

# 成渝经济区河流表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价

汤智<sup>1,2</sup>, 廖海清<sup>2</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 郭建阳<sup>3</sup>, 吴丰昌<sup>2\*</sup>, 郭飞<sup>2</sup>, 周北海<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学环境工程系, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 3. 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, 贵阳 550002)

摘要: 采用 GC-MS 分析了成渝经济区内六大水系(长江、岷江、沱江、涪江、渠江以及嘉陵江)中 19 个表层沉积物样品的 16 种美国 EPA 优先控制多环芳烃( $\sum$  PAHs)。结果表明,  $\sum$  PAHs 的含量范围为 48.2 ~ 723.1 ng/g(平均 276.1 ng/g), 最高值在长江流域石门子采样点, 最低值在涪江流域百倾采样点。各流域表层沉积物中  $\sum$  PAH<sub>16</sub> 含量总体趋势为: 长江(358.6 ng/g) > 岷江(322.2 ng/g) > 沱江(292.7 ng/g) > 渠江(260.6 ng/g) > 嘉陵江(240.2 ng/g) > 涪江(82.4 ng/g)。沉积物中 PAHs 组成为: 2 ~ 3 环占 15.1% ~ 52.3%、4 环占 24.4% ~ 44.5%、5 ~ 6 环占 3.3% ~ 56.9%。采用分子比值法  $c_{An}/c_{(An + Phe)}$ 、 $c_{FIA}/c_{(FIA + Pyr)}$  以及  $c_{InP}/c_{(InP + BghiP)}$  分析污染来源, 表明各流域表层沉积物中 PAHs 主要源于草、木和煤的燃烧及石化产品的燃烧。采用表观效应阈值法进行生态风险评价, 表明表层沉积物中的 PAHs 对生态环境的影响目前还处于较低风险水平。

关键词: 成渝经济区; 多环芳烃; 沉积物; 来源; 风险评价

中图分类号: X131; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2639-06

## Distribution, Source and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in River Sediment of Cheng-Yu Economic Zone

TANG Zhi<sup>1,2</sup>, LIAO Hai-qing<sup>2</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, GUO Jian-yang<sup>3</sup>, WU Feng-chang<sup>2</sup>, GUO Fei<sup>2</sup>, ZHOU Bei-hai<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The USEPA 16 priority pollutant dominated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface river sediments of Sichuan Province and Chongqing City in southwest China were determined using GC-MS. The result showed the content of PAHs in the sediment ranged from 48.2 ng/g to 723.1 ng/g, with an average value of 276.1 ng/g. Among which, the maximum content was found in Shimenzi of Yangtze River, the minimum content was found in Baiqing of Fujiang River. The content order of PAHs in the sediments followed Yangtze River(358.6 ng/g) > Minjiang River (322.2 ng/g) > Tuojiang River (292.7 ng/g) > Qujiang River (260.6 ng/g) > Jialing River (240.2 ng/g) > Fujiang River(82.4 ng/g). The vertical profiles of  $c_{An}/c_{(An + Phe)}$ ,  $c_{FIA}/c_{(FIA + Pyr)}$  and  $c_{InP}/c_{(InP + BghiP)}$  suggested the PAHs in this zone were mainly originated from pyrogenic source, the main sources of PAHs were petroleum combustion, biomass combustion, and coal burning. Risk assessment suggested that the PAHs in the sediment of this zone had no significantly biological impairment and low toxicological risk.

**Key words:** Cheng-Yu Economic Zone; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); sediment; source; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类广泛分布于自然界的难降解有机污染物, 主要来源是煤、石油和木柴的不完全燃烧, 以及石化燃料生产和使用过程中的泄漏。近年来, PAHs 在环境中的污染状况和生态风险得到了越来越广泛的关注。美国联邦环境保护局已将 16 种危害较大的 PAHs 列为水生生态系统优先控制污染物<sup>[1]</sup>。研究表明<sup>[2-4]</sup>, 沉积物中的 PAHs 可以通过物理化学或生物的过程重新进入水体, 与水体中的可溶性有机质相互作用, 提高了 PAHs 在水中的溶解度, 增加了

其在水环境中的迁移能力。所以, 沉积物是水生生态系统中 PAHs 的二次污染源。

近年来, 国内以 PAHs 为代表的持久性有机污染物的环境安全评价主要集中于东部沿海区域, 如江苏太湖、河北白洋淀等湖泊<sup>[5-8]</sup>, 以及珠江三角洲地

收稿日期: 2010-10-03; 修订日期: 2011-01-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (973) 项目 (2008CB418200)

作者简介: 汤智 (1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染修复与治理, E-mail: tzwork@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: wufengchang@vip.skgf.cn

区、长江三角洲地区和滦河等流域<sup>[9-13]</sup>. 西部地区环境介质中 PAHs 的研究相对较少, 仅在长江和黄河上游的部分地区开展了少量研究工作<sup>[14-17]</sup>. 此外, 以上工作多以河流水体中 PAHs 的局域分布特征为主, 没有系统地阐述整个流域的环境污染水平.

