

# 中国东部海区柱状沉积物多环芳烃 埋藏通量和埋藏效率研究

林 田<sup>1\*</sup>, 郭志刚<sup>2</sup>, 胡利民<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200433; 3. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘 要:** 沉积物是多环芳烃(PAHs)重要的蓄积库。围绕渤海、黄海和东海陆架泥质区柱状沉积物中多环芳烃的研究发现: 由于多环芳烃含量和沉积物干样密度在不同海区沉积物中的差异较小, 因此, 沉积速率是决定其埋藏通量的重要因素。本研究中提出的基于过剩<sup>210</sup>Pb埋藏效率指数, 可以较大程度上实现不同区域多环芳烃污染水平的横向对比。与埋藏通量比较, 埋藏效率指数可以更客观地反映研究区域中多环芳烃污染输入强度和沉积物吸附能力等共同作用。

**关键词:** 多环芳烃; 过剩<sup>210</sup>Pb; 沉积柱; 埋藏通量; 东部海区

中图分类号: P593; P736.2 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2016)04-0419-06

## Study on burial fluxes and burial rates of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the East China sea area

LIN Tian<sup>1\*</sup>, GUO Zhi-gang<sup>2</sup> and HU Li-min<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;  
2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;  
3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

**Abstract:** Sediments often serve as a major sink for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). This study measured the concentrations and fluxes of PAHs in sediment cores in the East China sea area (including the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea). Differences in the PAH concentrations and sediment dry density were small among the collected marine sediment samples on a larger spatial scale. The results showed that the deposition rate was an important factor for burial flux. In this study, the burial rates of sedimentary PAHs based on <sup>210</sup>Pb excess were proposed to evaluate the spatial differences of sedimentary PAHs, which expected to exclude the interference from different deposition rates. Compared with the burial flux, the index of burial rate could be more objective to reflect the input intensity of PAHs and the adsorption capacity of sediments.

**Key words:** PAHs; <sup>210</sup>Pb excess; sediment core; burial rate; East China sea area

## 0 引 言

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons,

PAHs)是煤、石油、木材、烟草、有机高分子化合物等有机物不完全燃烧时产生的挥发性碳氢化合物, 是重要的环境污染物。鉴于多环芳烃对环境和人类的影响, 已被世界各国列为重要监测和研究对象。

收稿日期(Received): 2015-11-06; 改回日期(Revised): 2015-12-15; 接受日期(Accepted): 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41103046); “全球变化与海气相互作用”专项国际合作项目(GASI-GEOGE-03); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201205001)

作者简介: 林田(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事环境地球化学研究。

\* 通讯作者(Corresponding author): LIN Tian, E-mail: lintian@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-85895239

LIN Tian et al.: Burial fluxes and burial rates of PAHs in sediments from the East China sea area

美国环保署公布的 129 种优先污染物中,多环芳烃占到 16 种。1990 年我国提出的 68 种优先控制污染物中,多环芳烃类化合物就有 7 种<sup>[1]</sup>。

中国是全球多环芳烃排放的重要来源,按照 2004 年的统计结果,中国共排放 2.53 万 t 美国环保署优先控制的 16 种多环芳烃,其排放量占到全球总量的 22%<sup>[2]</sup>。陆源排放的多环芳烃可以通过径流搬运和大气长距离迁移离开污染源区,进入水体后由于其低溶解性和疏水性,会强烈地分配到非水相,尤其是吸附于颗粒物上。因此,中国东部海区沉积物被认为是我国陆源输出多环芳烃重要的存储地<sup>[3-4]</sup>。海洋沉积物蕴含着许多地质和环境信息,是地球化学研究和进行环境评价的基础资料之一。多环芳烃具有强疏水性、强吸附性和难降解性,随沉积物迁移和沉淀过程中,其含量和组成会保持相对稳定。一方面,分析海洋沉积物中多环芳烃含量和组成特征,可以揭示其污染来源;但另一方面,在大空间尺度下(近岸和远岸)海洋沉积物中多环芳烃含量并没有显著差异,基于含量结果来评估沉积物中多环芳烃的富集或扩散效应具有一定局限性。

