、二氢萘 (Aceph)、萘 (Ace)、芴 (F)、菲 (Phe)、蒽 (An)、荧蒽 (Fl)、芘 (Py)、苯并蒽 (BaA)、蒽 (Chr)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、二苯并 [a, h] 蒽 (DBA)、苯并 [g, h, i] 花 (BghiP)、吡啶 (P). 标准替代物 (surrogate standard): 蒽- $\text{D}_{10}$  (Anthracene- $\text{D}_{10}$ ), 购自 Alfa, 作为内标监控方法回收率. 内标: 芘- $\text{D}_{10}$  (pyrene- $\text{D}_{10}$ ) 购自 Alfa. 内标法计算各 PAHs 的含量.

内标法是在浓缩试样中均添加一定量的内标芘- $\text{D}_{10}$  溶液, 其浓度应与标准溶液中的相等. 将各标准和试样溶液 1  $\mu\text{L}$ , 在上述色谱条件下, 分别注入色谱仪, 得到色谱图. 计算内标物及各组分的峰面积, 以内标物芘- $\text{D}_{10}$  的峰面积作分母, 各组分的峰面积作分子, 计算各色谱图上各组分的峰面积比值. 以各峰面积比值与各组分在标准溶液中对应的含量作图, 绘制标准曲线. 根据试样中各组分与内标的

峰面积比,从标准曲线上查出各组分的含量.内标法的优点是对进样量不严格要求.内标的加入消除了由于进样量、仪器不稳定等因素带来的系统误差.

#### 2.4 质量控制

所有样品在前处理开始时均加入了标准替代物,以监视样品分析全过程中待测物的损失情况,从而提高了测定数据的可靠性.我们对一系列样品的测定结果进行分析,结果表明,经过复杂样品的前处理后标准替代物的回收率在 57% ~ 127% 之间.

#### 2.5 精密度和方法检测限

在优化条件下,在空白沉积物样本(经过二氯甲烷反复抽提,检测结果不含 PAHs)中加入标准品使其浓度分别为  $10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,连续测定 6 次,PAHs 保留时间的相对标准偏差分别为 0.01% ~ 0.02%,峰面积相对标准偏差分别为 3.76% ~ 2.35%.

按照最佳试验条件,在 5 份空白沉积物样本中加入标准品使其含量分别为  $10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,做回收率实验.实验结果表明(见表 1),PAHs 回收率在 48% ~ 113% 之间,RSD 值范围为 6.04% ~ 24.54%,仪器检出限在  $0.10 \sim 3.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (干重)之间,可以满足环境样品痕量分析的要求.

表 1 PAHs 的回收率和检出限

多环芳烃 PAHs	回收率 Recovery	相对标准偏差 RSD	检测限 Detection limit /( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )
Naph	48%	16.1%	0.25
Aceph	61%	7.08%	0.87
Ace	58%	6.04%	0.43
F	62%	8.98%	0.22
Phen	54%	23.45%	0.12
An	59%	10.43%	0.45
Fl	74%	20.84%	0.10
Py	92%	14.36%	0.13
BaA	106%	8.86%	0.12
Chr	105%	8.73%	0.30
BbF	77%	11.02%	0.89
BkF	101%	12.88%	1.70
BaP	80%	12.43%	1.10
IP	71%	10%	1.00
DBA	105%	12.73%	3.50
BghiP	113%	24.54%	1.40

#### 2.5 数据分析

采用统计软件 Origin 7.0 和 Surfer 8.0 进行相关的数据分析、统计及图的绘制.