成渝经济区以成都和重庆 2 个城市为两极, 涵盖了四川、重庆两省市 40% 的面积及 2/3 的人口<sup>[18]</sup>. 贯穿于成渝经济区的长江上游、长江一级支流岷江、沱江和嘉陵江、二级支流渠江和涪江, 是三峡水库的集水流域, 成渝经济区内污染物的汇集将直接影响三峡水库的水质. 已有研究表明<sup>[19,20]</sup>, 三峡水库的建设使长江上游河流径流量有减小的趋势, 输沙量明显减少, 造成流域内各河流沉积物堆积速率增高, 导致 PAHs 在沉积物中积蓄量增加, 进一步增加了 PAHs 的污染水平和潜在危害.

因此, 本研究选区长江三峡大坝上游的成渝经济区为调查区域, 对区域内长江干流及其主要支流表层沉积物中 PAHs 的分布、来源和生态风险进行系统分析, 以期对该区域及三峡库区的 PAHs 污染物的评价和管理提供理论基础和科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2009 年 10 月, 采用抓斗式采样器在成渝经济区选取国控和省控断面, 采集 19 个表层 (0 ~ 5 cm) 沉积物样品, 涵盖长江流域 6 个采样点 (石门子、井口、朱坨、鱼嘴、涪陵清溪场、万州筛网坝); 岷江流域 3 个采样点 (彭山岷江大桥、黑龙滩水库、凉姜沟); 沱江流域 3 个采样点 (河东元坝、龙门镇、泸州); 涪江流域 3 个采样点 (江油、百倾、太合); 渠江流域 2 个采样点 (广安、官渡) 以及嘉陵江流域 2 个采样点 (阆中、北温泉), 采样布点见图 1. 样品采集后, 装入密封袋, 并置于装有冰袋的保温箱运回实验室分析.

### 1.2 样品预处理

样品采集后, 冷冻干燥, 研磨过 80 目筛, 装于密封袋中 4℃ 保存备用. 准确称取 15 ~ 20 g 样品, 加入回收率指示物标样, 用 200 mL 正己烷和丙酮的混合溶剂 (体积比为 1:1) 索氏抽提 48 h, 并加入新鲜铜片去除沉积物中硫的影响. 提取液浓缩并置换为正己烷后, 用氧化铝-硅胶复合层析柱 (12 cm:6 cm) 进行分离纯化. 层析柱分别用 15 mL 正己烷和 70 mL 二氯甲烷-正己烷混合溶剂 (体积比为 3:7) 淋洗烷烃和 PAHs 组分. 收集 PAHs 组分并浓缩至 200

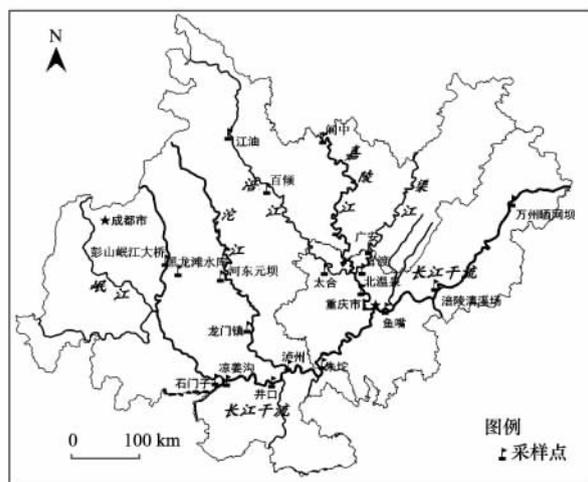


图 1 采样布点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

$\mu\text{L}$ , 加入内标, 利用 GC-MS 方法, 采用内标法和多点校正曲线进行 PAHs 的定量分析<sup>[21]</sup>.

