

浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价

郭俊丽^{1,2}, 杨 旸¹, 高建华¹, 张晨晨^{1,2}, 盛 辉¹,
白凤龙³, 张道来³

(1. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 国家海岛开发与管理研究中心, 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:为探明浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物的多环芳烃(PAHs)污染状况,测定了浙闽沿岸泥质区南部的32个表层沉积物样品中多环芳烃的含量,探讨了浙闽沿岸泥质区多环芳烃的分布、来源及生态风险。结果表明,浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物PAHs总浓度介于 $(12.95 \sim 156.05) \times 10^{-9}$,相对于其他区域属于较低水平。特征分子比值法和SPSS分析结果均表明本研究区域中PAHs主要来源于煤炭、石油的燃烧,并有部分石油源。生态风险评价结果表明浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物PAHs存在一定程度的生态风险,应当多加留意并采取相关措施进行防护。

关键词:浙闽沿岸泥质区南部;多环芳烃;生态风险评价

中图分类号:P736 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2017)06-0826-06

The distribution, sources and ecological risk assessment of surficial sediment in the south coastal mud Area off Zhejiang-Fujian

GUO Jun-li^{1,2}, YANG Yang¹, GAO Jian-hua¹, ZHANG Chen-chen^{1,2}, SHENG Hui¹,
BAI Feng-long³, ZHANG Dao-lai³

(1. Key Laboratory of Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Research Centre for Island Exploitation and Management, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to investigate the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination of the surficial sediment in the south Coastal Mud Area off Zhejiang-Fujian (CMAZF), the content of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surficial sediments were analyzed, and the distribution, sources and ecological threats of polycyclic aromatic hydrocarbons were also discussed. The results showed that the total PAHs concentrations of the surficial sediment in the south CMAZF ranged from 12.95×10^{-9} to 156.05×10^{-9} . The results of isomeric ratio method and SPSS analysis indicated that PAHs in the study area mainly come from the combustion of coal and oil, and partly from oil source. The assessment results concerning with ecological risk evaluation of PAHs revealed that, to some extent, there might exist ecological risk in the surficial sediment of south CMAZF, and more attention should be paid to protect the marine environment.

Key words: the south Coastal Mud Area off Zhejiang-Fujian; PAHs; ecological risk assessment

收稿日期:2016-11-17, 修订日期:2017-01-04

基金项目:国家重大科学研究计划(2013CB956503);国家自然科学基金(41625021)

作者简介:郭俊丽(1994-),女,河南开封人,硕士研究生,研究方向为河口海岸环境演变,E-mail:15261866286@163.com

通讯作者:杨 旸(1978-),男,博士,讲师,研究方向为河口海洋沉积动力学,E-mail:yangy@nju.edu.cn

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一种拥有两个及以上混合苯环的芳烃化合物,是一种重要的疏水性有机污染物^[1]。多环芳烃的出现可能会引起一些人类疾病如皮肤癌、肺癌以及乳腺癌等^[2-3]。多环芳烃在环境中的广泛分布及其对生态环境的潜在毒性已引起高度重视,很多学者对其在多种环境介质中的含量、分布等进行了大量研究,尤其是美国环保局确定的 16 种优先控制的 PAHs 污染物成为关注的焦点^[4]。不同时间、不同地点海域环境中 PAHs 浓度水平相差很大,因此很有必要对海洋环境中的 PAHs 的分布、来源及污染程度深入探讨。到目前为止,专家、学者对我国海域环境中的多环芳烃已有诸多研究^[5-11],主要研究手段是通过 GC/MS 法测得 PAHs 浓度并用特征分子比值法^[12]、SPSS^[13] 等源分析方法判定 PAHs 来源,用 Long 等^[14] 1995 年提出的生态风险效应低值 (ERL) 和生态风险效应高值 (ERM) 作为标准来对研究区多环芳烃的污染水平作出评价。