因此,本论文围绕渤海、黄海和东海陆架泥质区柱状沉积物开展区域多环芳烃埋藏通量研究,结合本海区特有的沉积环境特征和污染物来源,弥补以往研究主要集中在含量结果这一不足。研究结果有助于提升陆源输出多环芳烃在河口与邻近海域空间分布和归宿的认识。

## 1 材料与方法

### 1.1 沉积样品采集

2003 年 6 月和 9 月,由中国海洋大学“东方红 2 号”执行的“长江口-近海陆海相互作用及其环境效应综合调查”航次,利用重力式采样器获得位于济州岛西南泥质区中部的柱状岩芯 DM1,利用重力采样器获得闽浙沿岸泥质区 2 个柱状岩芯 N6 和 S5。

2006 年 8 月,由“科研渔 59 号”在渤海中部泥质区调查期间,利用重力采样器获得了 2 个柱状岩芯 BC1 和 BC2。黄海中部泥质区的柱状岩芯 SY1 由“东方红 2 号”于 2007 年 11 月在黄海调查时,利用箱式采样器取得。采样站位信息见表 1。由于采样位置均位于动力环境较弱的泥质区内,故样品多以粉砂质黏土为主。沉积柱样品采集后,在实验室内用干净的不锈钢刀以 1 cm 或 2 cm 间隔进行分样,分割后的样品采用铝箔纸进行无污染包装,零下 20℃ 冷藏保存至分析。

### 1.2 沉积物样品定年和容重

采用 <sup>210</sup>Pb 放射性核素方法对沉积物样品定年,获得的沉积速率结果见表 2。相关的测定分别在中国科学院广州地球化学研究所和中国科学院南京地理与湖泊研究所完成。具体操作步骤参见文献<sup>[5-6]</sup>。

沉积物容重(干样密度)的测定采用环刀法。将环刀切割的样品一并放入鼓风干燥箱内(105~110℃)烘烤 48 h,取出后放入干燥器中冷却至室温,称质量。

### 1.3 沉积物样品中多环芳烃测定

沉积物样品中多环芳烃的定性和定量方法参阅文献<sup>[5-7]</sup>。实验过程中通过监测目标化合物的回收率对整个实验进行质量保证和质量控制;同时在每批次样品(10~15 个)分析中增加 1 个方法空白和 1 个样品平行样。所有检测结果均满足实验质量要求<sup>[5-7]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物中多环芳烃含量水平和组成特征

表层 3 cm 沉积物中,16 种美国环保署优控多环芳烃含量分别为:渤海中部泥质区 111~202 ng/g;南黄海泥质区 175~227 ng/g;济州岛西南泥质区 117~133 ng/g;闽浙沿岸泥质区 116~235 ng/g。比较

表 1 中国东部海区沉积柱采样站位信息

Table 1 Information on the sampling stations in the East China sea area

采样点	BC1	BC2	SY1	DM1	N6	S5
采样时间	2006	2006	2007	2003	2003	2003
经度	118°37'E	119°16'E	122°30'E	125°45'E	122°45'E	122°30'E
纬度	38°35'N	38°35'N	34°59'N	31°45'N	30°30'N	29°00'N
水深 (m)	20	27	65	63	55	50
采样方式	重力	重力	箱式	重力	重力	重力

表 2 中国东部海区沉积柱多环芳烃含量( $\text{ng/g}$ )、多环芳烃埋藏通量( $\text{ng}/\text{cm}^2\cdot[\sim 50 \text{ a}]$ )、过剩  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  埋藏通量( $\text{mBq}/\text{cm}^2\cdot[\sim 50 \text{ a}]$ )和埋藏效率( $\text{ng}/\text{mBq}$ )

Table 2 The concentrations of PAHs, burial fluxes of PAHs and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , and burial rate of PAHs based on  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  in the sediment cores collected from the East China sea area