### 1.3 仪器分析

PAHs 分析采用美国 HP Agilent 6890-5973 GC-MSD 进行测定. 色谱柱为 DB-ms (60 m  $\times$  250  $\mu\text{m}$   $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ) 色谱柱. 先升温程序: 80℃ 保持 1 min, 后以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 180℃, 接着以 2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 220℃, 再以 8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 290℃, 保持 30 min; 进样口温度 280℃; 载气为高纯氮气, 流量为 1.5 mL/min; 采用分流进样, 分流比为 4:5, 进样量 1  $\mu\text{L}$ .

### 1.4 质量保证和质量控制

所有分析样品均添加回收率指示物标样 (萘- $d_8$ 、芘- $d_{10}$ 、菲- $d_{10}$ 、蒽- $d_{12}$ 、茈- $d_{12}$ ), 同时做空白样、平行样和加标空白样, 以控制操作流程的回收率<sup>[22]</sup>. PAHs 指示物标样的回收率分别为萘- $d_8$  65.8%  $\pm$  15.5%、芘- $d_{10}$  80.4%  $\pm$  11.5%、菲- $d_{10}$  94.1%  $\pm$  15.9%、蒽- $d_{12}$  88.4%  $\pm$  13.7%、茈- $d_{12}$  58.3%  $\pm$  21.9%. 最后结果经空白扣除和回收率校正.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAHs 的流域分布特征

USEPA 列出的 16 种优先控制 PAHs 分别为萘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘. 在成渝经济区 19 个表层沉积物样品中, PAHs 含量区域分布情况见表 1. 由表 1 可知, 在长江干流及支流 19 个表层沉积物样品中, 16 种优先控制 PAHs 的含量范围为 48.2 ~ 723.1 ng/g, 平均值为 276.1

表 1 各流域表层沉积物样品中 16 种优先控制 PAHs 的含量<sup>1)</sup>/ng·g<sup>-1</sup>  
Table 1 Content of 16 priority pollutant PAHs in surface sediment samples/ng·g<sup>-1</sup>

化合物	含量						平均值 ± 标准偏差
	长江	沱江	岷江	涪江	嘉陵江	渠江	
萘	16.4 ~ 39.6	13.1 ~ 25.9	11.8 ~ 29.5	6.9 ~ 11.6	14.2 ~ 27.0	16.5 ~ 64.1	22.9 ± 13.4
芴	1.0 ~ 5.0	0.9 ~ 4.2	1.0 ~ 3.1	0.4 ~ 0.6	0.8 ~ 1.3	1.5 ~ 1.7	1.8 ± 1.4
芴	0.7 ~ 9.8	3.2 ~ 3.8	1.4 ~ 3.5	1.1 ~ 2.0	1.8 ~ 3.6	1.7 ~ 3.3	3.1 ± 2.1
芴	1.8 ~ 16.4	6.5 ~ 16.0	6.1 ~ 10.5	3.3 ~ 5.9	3.7 ~ 13.1	5.9 ~ 30.3	9.5 ± 6.6
菲	35.7 ~ 81.8	33.9 ~ 56.1	33.4 ~ 55.4	8.7 ~ 22.6	21.2 ~ 25.6	24.2 ~ 88.9	43.1 ± 20.9
蒽	4.3 ~ 53.7	5.0 ~ 10.9	3.7 ~ 6.5	0.9 ~ 2.6	2.2 ~ 4.5	2.2 ~ 6.2	7.6 ± 11.5
荧蒽	25.8 ~ 103.2	33.8 ~ 51.9	36.8 ~ 53.9	4.9 ~ 15.9	15.1 ~ 31.9	13.9 ~ 25.8	35.6 ± 22.2
芘	18.0 ~ 92.7	30.4 ~ 41.7	24.4 ~ 33.5	4.4 ~ 13.8	14.2 ~ 44.9	12.7 ~ 26.9	28.6 ± 19.1
苯并[a]蒽	9.4 ~ 39.9	14.5 ~ 22.9	12.2 ~ 14.0	2.2 ~ 6.5	6.7 ~ 11.2	5.6 ~ 15.2	13.2 ± 8.3
蒽	16.2 ~ 47.7	16.0 ~ 24.2	16.9 ~ 24.5	3.2 ~ 9.1	7.8 ~ 18.4	8.2 ~ 31.2	18.3 ± 10.3
苯并[b]荧蒽	8.8 ~ 26.1	0.1 ~ 20.2	14.8 ~ 35.2	n. d. ~ 11.7	6.5 ~ 8.7	n. d. ~ 20.4	13.6 ± 9.5
苯并[k]荧蒽	2.3 ~ 7.9	3.7 ~ 9.8	3.9 ~ 8.7	0.8 ~ 3.3	1.8 ~ 2.1	2.0 ~ 4.2	4.3 ± 2.6
苯并[a]芘	2.5 ~ 9.5	4.9 ~ 16.2	4.8 ~ 7.1	1.0 ~ 4.3	2.9 ~ 3.1	2.8 ~ 6.2	5.6 ± 3.5
茚并[1,2,3-cd]芘	13.8 ~ 85.3	7.3 ~ 32.6	18.2 ~ 64	n. d. ~ 11.3	11.3 ~ 39.7	6.0 ~ 20.9	22.6 ± 21.1
二苯并[a,h]蒽	n. d. ~ 49.9	3.8 ~ 15.2	n. d. ~ 21.6	n. d. ~ 5.1	n. d. ~ 19.8	3.2 ~ 18.7	9.8 ± 12.2
苯并[g,h,i]芘	22.7 ~ 126.6	15.5 ~ 50.9	28.4 ~ 84.7	n. d. ~ 15.7	21.2 ~ 74.2	8.6 ~ 42.3	36.8 ± 31.0
∑ <sub>16</sub> PAHs	256.7 ~ 723.1	215.4 ~ 346.8	274.4 ~ 389.0	48.2 ~ 142.0	131.7 ~ 348.8	115.3 ~ 405.9	276.1 ± 195.7

