

太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征

舒卫先^{1,2}, 李世杰¹

(1. 湖泊与环境国家重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:持久性有机污染物引起的水质安全性问题日益受到广泛的关注, 为了全面了解太湖流域湖泊沉积物中多环芳烃的污染特征, 在太湖流域选择典型湖泊天目湖和太湖梅梁湾分别采集 7 个表层沉积物(0~2 cm)样品, 利用 GC/MS 分析了样品中 16 种优控多环芳烃(PAHs)。结果表明, 天目湖表层沉积物中 16 种优控 PAHs 总量介于 287.50~713.93 ng·g⁻¹(干质量), 太湖梅梁湾表层沉积物中 PAHs 总量介于 1 690.72~5 033.70 ng·g⁻¹(干质量), 空间分布特征受周边区域内点源污染和河流输入污染物影响。天目湖表层沉积物 TOC 浓度与 PAHs 总量相关性比太湖梅梁湾显著。利用特征化合物指数对 PAHs 的来源进行判别, 天目湖表层沉积物中 PAHs 主要来源是木材、煤燃烧, 而太湖梅梁湾表层沉积物中 PAHs 主要来自石油、木材和煤燃烧混合来源。基于沉积物中多环芳烃的环境质量标准, 太湖梅梁湾表层沉积物中 PAHs 生态风险远高于天目湖, 但总体生态风险较低。

关键词:太湖梅梁湾; 天目湖; 多环芳烃; 表层沉积物

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1409-06

Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Surface Sediment from Two Typical Lakes in the Taihu Basin

SHU Wei-xian^{1,2} LI Shi-jie¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate school of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The safety of water resource, threatened by persistent organic pollutants (POPs), is of great concern. To well understand the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lake surface sediment, the Tianmu Lake and the Meiliang Bay of the Taihu Lake in the Taihu Basin were chosen for study. Seven surface sediment samples (0~2 cm in depth) from different localities were collected in each of the lakes. Concentration of 16 PAHs, identified as priority pollutants by the USEPA, were measured by gas chromatography equipped with a mass spectrometry detector (GC/MS). The study results show that the total PAHs concentration ranges from 1 690.72 to 5 033.70 ng·g⁻¹ (dry weight), with an average of 3 498.97 ng·g⁻¹ in the sediment samples from Meiliang Bay and from 287.50 to 713.93 ng·g⁻¹, with an average of 458.52 ng·g⁻¹ in the Tianmu Lake. The distribution of PAHs is found to have been influenced by riverine discharge and point-source pollution. Correlation between TOC content and the total PAHs concentration in the surface sediment from the Tianmu Lake shows a higher coefficient ($R^2=0.898$) than that ($R^2=0.350$) of the Meiliang Bay. According to the observed molecular indices, the PAHs in surface sediment from the Tianmu Lake originated largely from coal and biomass combustion in the surrounding areas, while those found in the surface sediment from Meiliang Bay in the Taihu Lake originated from mixed sources of petroleum PAHs, coal and biomass combustion. Referring to the sediment quality standards, the sediment from Meiliang Bay in the Taihu Lake possesses a slightly higher PAHs toxicity than that from the Tianmu Lake, but overall the PAHs toxicity in the sediment of the Taihu Lake is still relatively low.

Keywords: Meiliang Bay in the Taihu Lake; Tianmu Lake; polycyclic aromatic hydrocarbon; surface sediment

广泛分布于环境中的多环芳烃(PAHs)是一类持久性有机污染物(POPs), 具有潜在的毒性、致癌、致

诱变作用和生物富集性, 可通过食物链进入生态系统, 进而影响人体健康。在 20 世纪 80 年代初, 美国环境保护局(USEPA)把 16 种无支链的 PAHs 列入优先控制污染物名单(EPA Priority Pollutant List)。人类活动是 PAHs 的主要来源, 包括化石燃料和木材等有机物不完全燃烧产生的排放、石油及其精炼产品的泄漏

收稿日期: 2008-03-21

基金项目: 科技部重大基础研究前期研究专项(2004CCA02900)

