

凌郡鸿, 张依章, 周北海, 等. 深圳茅洲河下游沉积物中多环芳烃来源分析与生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2846–2853.

LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, ZHOU Bei-hai, et al. Source identification and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments in the downstream Maozhou River, Shenzhen, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2846–2853.

深圳茅洲河下游沉积物中多环芳烃来源分析与生态风险

凌郡鸿^{1,2}, 张依章^{2*}, 周北海^{1*}, 孔德安³, 王强⁴, 凡宸⁵, 张秋英²

(1. 北京科技大学能源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中电建水环境治理技术有限公司, 深圳 518100; 4. 中共福田区园岭街道工作委员会, 深圳 518028; 5. 深圳市自由度环保科技有限公司, 深圳 518000)

摘要:为研究茅洲河沉积物中多环芳烃的来源与生态风险,于2016年8月采集茅洲河柱状沉积物9根,使用GC-MS分析了16种多环芳烃(PAHs)。结果表明,沉积物中 Σ PAHs范围为:453.7~998.1 ng·g⁻¹,平均含量为708.3 ng·g⁻¹,呈入海口与上游浓度较高、中下游浓度相对较低的分布特征。0~0.5 m层、0.5~1.0 m层和1.0~1.5 m层16种多环芳烃浓度分别为(855.4±81.3)、(739.7±70.3)ng·g⁻¹和(570.3±54.2)ng·g⁻¹。多环芳烃环数呈4环>5环>6环>3环>2环变化趋势。茅洲河0~0.5 m沉积物中多环芳烃主要来自于草、木和煤等燃烧源的不完全燃烧,0.5~1.0 m层主要来源于不完全燃烧和混合来源,1.0~1.5 m层主要来源于混合源,其次为燃烧源,且出现了石油源。研究区内沉积物中苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)和苯并(g,h,i)芘(BghiP)在各点位均有检出,因而可能会对生物产生毒害作用,其余组分在各采样点的含量均低于有效区间低值(ERL),对生物几乎无毒副作用或毒副作用不明显,生物有害效应概率<10%。

关键词:多环芳烃;来源分析;生态风险评价;柱状沉积物

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)12-2846-08 **doi:**10.11654/jaes.2018-0107

Source identification and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments in the downstream Maozhou River, Shenzhen, China

LING Jun-hong^{1,2}, ZHANG Yi-zhang^{2*}, ZHOU Bei-hai^{1*}, KONG De-an³, WANG Qiang⁴, FAN Chen⁵, ZHANG Qiu-ying²

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Power China Water Environment Governance, Shenzhen 518100, China; 4. Yuanling Sub-district Office, Shenzhen 518028, China; 5. Shenzhen Degree of Freedom Sci-Tech Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: To identify the sources and conduct ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment cores from the Maozhou River, nine columnar sediment samples were collected in August 2016. Sixteen kinds of PAHs were identified using gas chromatography-mass spectrometry. The results demonstrated that the range of Σ PAHs in the sediments were 453.7~998.1 ng·g⁻¹, and the average content was 708.3 ng·g⁻¹. The concentration was highly distributed upstream and in the estuary, but low in the middle and downstream. The concentrations of Σ PAHs content of 0~0.5, 0.5~1.0 m, and 1.0~1.5 m were (855.4±81.3), (739.7±70.3) ng·g⁻¹, and (570.3±54.2) ng·g⁻¹, respectively. The number of PAH rings were in the order of 4-ring>5-ring>6-ring>3-ring>2-ring. Source identification showed that the PAHs in 0~0.5 m of sediments came from the incomplete combustion of grass, wood, and coal; those in 0.5~1.0 m of sediments came from incomplete combustion and mixed sources; and those in 1.0~1.5 m of sediments were mainly from mixed sources, followed by those arising from fossil fuels/petroleum product combustion. BbF, BkF, IcdP, and BghiP, detected at all sample sites, could have toxic ef-

收稿日期:2018-01-18 录用日期:2018-05-24

作者简介:凌郡鸿(1994—),女,江苏徐州人,硕士研究生,从事流域水生态过程研究。E-mail:361842599@qq.com

*通信作者:张依章 E-mail:zhangyz@craes.org.cn;周北海 E-mail:zhoubeihai@sina.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41671033);深圳市科技研发资金(深科技创新[2016]100号)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41671033); The Science and Technology Research and Development of Shenzhen, China(100)

fects on living organisms. The concentrations of other components from all sample sites were lower than the ERL value; hence, these were rarely toxic or are non-toxic. The probability of harmful biological effects was less than 10%.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; source identification; ecological risk assessment; columnar sediment

多环芳烃(PAHs)是最重要的一种持久性有机污染物,广泛分布于大气、水体、土壤、生物体等环境介质中,因具有致癌、致畸和致突变性而广受关注^[1-2]。1979年,美国环保署(EPA)将16种PAHs列为优先控制污染物^[3]。水体中的PAHs因其疏水亲脂性而在水体中含量低,倾向于吸附在有机质中或与悬浮物结合,最终沉降至沉积物^[4],或被水生生物吸收富集,通过食物链传递给人类^[5]。沉积物中的PAHs还可通过再悬浮重新进入水体或大气中,造成“二次污染”^[6-7]。通过沉积作用,不同层的沉积物中16种PAHs浓度分布不同,可阐明其环境行为和迁移转化规律,有助于准确进行生态风险评估,为水生态修复提供依据。