1) n. d. 为未检出,下同

ng/g,最高值出现在长江流域的石门子,最低值出现在涪江流域的百倾。

为探讨各流域沉积物中 PAHs 的污染水平,将长江干流及其支流沉积物中 PAHs 的算术平均值绘于图 2 中。由图 2 可知, ∑ PAHs 含量平均值分别为:长江 358.6 ng/g、沱江 292.7 ng/g、岷江 322.2 ng/g、涪江 82.4 ng/g、嘉陵江 240.2 ng/g、以及渠江 260.6 ng/g。长江干流 PAHs 平均含量最高,各流域 PAHs 含量呈现长江 > 岷江 > 沱江 > 渠江 > 嘉陵江 > 涪江的趋势,这在一定程度上反映了各流域的经济发展水平。

表 2 列举了成渝经济区与国内其他地区河流表层沉积物中 PAHs 的浓度范围比较。成渝经济区河流表层沉积物中 ∑ PAHs 的含量较淮河(淮南-蚌

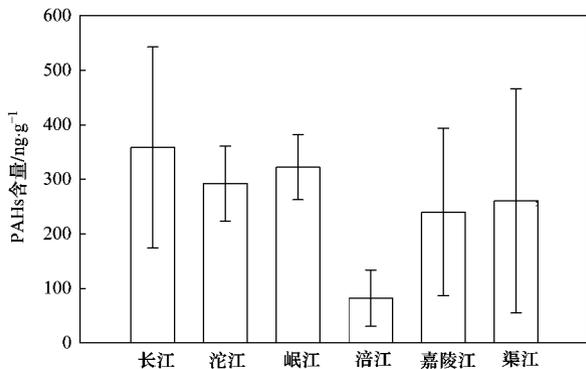


图 2 各流域 16 种优控多环芳烃总含量分布  
Fig. 2 Total concentration of 16 priority pollutant PAHs in different drainage area

埠段)<sup>[24]</sup>、闽江、通惠河等区域处于同一水平<sup>[25,26]</sup>,但远低于重度污染地区,如珠江河口<sup>[27]</sup>、黄河(兰州段)<sup>[16]</sup>、黄浦江<sup>[12]</sup>。对比研究结果表明,成渝经济区河流表层沉积物中 PAHs 的污染程度处于轻度污染水平。此结果与成渝经济区河流表层沉积物中沙砾含量较高,TOC 含量较低的特点相吻合。

表 2 我国不同地区河流沉积物中 PAHs 含量比较

研究地点	from different regions		文献
	∑ PAHs 含量 /ng·g <sup>-1</sup>	检出 PAHs 种类/种	
闽江	112.0 ~ 877.0	16	[25]
通惠河	127.1 ~ 927.7	16	[26]
珠江河口	255.9 ~ 16 670.3	16	[27]
黄浦江	244.0 ~ 4 348.0	16	[12]
淮河(淮南-蚌埠段)	308.1 ~ 1 090.4	18	[24]
黄河(兰州段)	464.0 ~ 2 621.0	16	[16]
滦河	n. d. ~ 478.0	16	[13]
成渝经济区流域	48.2 ~ 723.1	16	本研究