由于泥质区与河流入海和海流输送等密切相关,沉积速率高而且沉积环境相对稳定,因此蕴藏着丰富的气候变化和海陆相互作用的高分辨率信息,目前已成为沉积学及环境响应研究的热点领域^[15]。沉积物颗粒细,吸附的有机物多,因此泥质区易富集多环芳烃^[5]。浙闽沿岸泥质区是我国东部沿海典型的泥质区,而其沿岸又分布着温州港、福州港等重要港口,海域环境受人类活动干扰较多。因此本文选取浙闽沿岸泥质区南部为研究区域,将特征分子比值法和 SPSS 结合起来共同判定浙闽沿岸泥质区南部多环芳烃的来源并对其进行生态风险评价,对浙闽沿岸海域表层沉积物中多环芳烃的浓度水平、可能来源及生态风险进行研究,旨在为浙闽沿岸海洋环境的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究区位于浙闽沿岸泥质区南部 (图 1),区域内沉积物类型主要为细粒的粉砂质黏土 (并有少量的黏土质粉砂),一般呈灰褐色、灰绿色。浙闽沿岸流与台湾暖流与本研究区域联系密切。沿岸有三条主要的入海河流:椒江、瓯江、闽江。椒江全长为 197.7 km,流域面积为 6519

km²,在台州市以北注入东海,平均年径流量为 6.66×10^9 m³;瓯江全长为 338 km,流域面积为 17859 km²,在温州、乐清之间注入东海,平均年径流量为 1.96×10^{10} m³;闽江全长为 2872 km (干流为 577 km),流域面积为 60992 km²,在福州市注入东海,平均年径流量为 6.2×10^{10} m³。

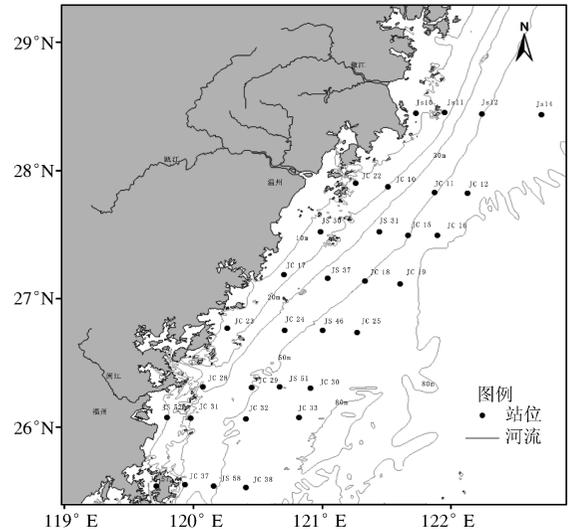


图 1 研究区域与采样站点

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.2 样品采集

2015 年 10 月在浙闽沿岸泥质区的南部,用抓斗共采集 32 个 2 cm 厚度的表层沉积物样品。采取后将样品装入洁净铝箔样品袋中密封避光低温保存,运至实验室。

1.3 实验方法

1.3.1 仪器与试剂

仪器: SPE 固相萃取仪 (美国 Va Master 公司),固相萃取柱;HG-12A 型氮吹仪 (上海泉岛科贸有限公司);真空冷冻干燥仪 (FDA8508 美国 SIM 公司);2 mL 样品瓶;移液器:20 μ L、50 μ L、200 μ L、1000 μ L、5 mL;LC-20AT 型高效液相色谱系统 (HPLC);检测器:由于芘没有荧光吸收,因此所用检测器为紫外检测器,其余 15 种 PAHs 组分均选择荧光检测器进行测定。

试剂:丙酮、正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙腈等均均为色谱纯;高纯 N₂ (99.999%);二次水;无水硫酸钠 (优级纯);PAHs 混标:TCL Polycyclic aromatic hydrocarbons mix 2000 μ g/mL in CH₂Cl₂:Hexane (1:1),多环芳烃的混标 (16 组分)溶于甲醇溶液中。