作者简介: 舒卫先(1973—), 男, 在职博士研究生, 从事湖泊环境变化的研究。E-mail: wxshu@niglas.ac.cn

通讯作者: 李世杰, 研究员, 博士生导师 E-mail: shjli@niglas.ac.cn

等。PAHs的疏水亲脂特性使得它们在水体中的含量较低,会强烈地分配到非水相,特别是有机相中,大部分被水体中的悬浮颗粒物吸附,并迅速进入沉积环境,水体沉积物被认为是PAHs的蓄积库;同时,水体沉积物中的PAHs还可通过地球化学循环重新进入水体和大气中,形成二次污染,因此,水体沉积物中PAHs污染已引起人们的广泛重视^[1-5]。

长江三角洲地区工农业发达,人口密度高,20世纪90年代其总排污量已经占全中国排污量的40%^[6]。该地区湖泊众多,这些湖泊是周边地区工农业生产、人民生活重要的水源地,由于治理措施的相对滞后,近年来该地区许多湖泊污染严重,已威胁到人民的用水安全。太湖位于长江三角洲的南翼,是中国五大淡水湖之一,面积2338 km²,平均水深1.9 m^[7]。梅梁湾是太湖北部的一个湖湾,呈南北走向,靠近无锡市,是太湖受营养盐、重金属污染严重的区域之一,近年来蓝藻爆发频繁^[8]。天目湖原名沙河水库,位于江苏省溧阳市南部丘陵地,为一东西窄、南北长的深水湖(水库)。2001—2002年实测最大深度为14 m,号称江苏境内“最后一泓净水”^[9]。本文对太湖梅梁湾、天目湖表层沉积物中16种优控PAHs进行了对比分析,这对全面了解太湖流域湖泊沉积物中PAHs污染有重要的意义。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

样品分别于2005年11月在太湖梅梁湾和2006年5月在天目湖用重力采样器采集,GPS定位。在梅梁湾采集的7个样点依次编号为M1~M7;在天目湖采集的7个样点依次编号为T1~T7,采样点位见图1。采样后,在野外现场取下采样管,把采样管中柱状沉积物样品顶出,取最上部2 cm沉积物的中间部分作为样品,装入洗净的玻璃瓶内,于-20℃冷冻保存至分析。

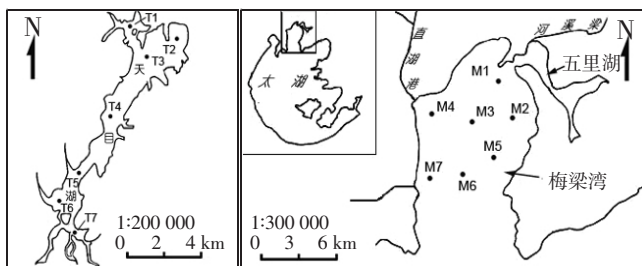


图1 研究区域及采样站位

Figure 1 Map of study area showing sampling site

1.2 样品分析

将样品冻干磨碎后,分别称取10 g样品置于索氏提取器内,加入菲-D10和茈-D12作为回收率指示物,用150 mL的二氯甲烷索氏抽提72 h,同时加入活化的铜片脱硫。收集萃取液,将萃取液浓缩后置换为正己烷后,过硅胶/氧化铝(2:1)层析柱分离纯化。15 mL正己烷淋洗烷烃,5 mL正己烷和70 mL二氧甲烷/正己烷(体积比3:7)淋洗芳烃。芳烃组分浓缩定容为1.0 mL,加入内标进行GC-MS测试。

使用内标法和多点校正曲线定量分析16种优控PAHs,所用仪器为离子阱GC-MS(Finnigan Trace GC/PolarisQ),配有Triplus自动进样器;30 m×250 μm, DB-5MS毛细管柱分离,高纯氮气做载气,恒定流速为1.0 mL·min⁻¹,不分流模式进样(1 μL)。为了得到更好的测试灵敏度,本文选择了串连质谱模式(MSMS)对样品进行了分析。气相色谱的升温程序为:50℃停留2 min;以20℃·min⁻¹的速度升至180℃;再以4℃·min⁻¹的速度升至250℃;2℃·min⁻¹的速度升至280℃,停留2 min;最后以10℃·min⁻¹的速度升至300℃,停留5 min。用上述色谱及质谱方法测定回收率指示物质,菲-D10的回收率在70%~115%,茈-D12的回收率在67%~90%之间。分析测定质量控制与保证措施参见文献[10]。