样号	BC1	BC2	SY1	DM1	N6	S5
表层多环芳烃含量						
最低值	111	113	175	117		222
最高值	202	178	227	133	116	235
多环芳烃含量 <sup>(1)</sup>						
最低值	42	64	77	73	33	84
最高值	202	178	227	133	120	235
沉积速率( $\text{cm}/\text{a}$ )	0.29	0.47	0.65	0.31	3.38	0.98
[ $\sim 50\text{a}$ ]沉积深度( $\text{cm}$ )	15	24	32	16	169	49
多环芳烃埋藏通量( $\text{ng}/\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}]$ )	1380	2850	2500	1300	10500	7330
$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 埋藏通量( $\text{mBq}/\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}]$ )	1480	3320	3100	2000	9840	5240
埋藏效率( $\text{ng}/\text{mBq}$ )	0.93	0.86	0.80	0.74	1.07	1.40

注: (1) 1950 年以来多环芳烃含量。

不同泥质区表层沉积物中多环芳烃含量, 结果表明, 济州岛西南泥质区多环芳烃含量水平略低, 其他近岸泥质区含量水平基本相当。尽管闽浙沿岸泥质区沉积速率显著高于其他泥质区, 但是大量河流(主要是长江)泥沙输入并未对多环芳烃含量有稀释作用, 表明长江泥沙本身就是沉积物中多环芳烃的主要来源。

多环芳烃按照环数可以分为 2~3 环, 4 环和 5~6 环。不同成因的多环芳烃具有结构和组分的差异。一般认为, 低分子量(2~3 环)的多环芳烃主要来源于石油类污染; 4 环及其以上的多环芳烃主要是高温不完全燃烧生成<sup>[8]</sup>。在渤海中部泥质区表层沉积物样品中, 主要以 2~3 环多环芳烃为主, 占总多环芳烃的 50%~96%; 与此形成鲜明对比的是, 其他泥质区表层沉积物样品中, 2~3 环多环芳烃只占总多环芳烃的比例低于 40%。渤海海域内高含量的 2~3 环多环芳烃(尤其是菲)可能来自石油源污染, 这可能与船只油料泄漏、近岸石油工业污水排放以及海上油井溢油有关<sup>[9]</sup>。

## 2.2 沉积物中多环芳烃埋藏通量的估算

多环芳烃的埋藏通量可用单个样品中多环芳烃的含量与沉积速率和干样密度的乘积求得。可以用下列公式进行计算:

$$\text{BF}_{\text{PAHs}} = C \times S \times \rho_d$$

式中:  $\text{BF}_{\text{PAHs}}$  表示沉积物中多环芳烃埋藏通量( $\text{ng}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$ );  $C$  是沉积物中多环芳烃含量( $\text{ng}/\text{g}$ );  $S$  为沉积物埋藏速率( $\text{cm}/\text{a}$ );  $\rho_d$  是干样密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

表 2 列出不同站点从 1950 年以来约 50 年的埋藏通量结果(用 [ $\sim 50\text{a}$ ] 表示)。从表 2 可以看出, 不同海区沉积物多环芳烃的埋藏通量差距甚大, 说明埋藏通量在

各种因素的综合作用下具有明显的区域性: 位于长江口泥质区的 N6 站埋藏通量高达  $10500 \text{ ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ , 而济州岛西南泥质区的 DM1 站的计算值仅为  $1300 \text{ ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ , 两者相差 8 倍。本研究结果显示多环芳烃埋藏通量和沉积速率之间有较高的相关性(图 1)。由于多环芳烃含量和沉积物干样密度在不同海区沉积物中差异较小, 因此, 沉积速率是决定埋藏通量的重要因素。

## 2.3 浅谈沉积物中多环芳烃埋藏效率

由于水环境中多环芳烃主要吸附于悬浮颗粒物中, 沉积物是它主要的环境归宿, 尤其是在河口或邻近海域, 沉积物沉积速率空间变化显著, 往往成为影响多环芳烃埋藏通量空间变化的主要因素。如何能够剔除沉积速率的影响, 使得埋藏通量空间变化结果可以更加客观地评估沉积物中多环芳烃的富集或扩散效应?