1.3.2 样品预处理

样品预处理:将沉积物样品于 -20°C 冰箱中进行预冷冻,分析前于 -50°C 下真空冷冻干燥,之后研磨并过80目的筛网,称取5g左右沉积物样品(具体称重量以实际情况而定,将重量准确记录),再用20mL正己烷-丙酮混合液(1:1,体积比)超声提取30min,离心取上清液。重复3次,合并上清液,加Cu片除硫(放置一夜)。提取液经 N_2 吹浓缩至1mL,经固相萃取柱净化,固相萃取柱先用10mL正己烷淋洗,放上样品后用35mL二氯甲烷/正己烷(7:3,体积比)洗脱,收集多环芳烃组分。多环芳烃组分洗脱液用 N_2 吹浓缩至0.5mL以下,多环芳烃组分乙腈重复置换溶剂3次,乙腈定容至0.5mL后转移至样品瓶,上机分析。

1.3.3 分析条件

色谱柱:PAH专用柱(5 μm \times 250mm,美国Waters公司),采用梯度洗脱淋洗方式,0~5min,流动相为 $V_{\text{水}}:V_{\text{乙腈}}=50:50$,5~20min, $V_{\text{水}}:V_{\text{乙腈}}=0:100$,以100%乙腈保持8min,28~35min,流动相为 $V_{\text{水}}:V_{\text{乙腈}}=50:50$,流速1.5mL/min,紫外检测波长228nm。荧光检测器:0~13.5min,发射波长:340nm,激发波长:260nm,13.5~29.5min,发射波长:482nm,激发波长:250nm。进样量:20 μL 。

参照HJ 784-2016《土壤和沉积物多环芳烃的测定高效液相色谱法》进行方法检出限实验,当取样量为5g,定容体积为0.5mL时,紫外检测器测定16种PAHs的方法检出限为 $(3\sim 5)\times 10^{-9}$,荧光检测器测定15种PAHs的方法检出限为 $(0.3\sim 0.5)\times 10^{-9}$ 。取样量不同时,方法检出限会有差异。本文实验过程中的方法检出限满足测试需求。

1.3.4 质量保证与质量控制

本研究所有实验过程均参照环保部发布的HJ 784-2016《土壤和沉积物中多环芳烃的测定高效液相色谱法》,每次分析至少做一个实验室空白试验和全程序空白,同时每批次样品至少分析一个平行样,平行样测定结果相对偏差小于30%。每批次样品至少做一个空白加标,加标回收率都在50%~120%之间,满足质控分析要求。

1.4 源分析计算方法

在Excel2003软件中计算各沉积物样品中PAHs相应组分的比值:Ant/(Ant+Phe)、Flu/(Flu

+Pyr)、BaA/(BaA+Chr)、IP/(IP+BghiP),然后与标准值相比较。

用SPSS16.0软件将采样站位与多环芳烃含量作为一个关系矩阵,对矩阵进行归一化后用主成分分析法进行处理,其计算方法如下:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \dots \\ X_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为观测指标 X_1, X_2 等的个数; m 为不可观测因子 F_1, F_2 等的个数($m < p$); $F=(F_1, F_2, \dots, F_m)$ 是不可测的向量,为 X 的公共因子,其均值向量 $E(F)=0$,协方差矩阵 $\text{Cov}(F)=1$,即向量的各分量是相互独立的; $\varepsilon(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p)$ 是特殊因子,与 F 相互独立,且 $E(\varepsilon)=0, A=(a_{ij}), a_{ij}$ 为因子载荷。

2 结果与讨论

2.1 浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中多环芳烃的分布特征

除萘外,美国环保局确定的16种优先控制的PAHs^[2]在本研究区沉积物中均有检出,PAHs总浓度介于 $(12.95\sim 156.05)\times 10^{-9}$ (图2)。PAHs含量最低的站点为JS11,浓度为 12.95×10^{-9} ,该站位仅有12种PAHs被检出,其余站位含量稍高,其中位于瓯江口外海域的JS22站位的含量最高达 156.05×10^{-9} 。河口和海湾是陆源物质向海洋运输的主要通道,因流域输入的影响,PAHs含量高值区主要集中在瓯江口外海域和闽江口外海域,离岸越远浓度越小。除萘、二氢萘、蒽外,在所有站位中PAHs各个种类检出率均在90%以上。因此,该地区沉积物已经受到PAHs污染,但不同站位的PAHs检出种类明显不同,污染程度也差异显著(图3)。