目前珠江及临近海域沉积物中PAHs研究较多^[8]。有结果表明,珠江水体中PAHs主要来源于石化燃料、煤和生物质的混合燃烧^[9];广州段表层沉积物中PAHs主要来源于化石燃料的不完全燃烧^[10]。对于深圳内河茅洲河PAHs的分布与来源研究较少。有研究表明茅洲河表层沉积物中的PAHs主要来源于垃圾焚烧、化石燃料的燃烧、汽车尾气以及农作物秸秆焚烧^[11],但缺乏重污染河流茅洲河柱状沉积物多种PAHs的相关研究。本文选取茅洲河下游段,对柱状沉积物中16种PAHs含量进行定量分析,研究其分布特征,并根据PAHs的组成特征和同分异构体比值初步探讨其主要来源,同时参照相关标准进行风险评价,为经济快速发展地区河流污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采样区域主要包括茅洲河下游(从洋涌河闸至河口)干流和衙边涌支流,衙边涌交汇口以下的茅洲河干流段受潮汐作用明显,因此采样点较密集,以上干流段受潮汐作用不明显,沉积物中污染物浓度变化不大,因而采样点较稀疏。根据河道特点和污染源分布设置采样点,2016年7—8月采集沉积物柱状样品9根(采样点位如图1所示,9个采样点依次记作M1~M9),柱状样长为150~200 cm,样品采集后现场按50 cm为一层进行分样,共得到32个样品。根据茅洲河沉积速率估算,每层代表研究区2~5年沉积记

录^[12]。样品采集后立即用锡箔纸包好装入聚乙烯自封袋中,密封冷藏运回实验室,于-20℃保存直至分析。

1.2 样品分析

1.2.1 粒度与有机碳分析

粒度测试采用Mastersizer 2000激光粒度仪,全程严格按照操作手册进行。有机碳(TOC)测定采用盐酸去除碳酸盐再用元素分析仪分析的方法。样品预处理步骤如下:称取样品约1 g左右,用10 mL 10%的盐酸浸泡24 h,在3000 r·min⁻¹条件下离心去除酸液,用纯水洗至中性,然后置于60℃烘箱中烘干。取50 mg样品用元素分析仪进行测定。

1.2.2 多环芳烃分析

沉积物样品经冷冻干燥,研磨,称取20 g左右,用二氯甲烷索式抽提72 h,抽提底瓶中先加入一定量的活化铜片以去除样品中的硫。提取液经浓缩,转换溶剂,过层析柱(从下到上依次填充3 g 3%的去活氧化铝,6 g 3%的去活硅胶,1 g无水硫酸钠)分离净化,加入二氯甲烷和正己烷的混合液(V:V=2:1)洗脱,得到样品中的芳烃性组分。最后,将上述分离好的芳香烃组分在不高于20℃温度条件下使溶剂自然挥发近干。然后采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Agilent 6890-5975),HP-5MS石英毛细管色谱柱:30 m×0.25 mm×0.25 mm进行分析,升温程序为初始温度70℃维持1 min,以20℃·min⁻¹速率升温至150℃,然后以4℃·min⁻¹升至300℃保留6 min;其中载气为高纯氦气(He),流速1 mL·min⁻¹。

1.2.3 质量保证与质量控制(QA/QC)

对于PAHs,使用内标法定量。以5个不同浓度的PAHs的标准溶液(20、50、100、200、500 ng·L⁻¹)做标准曲线,线性相关性R>0.999。在标准土中,加入PAHs标样,平行3个样,平均回收率为92.3%,相对标准偏差为6.3%。每10个样品,加入溶剂空白和过程空白分析,并在固相萃取前加入回收率指示物菲-d₄,用于监测样品的预处理以及仪器分析过程的影响;在进入仪器分析之前加入色谱定量内标菲-d₁₀消除仪器响应的波动。该研究中方法检出限是用PAHs最低检出浓度的3倍信噪比计算而得,结果为0.02~