### 3 结果 (Results)

南黄海中部 15 个站位表层沉积物中 16 种 PAH 的调查结果如表 2 所示. 15 个站位表层沉积

表 2 南黄海中部表层沉积物 PAHs 含量

PAHs	最高值 high	最低值 low	平均值 average	生物影响范围低值 ER-L	生物影响范围中值 ER-M
Naph	50.63	11.11	30.06	160	2100
Aceph	3.32	0.67	1.91	44	640
Ace	7.39	0.72	2.19	16	500
F	9.40	1.31	3.78	19	540
Phen	34.98	4.27	12.45	240	1500
An	11.20	1.75	3.43	85	1100
Fl	73.41	7.05	23.93	600	5100
Py	44.01	5.03	15.06	665	2600
BaA	41.08	4.71	15.72	261	1600
Chr	42.89	6.34	18.35	384	2800
BbF	100.75	6.62	36.85		
BkF	49.03	6.82	20.29		
BaP	59.30	8.35	24.97	430	1600
IP	77.02	6.44	35.15		
DBA	35.56	4.33	14.67	63	260
BghiP	105.50	8.75	40.76		
PAHs 总量	732.65	90.40	299.57	4022	44792

物中 16 种 PAHs 含量差异很大,在 124 00 E 以西靠近我国的 8 个站点,表层沉积物中 16 种 PAHs 的总量为  $196.43 \sim 485.26 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,在 124 00 以东的 7 个站点,表层沉积物中 16 种 PAHs 的总量为  $90.40 \sim 732.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其中最高的是 H01 站为  $732.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其次为 H05 含量为  $359.94 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 表层沉积物中 PAHs 的组成特征

南黄海表层沉积物多环芳烃环数分布图如图 2 所示。由图可知,检出的 16 种 PAHs 均以 4~6 环芳香物为主,占 PAHs 含量的  $68.15\% \sim 86.51\%$ ,除了 H02 和 H03 两个站点沉积物中 4 环含量大于 5 环芳香物含量外,其余站点均以 5 环为优势组分,在  $28.05\% \sim 35.07\%$  之间,平均值为  $31.47\%$ ;其次为 4 环芳香物,含量为  $17.72\% \sim 30.78\%$ ,平均值为  $24.61\%$ ;再次是 6 环芳香物,含量在  $16.60\% \sim 29.99\%$  之间,平均值为  $22.74\%$ 。2 环含量最低的为 H01 站点,仅为  $6.91\%$ ,最高的站点为 H14,含量为  $22.58\%$ 。这是因为沉积物中低分子量的 PAHs (2~3 环) 很容易降解、挥发,而大分子量的 PAHs (4~6 环) 比较稳定,因此,沉积物中 4~6 环 PAHs 的含量较高 (Ma *et al.*, 2005)。

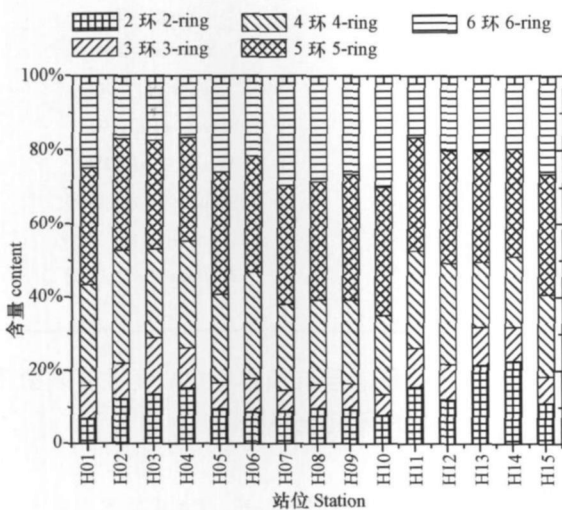


图 2 南黄海表层沉积物 2、3、4、5、6 环的分布图

Fig 2 Distribution of 2-, 3-, 4-, 5-, 6-ring PAHs in the surface sediment

从以上结果可以看出, H01 站点受到 PAHs 污染较为明显,无论是 16 种 PAHs 总量还是高分子量组分最高值都出现在该站点。据有关大会报告报道 (Sang *et al.*, 2007), H01 为韩国的一个海上倾废

区,所以其 PAHs 的总量远远高于其它站点。报告详细报道了倾废区多氯联苯、有机氯农残、烷基酚等有机污染物的数据,未见 PAHs 污染情况的报道,故目前缺乏历史数据的比较。