不同站位PAHs各环数的贡献率不同(图3),除7个站位外,其他所有站位多环芳烃含量均为5环贡献率最高;另外,JS22、JC18、JC28、JC31等站位的多环芳烃含量分布呈现为4环贡献率最高,JC25站位为2环贡献率最高,JS52站位3环贡献率最高。在32个采样站位中,有18个站位萘的贡献率最高,9个站位测得二苯并(a,h)蒽贡献率最高,其余站位为菲、苯并(a)芘、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽等贡献率高。

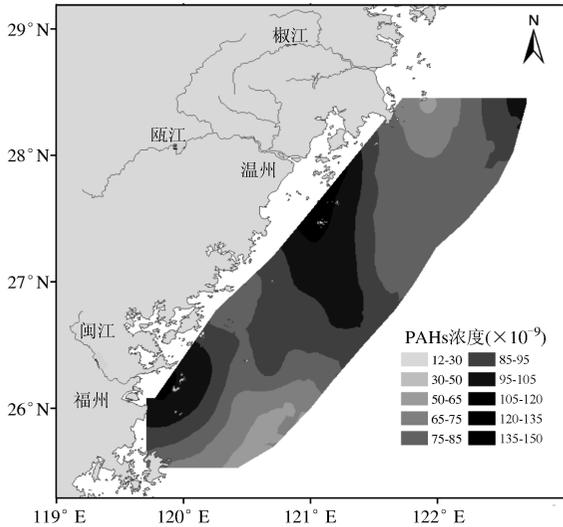


图 2 沉积物中 PAHs 平面分布

Fig. 2 Distribution patterns of PAHs in sediments

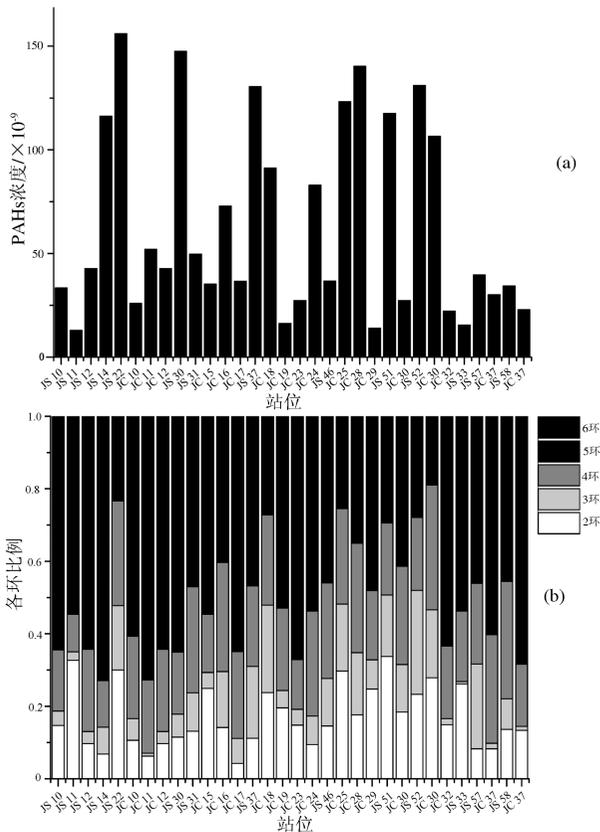


图 3 各站位 PAHs 总量 (a) 及各环比例 (b)

Fig. 3 PAHs contents (a) and percentage (b) in sediments of each sample site

为了解本研究区域的污染水平, 本文将浙闽沿岸海域表层沉积物的多环芳烃总量与其他典型的研究区域多环芳烃总量相比较。对比结果显示, 本研究区域多环芳烃总体处于较低水平(表 2)。

2.2 浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中的多环芳烃来源分析

2.2.1 特征分子比值法

环境中多环芳烃的来源包括自然源和人为源, 以人为源为主。人为来源的 PAHs 主要包括煤、石油、木材等的不完全燃烧、化石燃料本身的挥发或流失(原油泄漏、船舶漏油等), 以及船舶产生的废气排放^[18]。本文采用特征分子比值法、SPSS 主成分及相关性分析法对研究区表层沉积物中 PAHs 来源进行解析。