## 2.2 PAHs 的组成特征与来源识别

PAHs 环数相对丰度,可以反映来自热解或石油类污染。通常相对分子质量较高的 4 环及其以上的 PAHs 主要是由石化燃料燃烧产生,而低分子量 2 ~ 3 环则来源于石油类污染<sup>[6]</sup>。如图 3 所示,成渝经济区河流表层沉积物中 2 ~ 3 环 PAHs 占 15.1% ~ 52.3%、4 环占 24.4% ~ 44.5%、5 ~ 6 环占 3.3% ~ 56.9%。由 PAHs 在不同采样点沉积物中的分布可以看出,绝大部分沉积物样品中高环 PAHs 占优势,说明其主要来源是燃烧,只有江油和涪陵这两个

采样点的低环 PAHs 占优势,其低环与高环含量之比例分别为 1.10 和 1.01,说明其 PAHs 来源受到石化产品泄漏污染的影响。

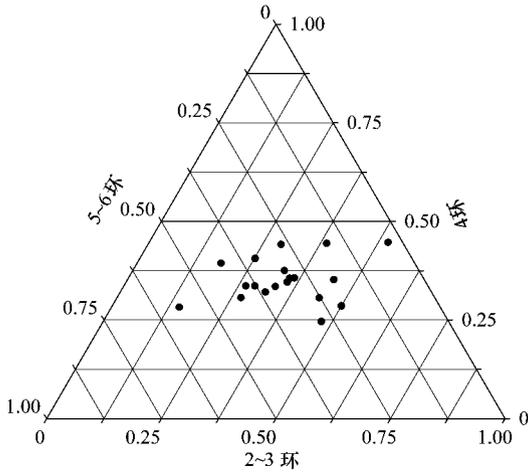


图 3 16 种优控多环芳烃的各组分相对含量

Fig. 3 Relative content for the 16 priority pollutant PAHs

人为活动产生的 PAHs 主要包括石化、生物质燃烧和石化产品泄漏。研究表明,燃烧产生的 PAHs,如城市大气颗粒中源于燃烧的 PAHs,表现为低环(2~3 环)PAHs( $c_{LMW}$ )含量低,高环(4~6 环)PAHs( $c_{HMW}$ )含量高,其  $c_{LMW}/c_{HMW}$  比值  $< 1$ <sup>[11, 17, 26, 28]</sup>;而石油污染源,包括燃油及其他石油产品中的 PAHs,由于  $c_{LMW}$  占优势导致  $c_{LMW}/c_{HMW}$  比值  $> 1$ <sup>[29]</sup>。另外,沉积物中的 PAHs 中蒽(An)与菲(Phe)的含量之比(简写为  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$ )  $< 0.1$  代表石油污染源,当  $c_{An}/c_{(An+Phe)} > 0.1$  代表燃烧源。

由图 4 可以看到,成渝经济区河流表层沉积物中  $c_{LMW}/c_{HMW}$  和  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$  主要分为 2 个区域。区域 I 包括龙门镇、石门子、井口、泸州及凉姜沟 5 个采样点,表现为  $c_{LMW}/c_{HMW} < 1$  和  $c_{An}/c_{(An+Phe)} > 0.1$ ,表明上述 5 个采样点 PAHs 来源为燃烧源;区域 II 包括江油、朱沱、万州、鱼嘴、元坝、彭山岷江大桥、太合、黑龙滩、百倾、阆中、北温泉、广安、官渡共 13 个采样点,表现为靠近 2 种污染源边界,说明其 PAHs 主要来源于燃烧源,同时受到石油污染影响;另外,涪陵采样点区别于其他采样点表现为石油污染源,可能是由于航道行驶漏油等原因造成。

另有研究表明<sup>[17, 26, 28]</sup>, 荧蒽(FIA)与芘(PyR)和蒽(An)的含量之比(简写为  $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)}$ )  $< 0.4$  代表石油污染源,  $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} > 0.5$  代表草、木和煤燃烧源,  $0.4 < c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} < 0.5$  为石化

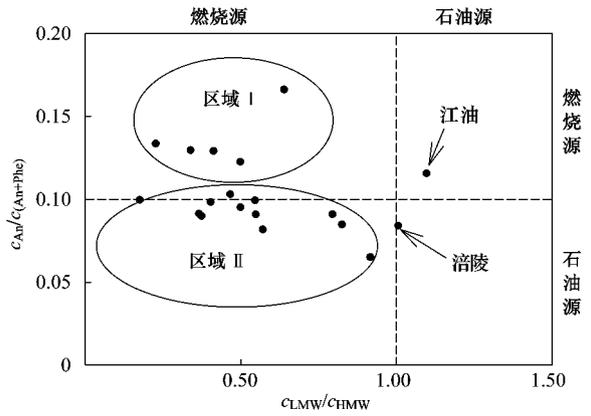


图 4 16 种优控 PAHs 的  $c_{LMW}/c_{HMW}$  值与  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$  值分布