### 4.2 表层沉积物中 PAHs 的来源分析

环境中 PAHs 主要来源于矿物燃料的不完全燃烧、人类的各种活动及能源污染等。由于在燃烧过程中会产生一些典型多环芳烃同分异构体,因此,它们已经被广泛的用来作为判别 PAHs 燃烧来源的指示剂 (Yunker *et al.*, 2002),如菲/蒽 (Phen/An)、荧蒹/芘 (Fl/Py)、荧蒹/(荧蒹+芘) {Fl/(Fl+Py)}、吡咯芘/(吡咯芘+苯并(g,h,i)芘) {IP/(IP+BghiP)} 等比值可以作为分析 PAHs 来源的信息。菲和蒽 (荧蒹和芘) 在  $P_1$ 、 $K_{OA}$  等物理化学性质相似,因此,它们比例变化可以反映污染源的差异。图 3 所示为同分异构体 Phen/An、Fl/Py 比值图。通常,Phen/An 大于 10 表示 PAHs 由石油污染引起的 (Baumard *et al.*, 1998),小于 10 表示 PAHs 是由高温燃烧所产生的。Fl/Py 大于 1 表明,PAHs 由高温燃烧所产生的 (Doong *et al.*, 2004),小于 1 表示 PAHs 由石油污染引起的。从图 3 中可以看出,南黄海 14 个站点表层沉积物中 PAHs 污染可能来源于燃烧,为了进一步确定污染源,做了同分异构体 Fl/(Fl+Py) 与 IP/(IP+BghiP) 比值图 (图 4)。当 Fl/(Fl+Py) 的比值小于 0.4 时表明,PAHs 是石油污染造成的,大于 0.5 表示 PAHs 是由草、木材、煤等燃烧引起的污染,比值在  $0.4 \sim 0.5$  之间表明 PAHs 是原油燃烧造成的污染。对于 IP/(IP+BghiP) 比值低于 0.2 时表明 PAHs 来源于石油污染,大于 0.5 表示 PAHs 由生物和煤燃烧引起的,在  $0.2 \sim 0.5$  之

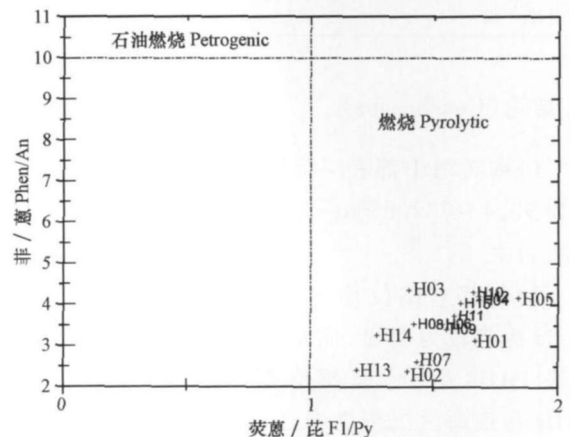


图 3 同分异构体荧蒹/芘与菲/蒽比值图

Fig 3 Plot of the isomeric ratio Fl/Py vs Phen/An

间表明 PAHs 是由原油燃烧造成的污染 (Luo *et al*, 2005). 从图 4 可以看出, H05、H09、H11 和 H14 站点表层沉积物 PAHs 污染可能来源于生物和煤燃烧, 其余站点的污染可能是由石油燃烧引起的.