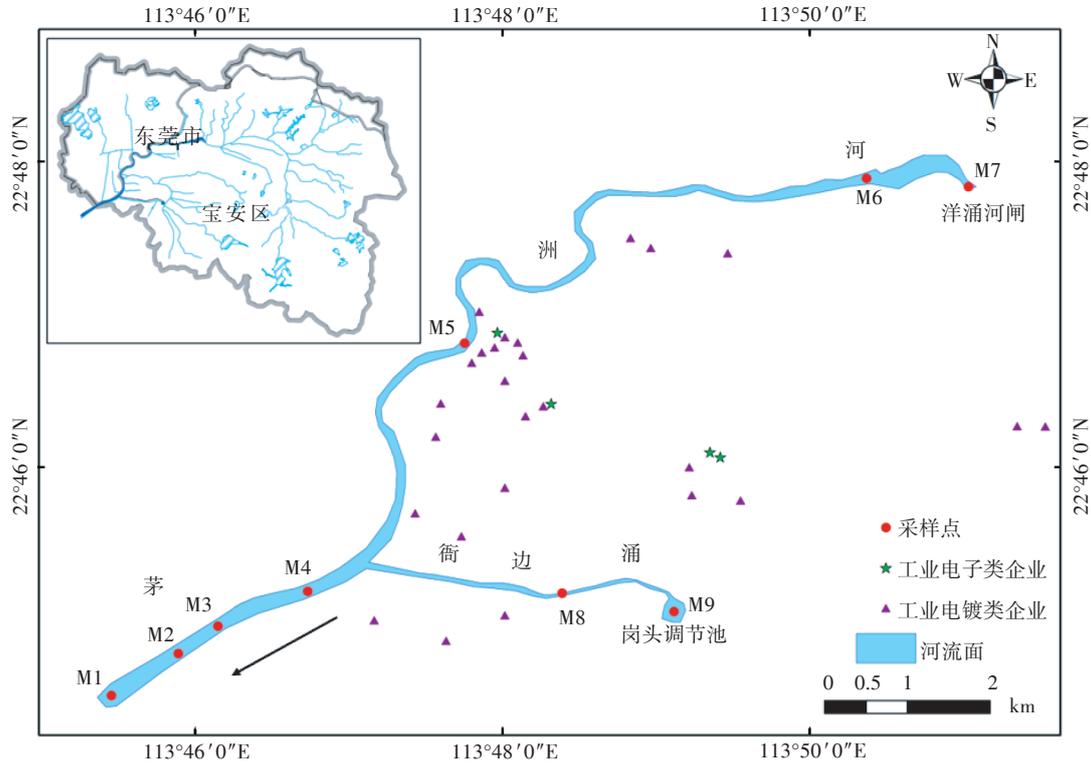


图1 柱状沉积物采样点位置

Figure 1 Sampling sites of core sediments

$1.61 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 定量限是用最低检出浓度的10倍信噪比计算得到, 结果为 $0.05 \sim 5.35 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 回收率指示物非-d₄的回收率介于70%~112%。

2 结果与讨论

2.1 沉积物多环芳烃含量和分布特征

研究区内总多环芳烃含量变化范围为 $453.7 \sim 998.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (图2), 平均含量为 $708.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 且衙边涌支流 ΣPAHs 平均浓度低于茅洲河干流。茅洲河上游M7采样点混合样 ΣPAHs 浓度最高($779.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), M6采样点混合样 ΣPAHs 浓度次之($744.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 河口处M1采样点混合样 ΣPAHs 浓度最低($651.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。与国内外其他河口和海湾沉积物中 ΣPAHs 平均含量相比, 茅洲河表层沉积物中16种 ΣPAHs 平均含量低于海河南系($1811.67 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[13], 高于长江口($395.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[14]与湄洲湾($256.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[15]。16种PAHs中高环的蒽和荧蒹的平均浓度最高, 分别为(131.3 ± 9.2) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和(124.4 ± 8.7) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 苯并(a, h)蒹含量最低, 平均浓度为(6.6 ± 0.5) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

分析表明, 16种多环芳烃在茅洲河沉积物中均有不同程度的检出。4环的4种物质[蒽、荧蒹、芘和苯并(a)蒹]的浓度最高, 其中蒽和荧蒹的平均浓度最

高, 分别为 $129.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $123.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为芘和苯并(a)蒹, 平均浓度分别为 $102.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $77.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。5环的3种物质[苯并(a)芘、苯并(b)荧蒹和苯并(k)荧蒹]的浓度次之, 苯并(a)芘的浓度最高, 平均浓度为 $49.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为苯并(b)荧蒹 $47.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。三环的萘平均浓度最低, 为 $5.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。分析可得, 茅洲河沉积物中PAHs含量总体呈现为4环>5环>6环>3环>2环。通常认为, 低环PAHs来源于石油类污染和木材、煤等在低至中温范围内的燃烧, 高环PAHs则主要来源于化石燃料的高温燃烧^[6], 根据研究区内高分子多环芳烃占优势, 可初步判断研究区内不完全燃烧产物多环芳烃贡献较为显著。

图3结果表明0~0.5 m层 ΣPAHs 浓度最高, 为(855.4 ± 81.3) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显高于0.5~1 m沉积物(739.7 ± 70.3) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于1.0~1.5 m沉积物(570.3 ± 54.2) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 即随深度的增加浓度降低, 说明有持续不断的多环芳烃向茅洲河输入。M1位于入海口, 受潮汐作用影响显著, 表层沉积物中 ΣPAHs 浓度低于0.5~1.0 m层。国内外的研究也大多反映出沉积物中多以高分子量PAHs为主。Pathiratne等^[17]在研究Beira Lake和Bolgoda Lake时发现, 相比于水体, 沉积物中4~5环PAHs比例更高, 分别占总PAHs的71%~92%和