Fig. 4 The 16 priority pollutant PAHs cross plots for the ratios of  $c_{LMW}/c_{HMW}$  VS  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$

产品燃烧源;茚并[1, 2, 3-cd]芘(InP)与苯并[g, h, i]芘(BghiP)和茚并[1, 2, 3-cd]芘(InP)的含量之比(简写为  $c_{InP}/c_{(InP+BghiP)}$ )  $< 0.2$  代表石油污染源,  $c_{InP}/c_{(InP+BghiP)} > 0.5$  代表草、木材和煤燃烧源,  $0.2 < c_{InP}/c_{(InP+BghiP)} < 0.5$  为石化产品燃烧源。根据成渝经济区河流沉积物中  $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)}$  和  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$ (如图 5),可将 PAHs 来源分为 3 部分讨论。区域 I 包括龙门镇、泸州、石门子、江油、凉姜沟、太合 6 个采样点,表现为  $c_{An}/c_{(An+Phe)} > 0.1$ 、 $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} > 0.5$ ,说明其 PAHs 来源主要为草、木和煤的燃烧;区域 III 包括北温泉、官渡 2 个采样点以及井口采样点,表现为靠近污染源边界,说明其污染源主要为石化产品燃烧,同时受到石油源影响;其余采样点均在区域 II 出现,表现为  $c_{An}/c_{(An+Phe)} < 0.1$ 、 $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} > 0.5$ ,表示其 PAHs 污染源主要是草、木和煤燃烧的同时还一定程度上受到石油污染影响。

再根据成渝经济区河流沉积物中  $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)}$  和  $c_{InP}/c_{(InP+BghiP)}$ (图 6),可得到沉积物中 PAHs 的来源主要集中在区域 II,表现为  $c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} > 0.5$  且  $0.2 < c_{InP}/c_{(InP+BghiP)} < 0.5$ ,表明其为石化产品燃烧及草、木和煤的燃烧的混合来源。其余包含在区域 I 内的 3 个采样点分别为井口、北温泉、官渡,表现为  $0.4 < c_{FIA}/c_{(FIA+PyR)} < 0.5$ 、 $0.2 < c_{InP}/c_{(InP+BghiP)} < 0.5$ ,说明其 PAHs 来源为石化产品燃烧,与图 5 得到的结论基本一致。

因此,以上讨论表明成渝经济区河流表层沉积物中 PAHs 污染源主要为草、木和煤的燃烧,个别采样点来源以石化产品燃烧为主,同时受到较轻

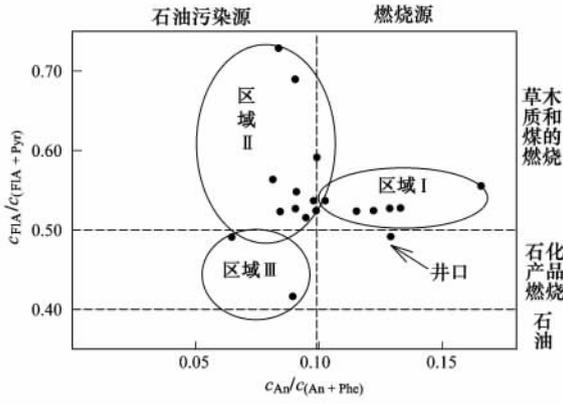


图5 16种优控PAHs的 $c_{An}/c_{(An+Phe)}$ 值与 $c_{FIA}/c_{(FIA+Pyr)}$ 值分布

Fig. 5 The 16 priority pollutant PAHs cross plots for the ratios of  $c_{An}/c_{(An+Phe)}$  VS.  $c_{FIA}/c_{(FIA+Pyr)}$