总有机碳(TOC)用重铬酸钾容量法(外加热法)分析^[11]。

2 结果与分析

2.1 沉积物中PAHs含量与空间分布特征

采集的样品为最表层0~2 cm沉积物,反应了近年来的PAHs输入,天目湖和太湖梅梁湾表层沉积物中16种优控PAHs含量和TOC的测试结果见表1。天目湖不同点位表层沉积物中PAHs含量介于287.51~713.93 ng·g⁻¹,平均值为458.52 ng·g⁻¹。最高值出现在北部T1点(713.93 ng·g⁻¹),其次是T3点(666.71 ng·g⁻¹),最小值在南部T6点。太湖梅梁湾不同点位表层沉积物中PAHs含量介于1 690.72~5 033.70 ng·g⁻¹,平均值为3 498.97 ng·g⁻¹,最高值出现在M1点,其次是M4点(4 738.51 ng·g⁻¹)和M2点,最小值在M6点。梅梁湾表层沉积物中PAHs浓度平均值为天目湖的近8倍。人类活动,包括工业污染和城市活动是长江三角洲地区水环境中多环芳烃的重要来源,天目湖和太湖梅梁湾流域内人类活动强度的差异导致了表层沉积物中PAHs含量的显著差别。

表 1 天目湖和太湖梅梁湾各采样点表层沉积物中的 PAHs 含量($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{dw}$)和 TOC 浓度(%)

Table 1 Composition, concentration of 16 PAHs and TOC content in surface sediment samples from Tianmu Lake and Meilian Bay, Tai Lake

采样点	2 环	3 环	4 环	5 环	6 环	Σ PAHs	TOC
T1	32.02	179.53	236.56	156.60	109.22	713.93	18.22
T2	8.57	74.21	183.65	85.92	64.39	416.74	13.80
T3	12.44	111.92	251.46	167.86	123.03	666.71	18.38
T4	4.71	106.41	209.91	127.56	79.50	528.09	14.88
T5	7.30	56.87	99.40	75.93	54.77	294.27	11.78
T6	5.72	68.55	98.20	67.23	47.81	287.51	13.69
T7	4.78	90.93	106.51	59.90	40.30	302.42	13.29
M1	224.53	1 343.66	2 122.40	927.19	415.93	5 033.70	16.49
M2	246.61	1 229.01	1 429.90	765.66	413.63	4 084.81	12.73
M3	180.78	1 190.74	1 180.80	648.18	397.12	3 597.61	12.65
M4	236.84	1 314.57	2 174.32	701.41	311.36	4 738.51	13.63
M5	68.64	739.31	1 096.79	631.44	342.99	2 879.18	14.12
M6	99.20	479.60	615.70	307.55	188.67	1 690.72	12.49
M7	164.68	882.65	746.65	425.42	248.88	2 468.28	13.09

与其他水体沉积物中多环芳烃污染对比有助于了解天目湖、太湖梅梁湾 PAHs 的污染状况(表 2)。天目湖表层沉积物中 PAHs 含量略高于南四湖以及水动力强的河流、河口表层沉积物中 PAHs 含量,如钱塘江、辽河和珠江口;比流经大型工业城市的河流表层沉积物中 PAHs 含量偏低,如黄浦江、珠江广州河段。太湖梅梁湾表层沉积物中 PAHs 含量与长江三角洲地区各种水体沉积物中相比较,但远低于一些工业发达地区的河段、港湾表层沉积物中的 PAHs 含量,如加拿大 Kitimat 港、香港维多利亚港。

天目湖北部湖区 4 个点表层沉积物中 PAHs 浓

表 2 不同地区水体表层沉积物中 PAHs 含量($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{dw}$)对比
Table 2 Comparison of PAHs concentrations($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{dw}$) in surface sediments of different regions

地点	被测 PAHs 数量	浓度范围	平均值	参考文献
钱塘江	15	91~614	313	[12]
南四湖	16	229~609	442	[13]
黄浦江	16	244~2 805	1 256	[14]
珠江广州河段	16	1 434~10 811	4 892	[15]
珠江口	16	192~622	321	[16]
辽河	16	28~1 479	286	[17]
维多利亚港, 香港	8	700~26 100	5 277	[18]
Kitimat Harbour, 加拿大	25	310~528 000	66 700	[19]
天目湖	16	288~714	459	本研究
太湖梅梁湾	16	1 691~5 034	3 499	本研究