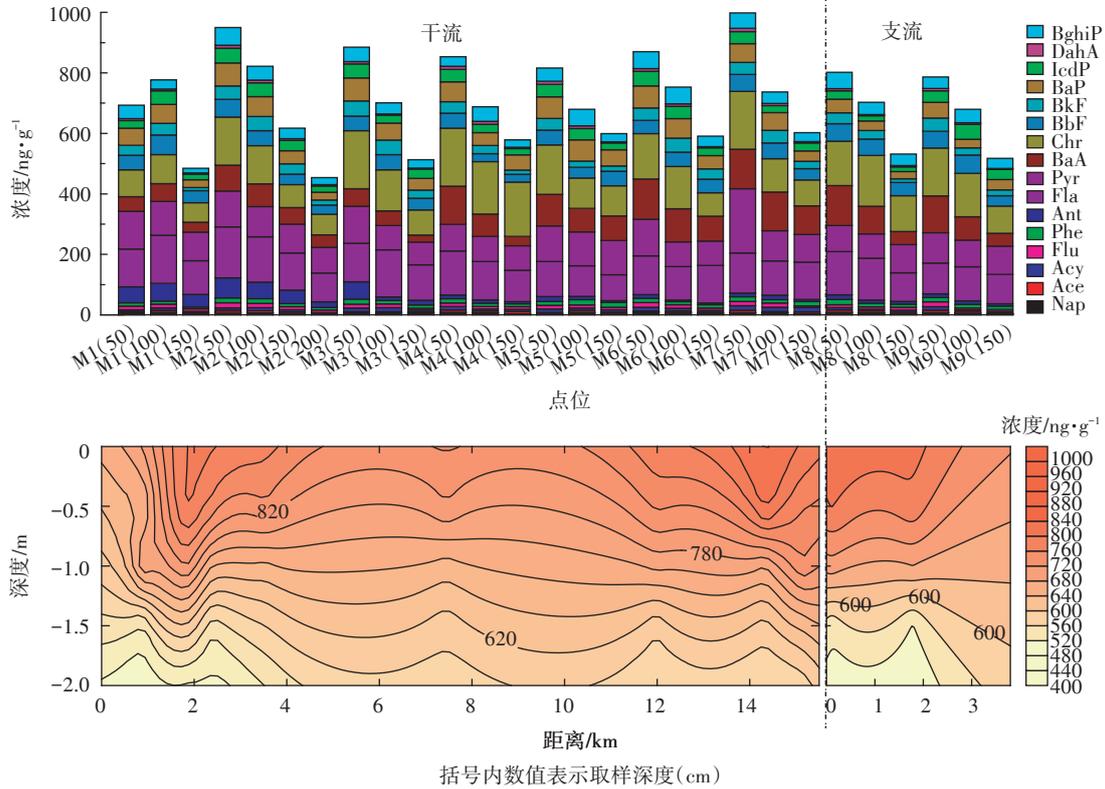


图2 沉积物中16种PAHs垂直分布特征

Figure 2 Vertical distribution of 16 kinds of PAHs in the core sediment

62%~86%。然而也有的研究显示沉积物中以2~3环PAHs为主^[18]。这可能是由于不同地区PAHs的主要来源不同。

2.2 沉积物中多环芳烃与有机碳含量的关系

PAHs在沉积物中的分布受到诸多因素的影响,

已有大量研究表明,有机碳含量对多环芳烃的吸附和运移过程起着非常重要的作用^[18-19]。将沉积物各层样品中多环芳烃含量与有机碳含量进行相关性分析(图4),结果显示二者无相关关系($R^2=0.1956$),这表明沉积物中多环芳烃的来源比较复杂,大量外源多环芳烃