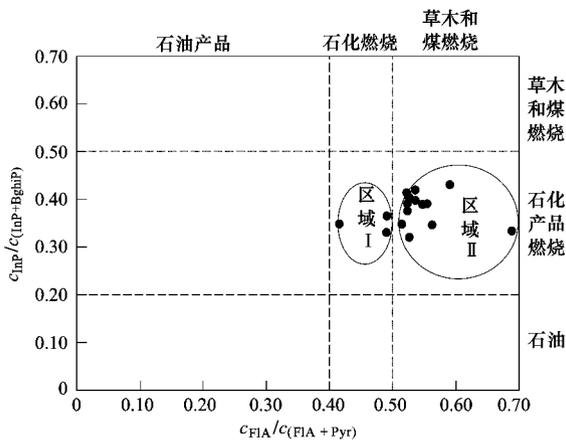


图6 16种优控PAHs的 $c_{FIA}/c_{(FIA+Pyr)}$ 值与 $c_{InP}/c_{(InP+BghiP)}$ 值分布

Fig. 6 The 16 priority pollutant PAHs cross plots for the ratios of  $c_{FIA}/c_{(FIA+Pyr)}$  VS.  $c_{InP}/c_{(InP+BghiP)}$

的石油污染影响。

### 2.3 PAHs生态风险评价

目前,我国仍然没有国家主管部门颁布的湖泊沉积物基准规范<sup>[30]</sup>。因此,本研究采用 Long 等<sup>[31-33]</sup>通过对大量样品进行化学分析、毒理实验和现场生物检测所获得的表观效应阈值,即生物效应低值 (effects range low, ERL) 和生物效应中值 (effects range median, ERM) 来进行评估。

为了使结果更加直观,故采用风险因子值 (hazard ratio, HR) 判别成渝经济区 PAHs 的生态风险,其中 HR-ERL 和 HR-ERM 分别是 ERL 和 ERM 对应的风险因子值,即为污染物含量分别与生物效应低值和生物效应中值的比值,当污染物含量低于

ERL, 即  $HR-ERL < 1$  时,产生生态危害效应的可能性较小;当污染物含量介于 ERL 和 ERM 之间,即  $HR-ERL > 1$ 、 $HR-ERM < 1$  时,有可能具有潜在的生态风险;当污染物含量高于 ERM, 即  $HR-ERM > 1$  时,可能存在严重的生态风险。图7所示为成渝经济区河流表层沉积物中 PAHs 的风险因子值,除渠江的官渡采样点沉积物中芴的  $HR-ERL > 1$ 、 $HR-ERM < 1$  以外,其余点的  $HR-ERL$  和  $HR-ERM$  均小于1,表明成渝经济区沉积物中 PAHs 生态风险处于较低水平,目前尚不会对三峡库区的生态环境造成明显的危害。

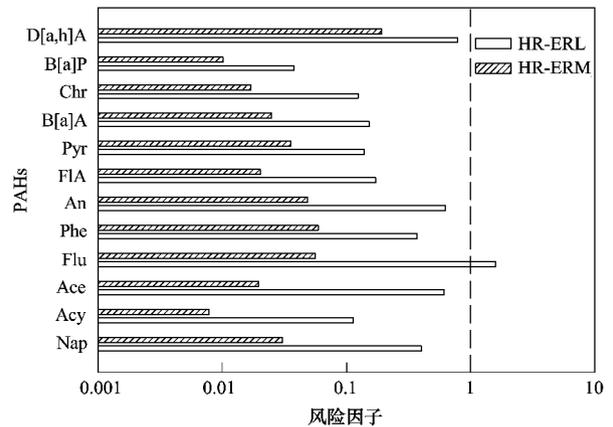


图7 成渝经济区表层沉积物中 PAHs 的风险评估

Fig. 7 Risk assessment of PAHs in surface sediment from Cheng-Yu Economic Zone

### 3 结论

(1) 在成渝经济区长江、岷江、沱江、渠江、嘉陵江、涪江流域内的 19 个表层沉积物样品中,  $\sum$  PAHs 的含量范围为 48.2 ~ 723.1 ng/g, 平均值为 276.1 ng/g, 各流域 PAHs 含量趋势为长江 (358.6 ng/g) > 岷江 (322.2 ng/g) > 沱江 (292.7 ng/g) > 渠江 (260.6 ng/g) > 嘉陵江 (240.2 ng/g) > 涪江 (82.4 ng/g) 的趋势, 表现为轻度污染水平。

(2) 成渝经济区表层沉积物中 PAHs 以 4 ~ 6 环化合物为主, 除涪陵采样点区别于其他采样点表现为石油污染源, 可能与航道行驶漏油等原因有关外, 其余绝大部分样品中 PAHs 的污染源主要为草、木和煤的燃烧。