度平均值($581.37 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)高出南部湖区 3 个点的平均值($294.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)近 1 倍。天目湖南部承接上游来水,其入湖河道流经苏浙皖 3 省交界地的山区,污染很少,从而导致南部湖区表层沉积物中 PAHs 含量较低;天目湖北部沿岸由于旅游业的发展,宾馆、饭店众多,可能是生活污水排放以及其他人类活动形成的多环芳烃进入湖泊沉积物,使得北部湖区沉积物中 PAHs 浓度较高。梅梁湾表层沉积物 PAHs 浓度北部高南部低,沿岸高,中间偏低。M1 点靠近五里湖,受五里湖有机污染较重和梁溪河逆流带入城市污水的影响;而 M4 点在直湖港入湖口,直湖港带入的工业、生活污水较多^[9],从而 M1 和 M4 两点表层沉积物中 PAHs 的污染程度高。可以认为,影响长江三角洲地区湖泊表层沉积物 PAHs 分布的决定因素是湖泊周边区域点源污染排放和入湖河流的输入。

2.2 沉积物中多环芳烃浓度与 TOC 含量的关系

许多研究者也报道水体沉积物中 PAHs 浓度与 TOC 含量成正相关关系,同时指出 TOC 是沉积物对 PAHs 吸附能力的控制因子^[20,21]。如图 2 所示,天目湖表层沉积物中 TOC 与 16 种 PAHs 总量在 $P=0.01$ 置信水平上显著相关($R^2=0.8977$),而梅梁湾表层沉积物 TOC 与 16 种 PAHs 总量相关性不明显($R^2=0.3498$)。可见水体沉积物中 TOC 与 PAHs 含量显著相关并不具有普遍性,而是受到水动力、污染源等条件的影响^[9]。对天目湖而言,可能是因为污染较轻,湖水深,水动力弱,污染物在有机质颗粒上的吸附容易达到平衡状态。而太湖梅梁湾受污染程度较高,对其表层沉积物中 PAHs 浓度分布起决定的作用可能仅是输入污染物的多少,也有可能 PAHs 和 TOC 来自不同的污染源。

2.3 沉积物中 PAHs 的组分特征和来源分析

16 种优控 PAHs 在天目湖和太湖梅梁湾表层沉积物中均检出,天目湖表层沉积物中菲、荧蒽、苯并[a]荧蒽、芘、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[g,h,i]芘所占比重较大;在太湖梅梁湾表层沉积物中菲、荧蒽、芘、苯并[a]荧蒽、蒽、苯并[a]蒽所占比重较大。这反映出两个不同湖泊 PAHs 来源的差异。按多环芳烃的环数来区分,把 16 种优控 PAHs 分成 3 组:2~3 环、4 环和 5~6 环。天目湖表层沉积物中 3 组 PAHs 占总量的比值依次为 0.19%~0.32%,0.32%~0.44%,0.33%~0.43%;在太湖梅梁湾这 3 组数据依次为 0.28%~0.42%,0.28%~0.46%,0.21%~0.34%。不同环数多环芳烃的相对丰度可以反映来自燃烧或石油污染,通常高分子量的 4 环

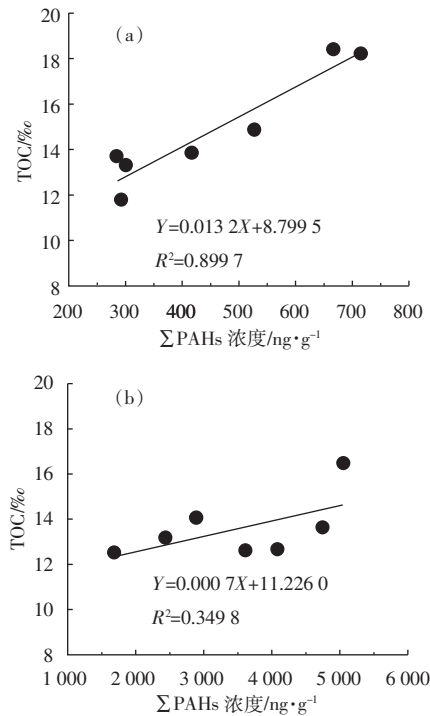


图 2 天目湖(a)和太湖梅梁湾(b)表层沉积物中 16 种 PAHs 含量与 TOC 浓度的相关性

Figure 2 Correlation analysis between total concentrations of 16 PAHs and TOC content in surface sediment samples from Tianmu Lake and Meilian Bay, Taihu Lake