水体沉积物中蓄积的  $^{210}\text{Pb}$  有 2 个来源: 一是沉积物中所蓄积的 Ra 衰变生成的  $^{210}\text{Pb}$ , 即与 Ra 平衡的  $^{210}\text{Pb}$ , 常称作补偿  $^{210}\text{Pb}$ ; 另一部分是地表  $^{238}\text{U}$  放射性衰变子体  $^{222}\text{Rn}$  逸散到大气后衰变产生的随降水或干沉降形式沉降的  $^{210}\text{Pb}$ , 这部分  $^{210}\text{Pb}$  被称作过剩  $^{210}\text{Pb}$ 。过剩  $^{210}\text{Pb}$  不仅是沉积物年龄测定的重要手段, 而且是环境示踪的一种主要方法<sup>[10]</sup>。开放海域沉积物所接受的过剩  $^{210}\text{Pb}$  沉积除大气直接沉降来源外, 还包括通过大气沉降于陆地表面后经过河流、风沙等侵蚀搬运输入。本研究中, 沉积速率是决定过剩  $^{210}\text{Pb}$  埋藏通量的重要因素。这一现象可以从不同区域沉积速率和过剩  $^{210}\text{Pb}$  埋藏通量的相关性就可以看出, 两者的对数相关性为  $R^2 = 0.97$ (图 1)。

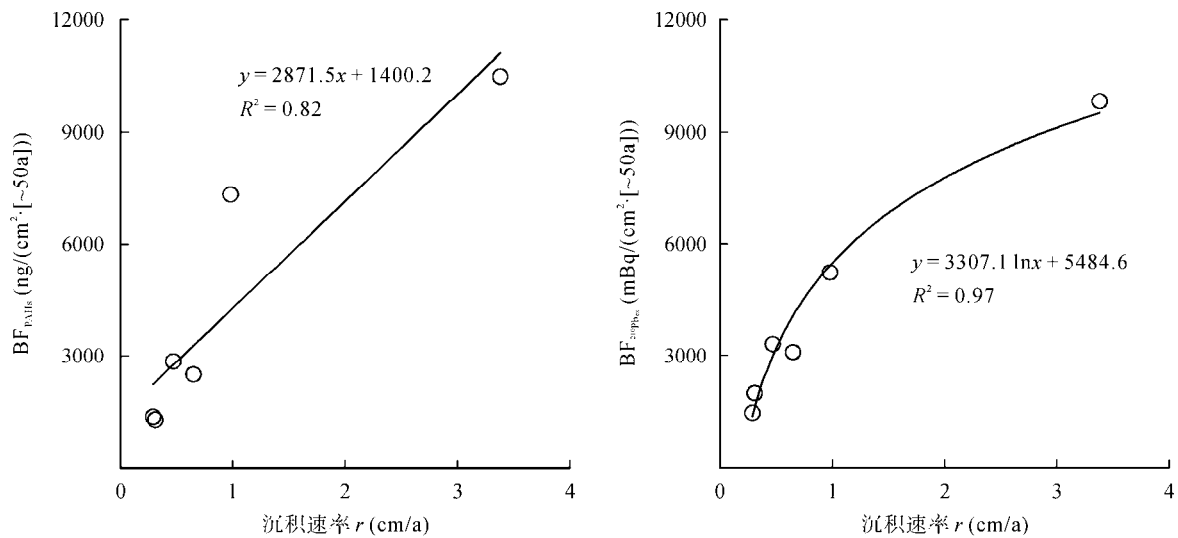


图1 本研究中多环芳烃埋藏通量、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 埋藏通量与沉积速率的相关性

Fig.1 The correlations between sedimentary rate and burial fluxes of PAHs and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  in this study

因此,多环芳烃埋藏通量除以过剩 $^{210}\text{Pb}$ 埋藏通量后,不同海区的数据就可以直观地对比。

$$f_{\text{PAHs}} = \text{BF}_{\text{PAHs}} / \text{BF}_{^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}}$$