表 2 与其他研究区域 PAHs 浓度对比 ($\times 10^{-9}$)

Tab. 2 Comparison of PAHs concentrations in sediments at different locations ($\times 10^{-9}$)

研究区域	Σ PAHs	平均值	参考文献
东海	117.1 ~ 211.7	171.4	[5]
椒江口	66.8 ~ 165.4	105.6	[7]
长江口及浙江近岸海域	31.8 ~ 384	131.1	[8]
渤海	148.27 ~ 1211.81	507.13	[9]
南黄海西部	19.8 ~ 172	67.2	[10]
南海	255.90 ~ 911.60	—	[11]
Chesapeake Bay, 美国	0.56 ~ 180	52	[16]
Todos Santos Bay, 墨西哥	7.6 ~ 813	96	[17]
浙闽沿岸泥质区南部	12.95 ~ 156.05	63.57	本文

本文所选的 PAHs 来源判定指标主要包括 Ant/(Ant + Phe)、Flu/(Flu + Pyr)、BaA/(BaA + Chr)、IP/(IP + BghiP) 等(表 3), 并据此来综合判断研究区表层沉积物中 PAHs 来源(表 4)。特征分子比值结果表明浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中 PAHs 来源主要为石油、煤炭、草木等燃烧源, 并有部分石油源。

表 3 比值法判定 PAHs 来源^[6]

Tab. 3 The method of PAHs source identification using isomeric ratios^[6]

PAHs 种类	石油燃烧	煤炭燃烧	草、木材燃烧	石油源
Ant/(Ant+Phe)	>0.1	>0.1	>0.1	<0.1
Flu/(Flu+Pyr)	0.4-0.5	>0.5	>0.5	<0.4
BaA/(BaA+Chr)	>0.35	>0.35	>0.35	<0.2
IP/(IP+BghiP)	0.2-0.5	>0.5	>0.5	<0.2

表 4 沉积物中多环芳烃特征分子比值

Tab. 4 Isomeric ratios of PAHs in sediments

PAHs 种类	范围	平均值	指示意义
Ant/(Ant+Phe)	0 ~ 1	0.11	燃烧源
Flu/(Flu+Pyr)	0 ~ 0.66	0.85	煤炭、草木燃烧源
BaA/(BaA+Chr)	0.17 ~ 0.44	0.28	石油、燃烧混合源
IP/(IP+BghiP)	0.32 ~ 0.95	0.3	石油燃烧源

2.2.2 主成分与相关性分析法

本文将采样站位与多环芳烃含量作为一个关系矩阵,归一化后用主成分分析法得到各因子的主成分权重和各主成分所解释的累计方差(表5,6)。从表5可看出,4个主成分总方差贡献率为91.685%,可以代表浙闽沿岸泥质区表层沉积物中样品中PAHs的绝大部分信息。

在来源判定过程中,将16种PAHs分为4类:萘、菲、蒽、葱等低分子量多环芳烃代表了石油源;苯并(b)荧蒹、苯并(k)荧蒹、苯并(g, h, i)花、茚并(1,2,3-cd)芘等高分子量多环芳烃来源于化石燃料燃烧源;菲、葱、荧蒹、芘与煤炭燃烧有关;而BaA、Chr代表天然气燃烧来源^[19]。如表6所示,在第1主成分中基本每种PAHs值都大于0.5^[15,20],芘、蒽、荧蒹等代表的四环组分明显偏高,因此,第1主成分主要代表煤炭燃烧源;第2主成分主要代表苯并(k)荧蒹、苯并(b)荧蒹、二苯并(a, h)葱、苯并(g, h, i)花、茚并(1,2,3-cd)芘这类PAHs的高环组分,显示为化石燃料燃烧源;第3主成分代表苯并(k)荧蒹,显示来源为化石燃料燃烧;第4主成分代表二氢蒽,指示为石油源。

表5 主成分分析累计特征值及方差

Tab.5 The characteristic value and variance of PCA

主成分	特征值	方差贡献率/(%)	积累方差贡献率/(%)
1	9.466	63.105	63.105
2	2.689	17.926	81.031
3	0.99	6.603	87.634
4	0.608	4.05	91.685