及其以上 PAHs 主要是由于化石燃料高温燃烧,而低分子量(2 环和 3 环)则大多来源于石油污染^[22]。太湖梅梁湾表层沉积物中 2 环+3 环 PAHs 的比例较高,反映石油污染输入的多环芳烃较多,可能与该地区繁忙的水上交通有关。

人为来源的 PAHs 主要包括石油污染来源的 PAHs 和燃烧产生的 PAHs, 在环境中这两类来源的 PAHs 很难完全区分。目前主要是利用特征化合物指数对 PAHs 的两类来源进行判别, 包括荧蒽/芘(Flu/Pyr)、菲/蒽(Phe/Ant)、苯并[a]蒽/蒽(Chr/BaA)、荧蒽/荧蒽+芘(Flu/(Flu+Pyr))、茚并[1,2,3-cd]芘/茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[g,h,i]芘(IP/(IP+BghiP))和 2~3 环和 4 环以上 PAHs 的比值(LMW/HMW)等(见表 3)。通过比较天目湖和太湖梅梁湾表层沉积物特征化合物指数,可以判断两者所受人为来源的 PAHs 污染主要来自燃烧产生,但太湖梅梁湾表层沉积物相关特征化合物指数(如 Chr/BaA)也显示混合污染的特征。

环境中燃烧来源的 PAHs 主要来自于石油及其精炼产品燃烧以及煤、木材等的燃烧,区别不同燃烧来源的 PAHs 也可以通过表 3 中的特征化合物指数

来判别。Yunker 等研究表明 Flu/(Flu+Pyr)和 IP/(IP+BghiP)较好地保存原始信息^[23],根据归纳的结果,Flu/(Flu+Pyr)比值小于 0.4 表示石油污染来源,大于 0.5 则主要是木材、煤燃烧来源,介于 0.4 与 0.5 之间则显示石油类的燃烧来源;IP/(IP+BghiP)比值小于 0.2 显示主要是石油污染来源,大于 0.5 则主要是木材、煤燃烧污染,在此间为石油类燃烧污染。以 Flu/(Flu+Pyr)为横坐标,IP/(IP+BghiP)为纵坐标,做 PAHs 来源判别图(图 3)。天目湖表层沉积物中 Flu/(Flu+Pyr)比值均大于 0.5,仅其中 1 个采样点 IP/(IP+BghiP)比值小于 0.5,显示出木材、煤燃烧是主要来源;而 7 个太湖梅梁湾表层沉积物样品中有 5 个样品 Flu/(Flu+Pyr)比值介于 0.4~0.5,IP/(IP+BghiP)比值位于 0.5 附近,指示出石油燃烧和木柴、煤燃烧混合来源。其中太湖梅梁湾 M7 点样品中 Flu/(Flu+Pyr)比值均小于 0.4,可能指示了石油污染和石油燃烧的混和来源,因为 M7 点位于连接太湖竺山湾和梅梁湾的航道出入口,航道中有众多水上加油站以及船只来往频繁。

表 3 石油污染来源和燃烧来源 PAHs 的特征化合物指数

Table 3 Characteristic values of selected molecular indices for pyrolytic and petrogenic origins of PAHs

特征化合物指数	燃烧来源	石油污染来源	参考文献	本研究	
				天目湖	太湖梅梁湾
Phe/Ant	<10	>15	[24]	2.57~13.37	0.97~6.28
Chr/BaA	<1	>1	[25]	0.50~0.98	0.70~1.05
Flu/(Flu+Pyr)	>0.4	<0.4	[23]	0.52~0.59	0.39~0.51
IP/(IP+BghiP)	>0.2	<0.2	[23]	0.49~0.54	0.48~0.53
LMW/HMW	低	高	[22]	0.23~0.46	0.39~0.74