式中:  $f_{\text{PAHs}}$  为多环芳烃相对埋藏效率( $\text{ng}/\text{mBq}$ );  $\text{BF}_{^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}}$  表示沉积物中过剩 $^{210}\text{Pb}$ 的埋藏通量( $\text{mBq}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ),基于实际情况的考虑,本研究中计算的埋藏通量时间区间在50a左右(1950年后)。 $f_{\text{PAHs}}$ 计算结果显示,(1)从渤海中部泥质区(0.86~0.93),到北黄海泥质区(0.80),再到济州岛西南泥质区(0.74),埋藏效率从近岸向外海逐渐降低,说明埋藏效率与陆源输入有着必然联系,这其中低环数多环芳烃的来源贡献减小是重要原因;(2)闽浙沿岸泥质区内,靠近长江口的N6站埋藏效率(1.07)低于S5站(1.40),尽管N6站更靠近区域内多环芳烃的污染源(长江泥沙搬运贡献),但是由于长江泥沙向南再搬运过程的分选,造成S5站细颗粒物和总有机碳含量较高,对多环芳烃的富集能力更强,因此在长江泥沙向南再搬运过程中,沉积物中多环芳烃是富集而非扩散,这与之前的研究结果是一致的<sup>[4]</sup>。本研究中提出的基于过剩 $^{210}\text{Pb}$ 的相对埋藏效率,其主要受控于污染源的输入强度和沉积物的吸附能力共同作用。

目前,已开展了大量的针对实际污染环境中多环芳烃环境归宿的研究工作,如吴启航等<sup>[11]</sup>对珠江广州河段重污染沉积物的研究揭示,轻组分中的有机质对多环芳烃的富集能力比重组分中的无定型有机质高1~2个数量级,轻组分有机质中焦碳和碳黑

的富集能力较高,而植物碎屑的富集能力较低。冯精兰等<sup>[12]</sup>的研究表明,长江武汉段沉积物中粒径小于 $25\ \mu\text{m}$ 组分占38.6%的质量分数,其富集了沉积物中约75%的多环芳烃;翟梦晓<sup>[13]</sup>对黄河河南段表层沉积物的分析结果显示,最小3个粒径颗粒物富集的多环芳烃的质量百分比高于该粒径所占的质量百分比,且随着粒径减小,多环芳烃富集程度越高。然而,由于沉积物并不均一,沉积物来源尤其是沉积动力环境的显著差异,实验室模拟条件下或典型区域环境中得到的一些观测结果难以有效地解释更大区域尺度上多环芳烃的空间分布和归宿特征。因此,只能实现研究小区域范围内横向比较,在大尺度区域内其可比性较差。沉积物中有机质含量对沉积物吸附多环芳烃有重要影响,基于有机碳埋藏通量的多环芳烃埋藏效率指数可以实现单一沉积柱中多环芳烃污染水平的纵向比较,然而不同区域有机质来源差异较大,其横向比较往往存在较大不确定性。过剩 $^{210}\text{Pb}$ 在水体环境中来源单一,又主要吸附在颗粒物中,因此可以作为一个重要的标准参照物。本研究中提出的基于过剩 $^{210}\text{Pb}$ 的多环芳烃埋藏效率指数,可以较大程度上实现大区域尺度上的空间对比。同时,表3给出我国境内一些湖泊和河口环境中沉积物的埋藏通量和埋藏效率,如辽宁大伙房水库埋藏效率为3.36,太湖梅梁湾埋藏效率为3.85,太湖胥口湾为2.91,这些高埋藏效率表明其环境受到高强度的污染输入。这些湖泊位于城市周边,靠近污染源,因此,以上结果与实际情况是吻合的。

表3 中国境内不同水环境下沉积物中多环芳烃埋藏通量( $\text{ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ )、过剩 $^{210}\text{Pb}$ 埋藏通量( $\text{mBq}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ )和埋藏效率( $\text{ng}/\text{mBq}$ )对比

Table 3 The comparison of burial fluxes of PAHs ( $\text{ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ ) and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $\text{mBq}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ ), and burial rate ( $\text{ng}/\text{mBq}$ ) of PAHs based on  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  in the sediment cores collected from different water environments in China