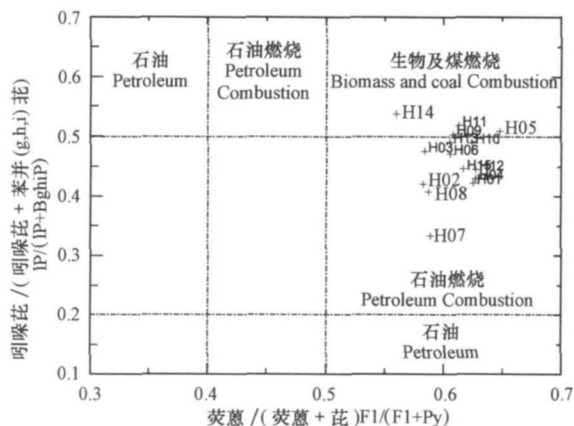


图 4 同分异构体荧蒽/(荧蒽+芘)与唛唛芘/(唛唛芘+苯并(g,h,i)芘)比值图

Fig 4 Plot of isomeric ratio FI/(FI+Py) vs IP/(IP+BghiP)

#### 4.3 南黄海海域表层沉积物中 PAHs 的污染水平

表 3 列出了一些港口和内湾地区沉积物中

PAHs 的检出含量, 南黄海中部沉积物中 PAHs 的含量分布在  $90 \sim 733 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 略大于珠江口的 PAHs 含量. 与几个污染较重的港湾相比, 南黄海中部污染较轻, 但是远大于污染较少的南中国海.

根据 Long 等 (1995) 的研究, 沉积物中 PAHs 的含量若低于生物影响范围低值 (Effects Range-Low, ER-L)  $4022 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 对生物毒副作用小于 10%; PAHs 的含量若高于生物影响范围中值 (Effects Range-Median, ER-M)  $44792 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 对生物毒副作用大于 50%. 南黄海中部各站点表层沉积物中 PAHs 均未达到生态毒理评价标准 (表 1), 但苯并[k]荧蒽、苯并[b]荧蒽、唛唛芘、苯并[ghi]芘没有最低安全值, 也就是说, 这几种 PAHs 在环境中只要存在就会对生物有毒副作用, 而在本研究中发现, 这几种高分子量的 PAHs 在各站点均被不同程度地检出, 并且在一些站点的含量较高, 如 H01 站点苯并[k]荧蒽、苯并[b]荧蒽、唛唛芘含量分别高达  $100.75$ 、 $105.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . 结果表明, 这些存在于沉积物中的高分子量的 PAHs 对海洋生物具有潜在的毒副作用.

表 3 PAHs 在不同地区沉积物中的含量

Table 3 Concentrations of total PAHs detected in sediments from different areas

区域名称	PAHs 种类	PAHs/( $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均值/( $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )	文献
南中国海	11	25 ~ 275	146	Yang, 2000
渤海和黄海海岸	10	206 ~ 57346	8776	Ma <i>et al</i> , 2001
珠江口	18	189 ~ 637	362	Luo <i>et al</i> , 2006
香港维多利亚港	8	700 ~ 26100	5277	Hong <i>et al</i> , 1995
美国旧金山湾	17	2653 ~ 27680	7457	Pereira <i>et al</i> , 1996
Kitimat 港, Canda	15	310 ~ 528000	66700	Simpson <i>et al</i> , 1996
Casco 湾, 美国	23	16 ~ 20748	2900	Kennicutt <i>et al</i> , 1994
Guba Pechenga, 巴伦支海, 俄国	27	428 ~ 3257	1481	Vladimir <i>et al</i> , 2003
南黄海中部	16	90 ~ 733	300	本研究

## 5 结论 (Conclusions)

1) 南黄海中部表层沉积物中检出 PAHs 的总含量为  $90.4 \sim 732.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 各站点均以 4~6 环芳香物为主.

2) 与其它站点相比, 倾废区的 H01 站点受到 PAHs 污染较为明显, 无论是 16 种 PAHs 总量还是优势 PAHs 组分, 最高值都出现在该站点; 虽然 PAHs 在该海区沉积物中含量没有超出生物影响低值, 但一些没有最低安全标准的高分子量 PAHs 有不同程度的检出, 对海洋生物具有潜在的毒副作用.

3) 南黄海中部表层沉积物中 PAHs 主要来源于汽油和煤等矿物的不完全燃烧.