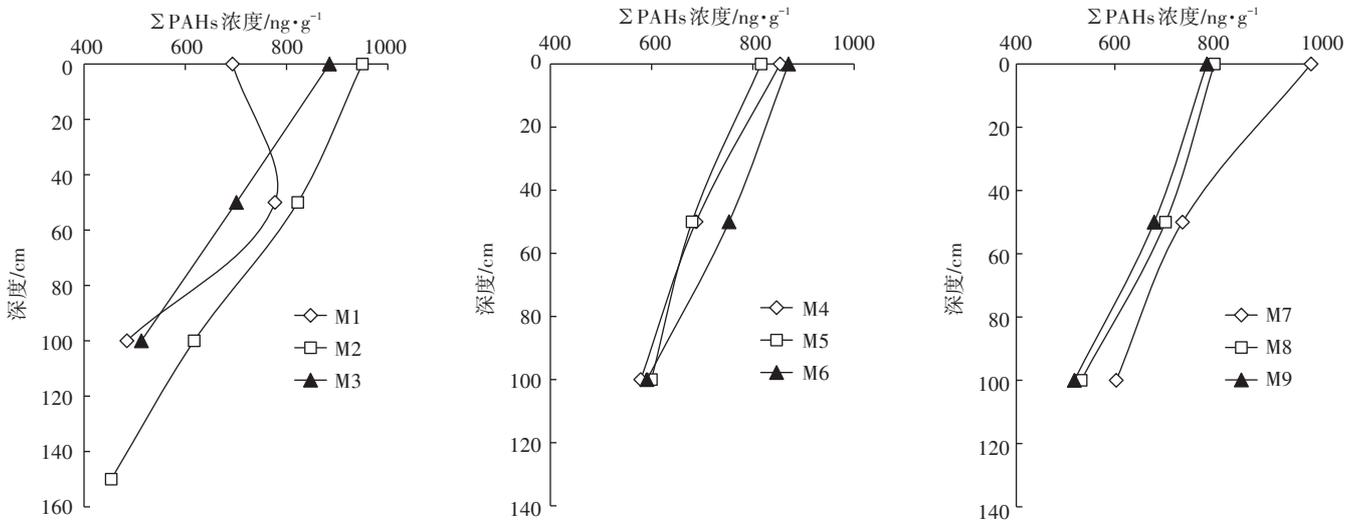


图3 柱状沉积物ΣPAHs浓度垂直分布特征

Figure 3 Vertical distribution of ΣPAHs in the core sediment

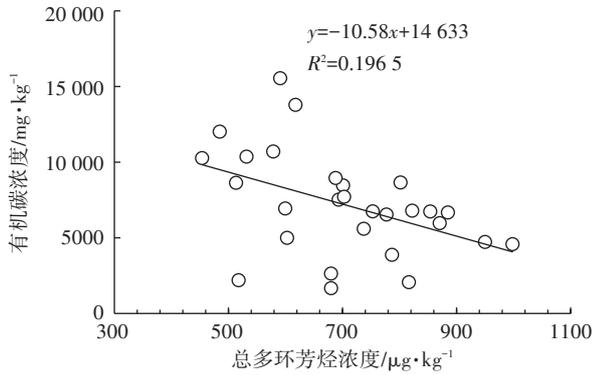


图4 沉积物中总多环芳烃与有机碳相关性分析

Figure 4 Relationship between the total PAHs concentration and TOC

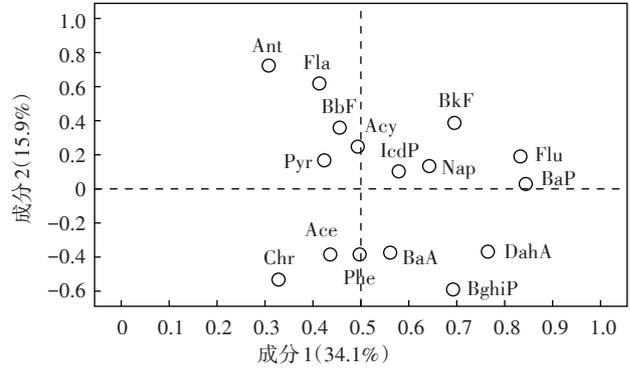


图6 0.5~1.0 m 沉积物中 PAHs 来源分析

Figure 6 Sources identification of PAHs in the 0.5~1.0 m sediments

的输入可能会减弱二者之间的相关性。

2.3 多环芳烃的来源分析

2.3.1 主成分分析

大量研究表明,多环芳烃主要来源有两个:一个是自然源,主要包括森林大火、火山喷发和生物合成等;另一个是人为源,主要包括各种矿物燃料(煤、石油、天然气等)、木材、纸张及其他含氢化合物的不完全燃烧或在还原条件下热解生成^[20]。为了解析 Σ PAHs 各种污染来源的贡献比例,本研究对各层土壤均进行了主成分分析,结果见图5~图7。0~0.5 m 层共提取出4个主成分,贡献率累计达77.6%,权重主要分别加权于 Chr、IcdP、Acy、BaP、Flu、BkF、Pyr 和 Ace、BaA 和 Ant、Fla、BaF、Nap、Phe 以及 DahA、BghiP。根据分析,0~0.5 m 层沉积物中多环芳烃污染主要由高环多环芳烃贡献,其主要来自煤焦油、各种烧煤烟道气、汽车发动机排气等不完全燃烧产生的颗粒沉降。主成分中 Chr 的出现反映了可能陆源有机质快速堆积早成岩阶段产生的多环芳烃。0.5~1.0 m 层共

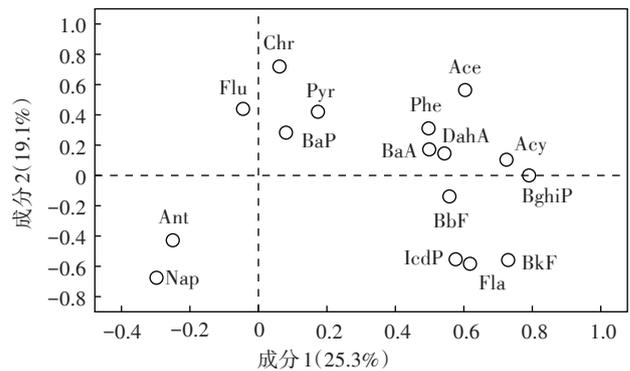


图7 1.0~1.5 m 沉积物中 PAHs 来源分析

Figure 7 Sources identification of PAHs in the 1.0~1.5 m sediments

提取出4个主成分,贡献率累计达到75.9%。多环芳烃污染主要由高环多环芳烃贡献,但低环多环芳烃的贡献显著增加,这主要是与多环芳烃的理化性质有关,高环多环芳烃由于水溶性较低,使得其多集中在沉积物表层和次表层,而低环PAHs水溶性较高,迁移性能相对较大,可迁移至沉积物较深部位。1.0~1.5 m 层共提取出4个主成分,贡献率累计达到75.5%。污染源更为复杂,低环多环芳烃贡献率比0.5~1.0 m 层增加,推断可能存在石油源污染。