(3) 风险评价表明成渝经济区沉积物中 PAHs 生态风险处于较低水平, 除了渠江的官渡采样点沉积物中芴可能会对周围生态环境产生毒性外, 其余采样

点沉积物对周围生态环境的影响较低,成渝经济区沉积物中的 PAHs 尚未对三峡库区的水质构成危险。

致谢:采样由四川省环境科学研究院和重庆市环境科学研究院协助完成,样品预处理得到北京大学深圳研究生院倪宏刚老师的帮助,样品分析由中国科学院广州地球化学研究所协助完成,谨此表示感谢。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Sverdrup L E, Nielsen T, Krogh P H. Soil ecotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in relation to soil sorption, lipophilicity, and water solubility [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(11): 2429-2435.
- [ 2 ] 吴丰昌. 天然有机质及其与污染物的相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 3 ] Wu F C, Xing B S. *Natural Organic Matter and Significance in the Environment* [M]. Beijing, China: Chinese Science Publisher, 2009.
- [ 4 ] 吴丰昌,万国江,蔡玉蓉,等. 沉积物-水界面的生物地球化学作用[J]. *地球科学进展*, 1996, **11**(2): 191-197.
- [ 5 ] 陈燕燕,尹颖,王晓蓉,等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 118-124.
- [ 6 ] 胡国成,郭建阳,罗孝俊,等. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(3): 321-326.
- [ 7 ] 周怀东,赵健,陆瑾,等. 白洋淀湿地表层沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(3): 291-299.
- [ 8 ] 郭建阳,廖海清,韩梅,等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 626-631.
- [ 9 ] 刘国卿,张干,李军,等. 多环芳烃在珠江口的百年沉积记录[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 141-145.
- [ 10 ] 罗孝俊,陈社军,余梅,等. 多环芳烃在珠江口表层水体中的分布与分配[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2385-2391.
- [ 11 ] Liu Y, Chen L, Zhao J F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment of rivers and an estuary in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(2): 298-305.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 曹治国,刘静玲,栾芸,等. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(2): 246-253.
- [ 14 ] 文峰,尹辉,范莉,等. 岷江成都段水中多环芳烃污染现状分析[J]. *四川环境*, 2005, **24**(6): 77-79.
- [ 15 ] 许川,舒为群,罗财红,等. 三峡库区水环境多环芳烃和邻苯二甲酸酯类有机污染物健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(5): 57-60.
- [ 16 ] Xu J, Yu Y, Wang P, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments from Yellow River, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(7): 1408-1414.
- [ 17 ] Li G, Xia X, Yang Z, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 985-993.
- [ 18 ] 徐承红,刘攀. 成渝经济区与西部大开发[J]. *工业技术经济*, 2007, **26**(8): 42-46.
- [ 19 ] 戴会超,王玲玲,蒋定国,等. 三峡水库蓄水前后长江上游近期水沙变化趋势[J]. *水利学报*, 2007, (增刊): 226-231.
- [ 20 ] 邓金运,徐芳,陈建,等. 三峡上建库对重庆河段泥沙淤积的影响[J]. *水运工程*, 2007, **8**(2): 32-38.
- [ 21 ] 罗孝俊. 珠江三角洲河流、河口和邻近南海海域水体、沉积物中多环芳烃与有机氯农药研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
- [ 22 ] 林峥,麦碧娴,张干,等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. *环境化学*, 1999, **18**(2): 115-121.
- [ 23 ] US-EPA. 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [EB/OL]. <http://cfpub.epa.gov/ecotox>. 2008-07-01.
- [ 24 ] 彭欢,杨毅,刘敏,等. 淮南-蚌埠段淮河流域沉积物中 PAHs 的分布及来源辨析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1192-1197.
- [ 25 ] Zhang Z L, Hong H S, Zhou J L, *et al.* Fate and assessment of persistent organic pollutants in water and sediment from Minjiang River Estuary, Southeast China [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(9): 1423-1430.
- [ 26 ] Zhang Z L, Huang J, Yu G, *et al.* Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China [J]. *Environmental pollution*, 2004, **130**(2): 249-261.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] 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**(4): 489-515.
- [ 29 ] Rocher V, Azimi S, Moilleron R, *et al.* Hydrocarbons and heavy metals in the different sewer deposits in the 'Le Marais' catchment (Paris, France): stocks, distributions and origins [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **323**(1-3): 107-122.
- [ 30 ] 吴丰昌,孟伟,宋永会,等. 中国湖泊水环境基准的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(12): 2385-2393.
- [ 31 ] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuary sediment [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [ 32 ] Long E R, Macdonald D D. *Sediment Classification Methods Compendium* [R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency Sediment Oversight Technical Committee, 1992.
- [ 33 ] Long E R, Morgan L G. The potential for biological effects of sediments-sorbed contaminants tested in the national status and trends program [R]. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1990.