责任作者简介: 陈军辉 (1978—), 男, 海洋化学专业博士; 主要从事色谱-质谱联用分析及海洋天然药物、海洋环境污染物检测、海洋溢油等方面的应用研究工作.

#### 参考文献 (References):

- Baumard P, Budzinski H, Mchin Q, *et al* 1998. Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean Sea from mussel and sediment records. *Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science*, 47: 77—90

- Doong R, Lin Y T. 2004. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan [J]. *Water Research*, 38: 1733—1744
- Hong H, Xu L, Zhang L, *et al* 1995. Environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediments of Xiamen and Victoria Harbours[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 31: 229—236
- Kennicutt II M C, Wade T L, Presley B J, *et al* 1994. Sediment contaminants in Casco Bay, Maine: inventories, sources, and potential for biological impact [J]. *Environmental Science and Technology*, 28: 1—15
- Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al* 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 19: 81—97
- 罗孝俊,陈社军,麦碧贤,等. 2005. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源 [J]. *环境科学*, 26(4): 129—134
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al* 2005. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from rivers of Pearl River delta and its nearby south China sea [J]. *Environmental Science*, 26(4): 129—134 (in Chinese)
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al* 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter and sediments from the Pearl River Estuary and adjacent coastal areas, China [J]. *Environmental Pollution*, 139: 9—20
- Ma L L, Chu S G, Wang X T, *et al* 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils from outskirts of Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 58: 1355—1363
- Ma M H, Feng Z Q, Guan C J, *et al* 2001. DDT, PAH and PCB in sediments from the Intertidal Zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 42: 132—136
- Pereira W E, Hostettler F D, Rapp J B. 1996. Distributions and fate of chlorinated pesticides, biomarkers and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments along a contamination gradient from a point-source in San Francisco Bay, California [J]. *Marine Environmental Research*, 41: 299—314
- Sang H H. 2007. Agrochemical pollution in Korea [R]. Korea: Analytical Chemistry of [legacy] Agrochemicals in Environmental Safety, 15—26
- Simpson C D, Mosi A A, Cullen W R, *et al* 1996. Composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in surficial marine sediments from Kitimat Harbor, Canada [J]. *The Science of the Total Environment*, 181: 265—278
- 田蕴,郑天凌,王新红,等. 2004. 厦门西港表层海水中多环芳烃 (PAHs)的含量、组成及来源 [J]. *环境科学学报*, 24(1): 50—55
- Tian Y, Zheng T L, Wang X H, *et al* 2004. Concentration, composition and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of Xiamen Harbor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24(1): 50—55 (in Chinese)
- 田蕴,郑天凌,王新红,等. 2003. 厦门马銮湾养殖海区多环芳烃的污染特征 [J]. *海洋环境科学*, 22(1): 29—33
- Tian Y, Zheng T L, Wang X H, *et al* 2003. Contamination characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in Maluan Bay mariculture area of Xiamen [J]. *Marine Environmental Science*, 22(1): 29—33 (in Chinese)
- Vladimir M S, Tatiana N S, Gennady G M, *et al* 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorines (OCs) in bottom sediments of the Guba Pechenga, Barents Sea, Russia [J]. *The Science of the Total Environment*, 306: 39—56
- Yang G P. 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the South China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 108: 163—171
- 袁东星,杨东宁,陈猛,等. 2001. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布 [J]. *环境科学学报*, 21(1): 107—112
- Yuan D X, Yang D N, Chen M, *et al* 2001. Concentrations and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorides in surface sediment of Xiamen Western Harbour and Minjiang Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 21(1): 107—112 (in Chinese)
- Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al* 2002. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 33: 489—515
- 张路,范成新,秦伯强,等. 2003. 太湖宜溧河水系沉积物中多环芳烃来源解析 [J]. *地球化学*, 32(2): 124—130
- Zhang L, Fan C X, Qin B Q, *et al* 2003. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments of the Yili river system in Lake Taihu [J]. *Geochimica*, 32(2): 124—130 (in Chinese)