2.3.2 PAHs 来源的比值法分析

研究表明来自石油成因的PAHs相对于母体化合物要富集烷基化的同系物,而化石燃料燃烧产生的PAHs则通常缺失烷基化同系物,因此可以利用同分异构体比值分析其来源^[21]。一般可以通过 $Ant/(Ant+Phe)$ 和 $BaA/(BaA+Chr)$ 值判断PAHs的来源是燃烧还是原油污染。 $Ant/(Ant+Phe) < 0.1$ 指示PAHs为石油来源,而 $Ant/(Ant+Phe) > 0.1$ 则指示PAHs为燃烧来源; $BaA/(BaA+Chr) < 0.2$ 指示PAHs为石油来源,

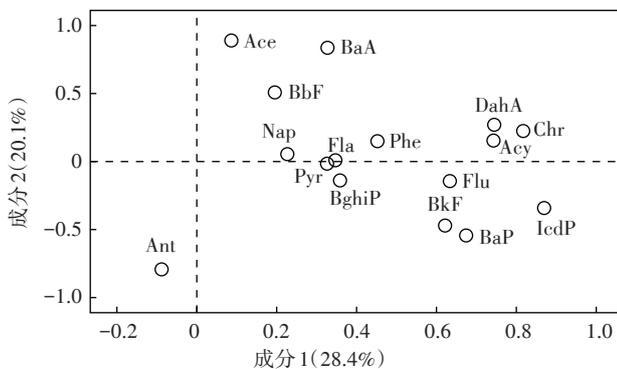


图5 0~0.5 m 沉积物中 PAHs 来源分析

Figure 5 Sources identification of PAHs in the 0~0.5 m sediments

$BaA/(BaA+Chr)>0.35$ 则指示 PAHs 为燃烧来源,介于 0.2~0.35 之间表示为石油燃烧或煤燃烧混合来源。还可通过 $Flu/(Flu+Pyr)<0.4$ 代表石油污染源, $Flu/(Flu+Pyr)>0.5$ 代表草、木和煤燃烧源, $Flu/(Flu+Pyr)$ 介于 0.4~0.5 之间时代表石油燃烧污染源^[22-23]。

图 8 表明,研究区内 PAHs 大部分来源为燃烧源。根据上述指标综合判定 0~0.5 m 层沉积物中 16 种 PAHs 主要来源于草、木和煤等燃烧源,部分来源于混合源,且大部分集中在分界线上;0.5~1.0 m 层沉积物中 16 种 PAHs 受燃烧源与混合源两种来源共同影响,在图中两区域分布均一;1.0~1.5 m 层沉积物中 16 种 PAHs 主要来源于混合源,其次为燃烧源,且该层污染源是唯一存在直接来源于石油污染的,表明石油源多环芳烃客观存在。研究区周边工厂密集(主要包括塑料、电镀、印染等),点源污染大量排放,且广泛存在机动车尾气、家庭燃煤等面源长期排放,从而造成了茅洲河下游段多环芳烃污染。茅洲河也是通航河道,使用柴油或者汽油为燃料的船只增多,加上繁忙的水上运输,汽油等化石燃料的不完全燃烧最终也成为沉积物中 PAHs 的来源之一。0.5~1.0 m 层比 0~0.5 m 层受混合源影响增加,这与深圳市近几年工业发展加快、

排污加剧有关,使石油源影响比例降低。1.0~1.5 m 层 M4 点 $Flu/(Flu+Pyr)$ 为 0.56, $BaA/(BaA+Chr)$ 为 0.15,均表现为石油来源。茅洲河下游为感潮河段,河口连通海洋,而人类活动与海洋沉积演变息息相关,多环芳烃作为石油源烃的重要组成部分,在研究区沉积物中出现也是必然。