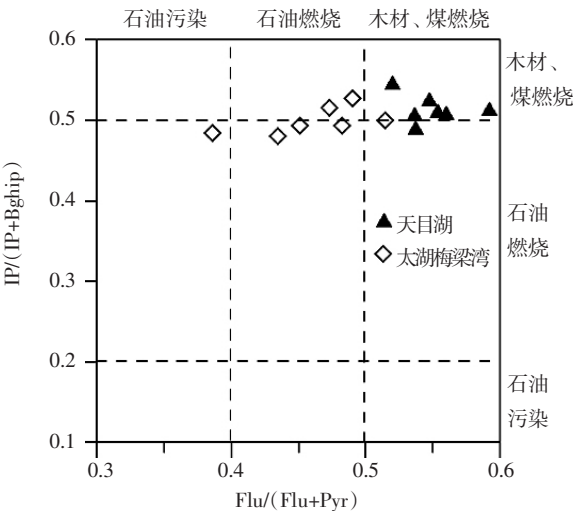


图 3 表层沉积物多环芳烃来源判别

Figure 3 Diagnostic molecular ratios for source identification

- [9] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖 2001—2002 年环境调查及富营养化评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 99–103.
- ZHANG Yun-lin, CHEN Wei-min, YANG Ding-tian, et al. Main physical and chemical factors in Tianmu Lake, with evaluation of eutrophication from 2001 to 2002[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 99–103.
- [10] WANG Xiao-ping, YAO Tan-dong, CONG Zhi-yuan, et al. Concentration level and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and grass around Mt. Qomolangma, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(10): 1405–1413.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Agricultural analysis methods of soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Technology Press, 2000.
- [12] CHEN Yu-yun, ZHU Li-zhong, ZHOU Rong-bing. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water and sediment from Qiantang River, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, (141): 148–155.
- [13] 史双昕, 杨永亮, 石磊. 南四湖表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2005, 20(4): 95–99.
- SHI Shuang-xi, YANG Yong-liang, SHI Lei. The distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the Nansi Lake[J]. *Journal of Qingdao University(E&T)*, 2005, 20(4): 95–99.
- [14] 胡雄星, 周亚康, 韩中豪, 等. 黄浦江表层沉积物中多环芳烃的分布特征及来源[J]. 环境化学, 2005, 24(6): 703–706.
- HU Xiong-xing, ZHOU Ya-kang, HAN Zhong-hao, et al. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment of Huangpu River[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(6): 703–706.
- [15] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究—多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 192–197.
- MAI Bi-xian, LIN Zheng, ZHANG Gan, et al. Organic contaminants in surface sediments from rivers of the Pearl River delta and estuary—the distributions and characteristics of PAHs and organochlorine pesticides[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(2): 192–197.
- [16] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 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, 2005, 26(4): 129–134.
- LUO Xiao-jun, CHEN She-jun, MAI Bi-xian, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from rivers of Pearl River delta and its nearby South China Sea[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 129–134.
- [17] 杨敏, 倪余文, 苏凡, 等. 辽河沉积物中多环芳烃的污染水平与特征[J]. 环境化学, 2007, 26(2): 217–220.
- YANG Min, NI Yu-wen, SU Fan, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Liaohe River, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(2): 217–220.
- [18] Hong H, Xu L, Zhang L, et al. Environmental fate and chemistry of organic pollutions in the sediments of Xiamen and Victoria Harbours[J]. *Marine pollution bulletin*, 1995, (31): 229–236.
- [19] Simpson C D, Mosi A A, Cullen W R, et al. Composition and distribution of polycyclic in surficial marine sediments from Kitimat Harbour, Canada[J]. *Science of The Total Environment*, 1996, (181): 265–278.
- [20] Karickhoff S W, Brown D S, Scott T A. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments[J]. *Water Research*, 1979, (13): 241–248.
- [21] WANG Xu-chen, ZHANG Yi-xian, CHEN Robert F. Distribution and partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different size fractions in sediments from Boston Harbor, United States[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, (42): 1139–1149.
- [22] Fernandks M B, Sicre M A, Boireau A, et al. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38(1): 7–15.
- [23] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, (33): 489–515.
- [24] Baumard P, Budzinski H, Michon Q, et al. Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean Sea from mussel and sediment records[J]. *Estuar Coast Shelf Science*, 1998, (47): 77–90.
- [25] Soclo 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]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, (40): 387–396.
- [26] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, (19): 81–97.
- [27] 袁旭音, 李阿梅, 王禹, 等. 太湖表层沉积物中的多环芳烃及其毒性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 607–610.
- YUAN Xu-yin, LI A-mei, WANG Yu, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Taihu Lake and their toxicity evaluation[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2004, 32(6): 607–610.

致谢: 中国科学院青藏高原研究所徐柏青研究员、王小萍副研究员在实验过程给予了大量的帮助和指导, 在此表示感谢!