研究区域	多环芳烃埋藏通量	过剩 $^{210}\text{Pb}$ 埋藏通量	埋藏效率	参考文献
辽宁大伙房水库	19350	5730	3.38	Lin <i>et al.</i> [14]
太湖梅梁湾	5500	1430 <sup>(1)</sup>	3.85	刘国卿等[15]
太湖胥口湾	3500	1200 <sup>(1)</sup>	2.91	刘国卿等[15]
南岭山地湖泊	7000	3850 <sup>(1)</sup>	1.81	刘国卿等[16]
珠江口	3000	2480 <sup>(1)</sup>	1.21	Liu <i>et al.</i> [17]
大亚湾	5600	2540 <sup>(1)</sup>	2.20	池继松等[18]

注: (1) 过剩 $^{210}\text{Pb}$ 埋藏通量根据文献中给出的过剩 $^{210}\text{Pb}$ 和深度关系曲线估算, 且假设容重 $1\text{ ng}/\text{cm}^3$ 。

此外, 如近岸河口海湾则属于中等污染区域, 埋藏效率指数如大亚湾为2.2。上述结果表明不同水环境下该指标具有很好的可行性。

### 3 结论

中国东部内陆架泥质区是现代沉积的“汇”, 其中黏土组分是泥质区沉积物的重要组成部分, 对多环芳烃具有较强的吸附能力, 因此, 泥质区成为陆源多环芳烃的重要蓄积库。埋藏通量结果显示: 不同海区沉积物多环芳烃的埋藏通量差距甚大, 位于长江口泥质区的N6站埋藏通量高达 $10500\text{ ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ , 济州岛西南泥质区的DM1站的计算值仅为 $1300\text{ ng}/(\text{cm}^2\cdot[\sim 50\text{a}])$ , 两者相差8倍, 且沉积速率是决定埋藏通量的重要因素。本研究中提出的基于过剩 $^{210}\text{Pb}$ 埋藏效率指数能够剔除沉积速率的影响, 更客观地反映研究区域污染输入强度和沉积物吸附能力等因素作用。不仅如此, 在不同水环境下该指标具有很好的可行性。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵文昌, 程金平, 谢海赞, 马英歌, 王文华. 环境中多环芳烃(PAHs)的来源与监测分析方法[J]. 环境科学技术, 2006, 29(3): 105–107.  
Zhao Wen-chang, Cheng Jin-ping, Xie Hai-yun, Ma Ying-ge, Wang Wen-hua. PAHs: Sources, pathway and their monitoring and analysis [J]. Environ Sci Technol, 2006, 29(3): 105–107 (in Chinese with English abstract).
- [2] Lang C, Tao S, Liu W, Zhang Y, Simonich S. Atmospheric transport and outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons from China [J]. Environ Sci Technol, 2008, 42(14): 5196–5201.
- [3] Lin T, Hu L M, Guo Z G, Qin Y W, Yang Z S, Zhang G, Zheng M. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to sediments of the Bohai and Yellow Seas in East Asia [J/OL]. J Geophys Res Atmos, 2011, 116(D23): D23305. DOI: 10.1029/2011JD015722
- [4] Lin T, Hu L M, Guo Z G, Zhang G, Yang Z S. Deposition fluxes and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River estuarine-inner shelf in the East China Sea [J]. Glob Biogeochem Cycl, 2013, 27(1): 77–87.
- [5] Guo Z G, Lin T, Zhang G, Yang Z S, Fang M. High-resolution depositional records of polycyclic aromatic hydrocarbons in the central continental shelf mud of the East China Sea [J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(17): 5304–5311.
- [6] Guo Z G, Lin T, Zhang G, Zheng M, Zhang Z Y, Hao Y C, Fang M. The sedimentary fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River Estuary coastal sea for the past century [J]. Sci Total Environ, 2007, 386(1/3): 33–41.
- [7] 胡利民. 大河控制性影响下的陆架海沉积有机质的“源—汇”作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Hu Li-min. Source and sinks of sedimentary organic matter in the river-dominated continental shelves: A case study in the Bohai and Yellow Seas [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [8] Mai B X, Qi S H, Zeng Y P, Yang Q S, Zhang G, Fu J M, Sheng G Y, Peng P A, Wang Z S. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: Assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(21): 4855–4863.
- [9] Qin Y W, Zheng B H, Lei K, Lin T, Hu L M, Guo Z G. Distribution and mass inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the south Bohai Sea, China [J]. Mar Pollut Bull, 2011, 62(2): 371–376.
- [10] 李军, 胡邦琦, 窦衍光, 赵京涛, 李国月. 中国东部海域泥质沉积区现代沉积速率及其物源控制效应初探 [J]. 地质评论, 2012, 58(4): 745–756.  
Li Jun, Hu Bang-qi, Dou Yan-guang, Zhao Jing-tao, Li Guo-yue. Modern sedimentation rate, budget and supply of the muddy deposits in the East China Seas [J]. Geol Rev, 2012, 58(4): 745–756 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吴启航, 麦碧娴, 杨清书, 彭平安, 傅家谟. 珠江广州河段重污染沉积物中多环芳烃赋存状态初步研究[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 37–45.  
Wu Qi-hang, Mai Bi-xian, Yang Qing-shu, Peng Ping-an, Fu