2.4 生态风险评价

由于 PAHs 的“三致效应”(致畸性、致癌性和致突变性)会影响生物的生长发育及生殖繁衍,因此评估环境中 PAHs 的生态风险,对环境及人类的健康具有重要的意义。有效应区间低值(Effects range low, ERL)和效应区间中值(Effects range median, ERM)两个评价指标由于简便易行而被广泛使用(表 1)^[24]。通过 ERL 和 ERM 可评估多环芳烃对生物体产生的潜在生态风险效应:若环境中的 PAHs 含量低于 ERL 时,则对生物几乎无毒副作用或毒副作用不明显,生物有害效应概率<10%;如果 PAHs 含量高于 ERM 时,则对生物产生毒副作用的可能性极大,并出现负面生态效应,生物有害效应概率>50%;若 PAHs 含量介于 ERL 与 ERM 之间,则会偶尔出现负面生态效应,具有潜在的生态风险。BbF、BkF、IcdP 和 BghiP 等高分子量 PAHs 组分,只要进入环境中,就会对生物产生严重的毒害作用,因此没有最低安全值^[25]。将茅洲河沉积物样品中 16 种多环芳烃进行比较,结果表明 BbF、BkF、IcdP 和 BghiP 在各点均有检出,因而会对生物产生严重的毒害作用,其余组分在各采样点的含量均低

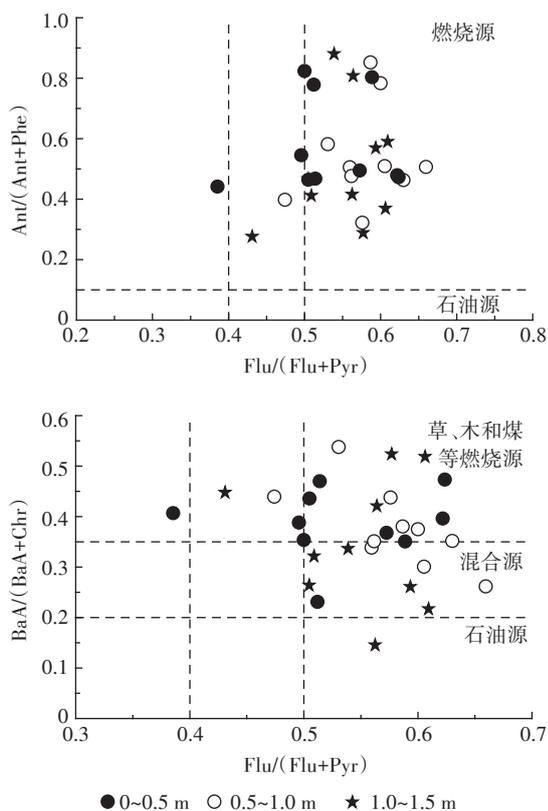


图 8 不同土层沉积物同分异构体分析

Figure 8 Analysis of isomeride in the sediments of different depth

表 1 沉积物中多环芳烃的生态风险评价指标($ng \cdot g^{-1}$)

Table 1 Ecological risk assessment of PAHs in the sediments($ng \cdot g^{-1}$)

多环芳烃 PAHs	风险评价低值 ERL	风险评价中值 ERM	浓度最大值
苊 Ace	16	500	7.95
苊烯 Acy	44	640	14.99
蒽 Ant	85.3	1100	66.1
芴 Flu	19	540	16.4
萘 Nap	160	2100	8.78
菲 Phe	240	1500	17.2
苯并(a)蒽 BaA	261	1600	133
苯并(a)芘 BaP	430	1600	76.2
蒾 Chr	384	2800	192
苯并(a,h)蒽 DahA	63.4	260	10.6
荧蒽 Fla	600	5100	169
芘 Pyr	665	2600	212
多环芳烃总量	4022	44 792	998.1

于ERL值,对生物几乎无毒副作用或毒副作用不明显,生物有害效应概率<10%。

3 结论

(1)研究区内总多环芳烃平均含量为708.3 ng·g⁻¹,入海口与最上游浓度最高,中下游浓度相对较低。垂直分布特征呈由表层至底层浓度降低的趋势,且多环芳烃环数呈现为4环>5环>6环>3环>2环的顺序。

(2)研究区内沉积物中多环芳烃浓度与有机碳相关性不显著,推断沉积物中多环芳烃来源较为复杂。通过主成分分析与比值法推断,研究区内0~0.5 m沉积物中多环芳烃主要来源于草、木和煤等的不完全燃烧,0.5~1.0 m沉积物中多环芳烃主要来源于不完全燃烧和混合来源,1.0~1.5 m沉积物中多环芳烃来源较为复杂,主要为混合源,其次为燃烧源,且出现了石油源。

(3)研究区内沉积物中BbF、BkF、IcdP和BghiP在各采样点均有检出,会对生物产生严重的毒害作用;其余组分在各采样点的含量均低于ERL值,对生物几乎无毒副作用或毒副作用不明显,生物有害效应概率<10%。

参考文献:

- [1] 李嘉康,宋雪英,魏建兵,等. 沈北新区土壤中多环芳烃潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2462-2470.
LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, et al. Potential risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Shenyang North New Area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2462-2470.
- [2] 武婷,刘贵荣,田瑛泽,等. 太湖底泥多环芳烃分布及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):124-129.
WU Ting, LIU Gui-rong, TIAN Ying-ze, et al. Spatial distribution and source apportionment of PAHs in sediments from Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):124-129.
- [3] 刘丰,穆祥鹏,崔巍,等. 草海水体中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2176-2182.
LIU Feng, MU Xiang-peng, CUI Wei, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of Lake Caohai, Guizhou Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2176-2182.
- [4] Chiou C T, And M G, Kile D E. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(2):264-269.
- [5] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment[J]. *Environmental Science Technology*, 1992, 26(7):1278-1284.
- [6] 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.
GUO Jian-yang, LIAO Hai-qing, HAN Mei, et al. Temporal distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment core from Miyun reservoir[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3):626-631.
- [7] Shi Z, Tao S, Pan B, et al. Partitioning and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146(2):492-500.
- [8] 杜娟,吴宏海,袁敏,等. 珠江水体表层沉积物中PAHs的含量与来源研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):766-770.
DU Juan, WU Hong-hai, YUAN Min, et al. Study on concentrations and sources of PAHs in the surface sediments from Pearl River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):766-770.
- [9] 李海燕,段丹丹,黄文,等. 珠江三角洲表层水中多环芳烃的季节分布、来源和原位分配[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12):2963-2972.
LI Hai-yan, DUAN Dan-dan, HUANG Wen, et al. Seasonal distribution, sources, and *in-situ* partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and suspended particulate matters from the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12):2963-2972.
- [10] 吴艳阳,吴群河,叶嘉欣,等. 珠江广州段沉积物中PAHs生态风险的蒙特卡罗模拟[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5):912-920.
WU Yan-yang, WU Qun-he, YE Jia-xin, et al. Monte carlo simulation of PAHs ecological risk in sediments from Guangzhou section of the Pearl River[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5):912-920.
- [11] 孙建林,倪宏刚,丁超,等. 深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9):3089-3096.
SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, et al. Halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Maozhou River, Shenzhen[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9):3089-3096.
- [12] 陈玲. 茅洲河河床淤塞分析及治理对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(6):30-31.
CHEN Ling. Study on siltation analysis and countermeasures of Maozhou River bed[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(6):30-31.
- [13] 刘丰,刘静玲,陈秋颖,等. 海河南系表层沉积物中多环芳烃的污染特征与生态风险评价[J]. 科学通报, 2013, 58(12):1109-1116.
LIU Feng, LIU Jing-ling, CHEN Qiu-ying, et al. Pollution characteristics and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of the southern part of the Haihe River system in China[J]. *Chin Sci Bull*, 2013, 58(12):1109-1116.
- [14] 王波. 长江口及其邻近海域沉积物中多环芳烃和壬基酚的分布特征和生态风险[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
WANG Bo. Distribution and ecological risk assessment of PAHs and NP in sediments from Yangze Estuary and its adjacent area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [15] 林建清,王新红,洪华生,等. 湄洲湾表层沉积物中多环芳烃的含量分布及来源分析[J]. 厦门大学学报(自然版), 2003, 42(5):633-638.
LIN Jian-qing, WANG Xin-hong, HONG Hua-sheng, et al. PAHs' distribution and source analysis in surface sediments of the Meizhou

- Bay[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2003, 42(5): 633-638.
- [16] 张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 170-179.
ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, et al. Distribution, source and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 170-179.
- [17] Pathiratne K A, De Silva O C, Hehemann D, et al. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Bolgoda and Beira Lakes, Sri Lanka[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2007, 79(2): 135.
- [18] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 河北王快水库沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 647-653.
ZHAO Jian, ZHOU Huai-dong, LU Jin, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Wangkuai reservoir, Hebei Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(5): 647-653.
- [19] Li H Y, Ran Y. Distribution and bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water and fishes[J]. *The Scientific World Journal*, 2012(2): 632910.
- [20] 汤智, 廖海清, 张亮, 等. 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[J]. *环境科学*, 2011, 32(9): 2639-2644.
TANG Zhi, LIAO Hai-qing, ZHANG Liang, et al. Distribution source and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediment of Cheng-Yu economic zone[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2639-2644.
- [21] 王洁, 林壬子, 王占生. 北京燕山河沉积物中多环芳烃分布规律及来源分析[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2007, 4(2): 40-43.
WANG Jie, LIN Ren-zi, WANG Zhan-sheng. Distribution and source analysis of PAHs in sediments of Yanshan River, Beijing[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science)*, 2007, 4(2): 40-43.
- [22] 韩菲, 郭宝东, 王英艺. 辽河表层沉积物多环芳烃分布、来源及生态风险评价[J]. *环境保护与循环经济*, 2010, 30(12): 62-66.
HAN Fei, GUO Bao-dong, WANG Ying-yi. Distribution, source and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments of Liaohe River[J]. *Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology*, 2010, 30(12): 62-66.
- [23] 刘娜, 印萍, 朱志刚, 等. 胶州湾大沽河河口表层沉积物中多环芳烃分布特征、来源及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 831-837.
LIU Na, YIN Ping, ZHU Zhi-gang, et al. Distribution source and ecological risk assessment of PAHs in surface sediment from the Dagu River estuary in Jiaozhou Bay, China[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(6): 831-837.
- [24] 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 sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [25] 刘贝贝. 深圳西部海域表层沉积物中多环芳烃和多氯联苯的污染特征及来源初探[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
LIU Bei-bei. The pollution characteristics and preliminary source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments from the western sea of Shenzhen[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.