表6 沉积物PAHs因子载荷

Tab.6 Components load of PAHs in sediments

PAHs组分	PC1	PC2	PC3	PC4
萘	0.804	-0.46	0.067	-0.052
二氢蒽	0.703	-0.365	-0.033	0.57
芴	0.838	-0.436	0.079	0.121
菲	0.849	-0.336	0.173	0.083
葱	0.887	-0.043	0.013	0.145
荧蒹	0.912	-0.25	0.028	-0.193
芘	0.934	-0.24	-0.004	-0.228
苯并(a)葱	0.887	-0.168	-0.079	-0.159
蒽	0.915	-0.224	0.027	-0.222
苯并(b)荧蒹	0.764	0.569	-0.099	-0.072
苯并(k)荧蒹	0.264	0.601	0.737	0.043
苯并(a)芘	0.869	0.426	-0.014	-0.04
二苯并(a, h)葱	0.655	0.551	-0.387	-0.081
苯并(g, h, i)花	0.702	0.612	0.27	0.068
茚并(1,2,3-cd)芘	0.676	0.544	-0.406	0.233

SPSS主成分与相关性分析法表明浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中的多环芳烃主要为陆源输入的煤炭、化石燃料燃烧来源,并有部分石油源,这与特征分子比值法的结果基本一致。这进一步说明,研究区的多环芳烃主要来源于瓯江和闽江的陆源输入,同时沿岸的温州和福州的港口运输业较为发达,也导致本地区受到一部分石油来源的多环芳烃污染。

2.3 浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中多环芳烃的生态风险评价

海洋中的持久性有机污染物一方面会威胁海洋生态系统健康,另一方面会通过食物链进入海产品而影响人类健康^[18]。对多环芳烃进行生态风险评价进而掌握海域环境的多环芳烃污染状况能有效地避免一些人类疾病的发生,同时能有计划地保护生态环境。

Long等^[14]在大量实验的基础上,对海洋与河口沉积物中PAHs潜在生态风险提出了风险效应低值(effects range low, ERL)和风险效应中值(effects range median, ERM),本研究沉积物中各种PAHs组分对应的ERL和ERM见表7。

表7 沉积物PAHs生态风险限值($\times 10^{-9}$)

Tab.7 PAHs ecological risk threshold of sediments ($\times 10^{-9}$)

PAHs种类	各种类总量	各种类范围	均值	ERL	ERM
萘	369.51	1.55~46.76	11.55	160	2100
蒽	ND	ND	ND	16	500
二氢蒽	33.23	ND~8.21	2.77	44	640
芴	89.68	ND~12.36	2.8	19	540
菲	140.2	ND~16.34	4.67	240	1500
葱	13.37	ND~2.01	0.58	85.3	1100
荧蒹	121.5	ND~15.51	4.05	600	5100
芘	108.61	0.04~10.94	3.39	665	2600
苯并(a)葱	68.96	0.36~6.86	2.16	261	1600
蒽	184.58	0.95~16.43	5.77	384	2800
苯并(b)荧蒹	170.52	1.31~13.86	5.33	-	-
苯并(k)荧蒹	113.52	0.7~32.72	3.55	-	-
苯并(a)芘	153.14	0.99~14.78	4.79	430	1600
二苯并(a, h)葱	233.01	1.92~38.83	7.28	63.4	260
苯并(g, h, i)花	151.2	1.04~15.39	4.73	-	-
茚并(1,2,3-cd)芘	83.11	0.11~12.99	2.6	-	-
总量	2034.13	8.97~263.99	-	4022	44792

若PAHs的含量小于ERL,则产生负面生态效应的可能性不大;若PAHs的含量在两者之间,则具有潜在的生态风险;若PAHs的含量大于ERM,则可能产生严重的生态风险^[8]。由表7可