- Jia-mo. Particle-scale distribution of polycyclic hydrocarbons in highly contaminated sediments of the Guangzhou Channel of the Pearl River [J]. *Geochimica*, 2004, 33(1): 37–45 (in Chinese with English abstract).
- [12] 冯精兰, 牛军峰. 长江武汉段不同粒径沉积物中多环芳烃 (PAHs)分布特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1573–1577.  
Feng Jing-lan, Niu Jun-feng. Study on the grain-size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Yangtze River sediment [J]. *Environ Sci*, 2007, 28(7): 1573–1577 (in Chinese with English abstract).
- [13] 翟梦晓. 黄淮水系河南段表层沉积物中多环芳烃的赋存特征及来源解析[D]. 河南: 河南师范大学, 2011.  
Zhai Meng-xiao. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment from Henan Reach of Huaihe, Huanghe water, East China [D]. Henan: Henan Normal University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [14] Lin T, Qin Y W, Zheng B H, Li Y Y, Zhang L, Guo Z G. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a reservoir in Northeast China [J]. *Environ Pollut*, 2012, 163: 256–260.
- [15] 刘国卿, 张干, 金章东, 李向东. 太湖多环芳烃的历史沉积记录[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 981–986.  
Liu Guo-qing, Zhang Gan, Jin Zhang-dong, Li Xiang-dong. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Taihu Lake [J]. *Acta Sci Circum*, 2006, 26(6): 981–986 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘国卿, 彭先芝, 张干, 祁士华, 邹世春, 李向东. 南岭山地湖泊多环芳烃的大气沉降历史记录[J]. *地球化学*, 2007, 36(4): 357–362.  
Liu Guo-qing, Peng Xian-zhi, Zhang Gan, Qi Shi-hua, Zou Shi-chun, Li Xiang-dong. Sedimentary records of atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in a reservoir in Nanling Mountains, South China [J]. *Geochimica*, 2007, 36(4): 357–362 (in Chinese with English abstract).
- [17] Liu G Q, Zhang G, Li X D, Li J, Peng X Z, Qi S H. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from the Pearl River Estuary, South China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2005, 51(8/12): 912–921.
- [18] 池继松, 颜文, 张干, 郭玲利, 刘国卿, 刘向, 邹世春. 大亚湾海域多环芳烃和有机氯农药的高分辨率沉积记录[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(6): 44–52.  
Chi Ji-song, Yan Wen, Zhang Gan, Guo Ling-li, Liu Guo-qing, Liu Xiang, Zou Shi-chun. High-resolution sedimentary record of PAHs and OCPs in Daya Bay, China [J]. *J Trop Oceanogr*, 2005, 24(6): 44–52 (in Chinese with English abstract).