见, 萘、芴和二苯并(a, h)蒽3种PAHs高于 ERL , 但低于 ERM , 其他PAHs均低于 ERL , 低环PAHs的出现表明温州港、福州港附近船舶的石油泄漏问题不容忽视。而苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(g, h, i)芘无最低安全值, 只要存在就是有生态风险。因此, 对流域污染输入到海洋的控制应加强, 相关部门对港口船舶的油气使用、排放等污染问题也应加以控制。

3 结 论

(1) 除萘外, 16种优先控制PAHs在浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中均有检出, PAHs总浓度介于 $(12.95 \sim 156.05) \times 10^{-9}$, 特征分子比值法和SPSS分析结果均表明本研究区域中PAHs主要来源于陆源输入的煤炭以及石油的燃烧, 并有部分石油源。不同站位的PAHs检出种类不同, 其污染程度差异明显, 由于沿岸经济发达的瓯江和闽江带来的陆源污染输入, 导致PAHs浓度呈现为瓯江口外海域与闽江口外海域含量较高, 但研究区PAHs污染状况相对于国内外其他地区总体上仍属于较低水平。

(2) 浙闽沿岸泥质区南部表层沉积物中萘、芴和二苯并(a, h)蒽3种PAHs高于 ERL , 但低于 ERM , 其他PAHs均低于 ERL 。而苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(g, h, i)芘是无最低安全值的, 只要存在就是有生态风险。因此, 本研究区PAHs存在一定的生态风险, 应提前预防注意。港口区油气使用带来的环境问题不容忽视, 相关部门应该采取措施控制海域环境污染。

参考文献:

- [1] ZHANG A, ZHAO S, WANG L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay, China. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 113: 592-599.
- [2] ARMSTRONG B, FLETCHER T. Lung Cancer Risk after Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Review and Meta-Analysis[J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112(9): 970-978.
- [3] XIA Z, DUAN X, QIU W, et al. Health risk assessment on dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Taiyuan, China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5331-5337.
- [4] BOONYATUMANOND R, WATTAYAKORN G, TOGO A, et al. Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(8): 942-956.
- [5] 张宗雁, 郭志刚, 张干, 等. 东海泥质区表层沉积物中多环芳烃的分布特征及物源[J]. 地球化学, 2005, 34(4): 379-386.
- [6] 张道来, 刘娜, 叶青, 等. 青岛市区表层土壤多环芳烃分布特征、来源及潜在风险[J]. 城市环境与城市生态, 2016, 29(1): 7-12.
- [7] 江锦花, 朱利中, 张明. 椒江口水体和生物体中典型有机污染物的浓度水平及来源初探[J]. 环境化学, 2006, 25(5): 546-549.
- [8] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 839-846.
- [9] 李加付, 刘少鹏, 刘相敏, 等. 渤海及邻近海域表层沉积物中多环芳烃的来源解析[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 337-342.
- [10] 邹伟明, 母清林, 黄家海, 等. 南黄海西部表层沉积物中多环芳烃分布特征[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 53-57.
- [11] 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.
- [12] MAGI E, BIANCO R, IANNI C, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Adriatic Sea[J]. Environmental Pollution, 2002, 119(1): 91-98.
- [13] SOULO H H, GARRIGUES P, 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, 2000, 40(5): 387-396.
- [14] 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.
- [15] 徐方建, 李安春, 黄敬利. 东海陆架浙闽沿岸泥质沉积研究进展[J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 97-104.
- [16] FOSTER G D, WRIGHT D A. Unsubstituted polynuclear aromatic hydrocarbons in sediments, clams, and clam worms from Chesapeake Bay [J]. Marine Pollution Bulletin, 1988, 19(9): 459-465.
- [17] BOTELLO A V, VILLANUEVA S F, DIAZ G G, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Salina Cruz Harbour and Coastal Areas, Oaxaca, Mexico[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 36(7): 554-558.
- [18] 吕永龙, 苑晶晶, 李奇峰, 等. 陆源人类活动对近海生态系统的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1183-1191.
- [19] 张玉凤, 吴金浩, 李楠, 等. 渤海北部表层沉积物中多环芳烃分布与来源分析[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(1): 88-94.
- [20] LIU Y, CHEN L, ZHAO J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil of Shanghai, China: Concentrations, distribution and sources[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(4): 355-362.