

巢湖表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源*

宁 怡^{1,2}, 柯用春³, 邓建才^{1**}, 胡维平¹, 高俊峰¹, 赵振华²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(3: 三亚市南繁科学技术研究院, 三亚 572000)

摘 要: 于 2010 年, 采用野外采样调查、色谱分析与统计比较的方法, 研究巢湖表层沉积物中 27 个采样点中多环芳烃 (PAHs) 分布特征及污染来源。结果表明: 巢湖表层沉积物中检测出的 14 种优控 PAHs 总浓度为 116.0 ~ 2832.2 ng/g (DW), 平均值为 898.9 ± 791.0 ng/g (DW)。多环芳烃组成主要以 5~6 环 PAHs 为主, 占总量的 32%~58%。沉积物中总有机碳含量与 PAHs 总量呈现良好相关性。利用蒽/(蒽+菲)与苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+屈)比值法对 PAHs 来源进行解析得出, 巢湖表层沉积物中 PAHs 主要来源为燃烧源。与国内其它水体 PAHs 含量对比表明, 巢湖沉积物中 PAHs 污染处于中等水平。生态风险评估得出南淝河表层沉积物中 PAHs 存在生态风险, 其它采样点表层沉积物中 PAHs 生态风险均较低。

关键词: 巢湖; 多环芳烃; 表层沉积物; 来源

Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment in Lake Chaohu

NING Yi^{1,2}, KE Yongchun³, DENG Jiancai¹, HU Weiping¹, GAO Junfeng¹ & ZHAO Zhenhua²

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(3: *Sanya Science and Technology Academy for Crop Winter Multiplication, Sanya 572000, P. R. China*)

Abstract: To clarify polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination characteristics in Lake Chaohu, 27 surface sediment samples from different locations in the lake were collected in 2010. Concentrations of 14 kinds of PAHs measured by HPLC were identified as priority pollutants by the US EPA. The total concentration of PAHs ranged from 116.0 to 2832.2 ng/g dry weight, with an average value of 898.9 ± 791.0 ng/g dry weight. The profiles of PAHs showed that 5-and 6-ring PAHs were predominant, which accounted for 32%–58% of the total, respectively. A good correlation between TOC content and the total PAHs concentration was observed. Based on Anthracene/(Anthracene + Phenanthrene) and Benzo(a)anthracene/(Benzo(a)anthracene + Chrysene) ratios, PAHs originated largely from the high-temperature pyrolytic process. Risk assessment indicated that the sediment in Nanfei River was most likely to pose biological impairment, while low toxicological risk of PAHs was found in other sampling sites.

Keywords: Lake Chaohu; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); surface sediment; source

多环芳烃 (PAHs) 是一类由两个或两个以上苯环相连组成的有机化合物, 主要来源于有机物的不完全燃烧和交通排放等^[1]。PAHs 广泛分布于大气、土壤、水体、生物体等环境介质中, 因其具有致癌性和致突变

* 国家自然科学基金项目 (40902052) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2008ZX07526-002-08) 联合资助。2011-11-14 收稿; 2012-02-21 收修改稿。宁怡, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: ningyi@gmx.com.

** 通信作者; E-mail: jcdeng@niglas.ac.cn.

性,并在环境介质中持久存在,且易于在生物体内富集而倍受关注.美国环境保护局(EPA)将16种多环芳烃列入优先控制污染物名单,随后我国也将7种PAHs列入“中国环境优先控制污染物”的黑名单.由于PAHs溶解度低、疏水性强,进入水体后容易被颗粒物(如生物碎屑和胶体)吸附,并随着重力沉降作用在沉积物中积累^[2,4].然而蓄集于沉积物中的PAHs在再悬浮过程中会向水体释放,通过食物链传递给人体,对人类生存和发展构成潜在危害^[5-6].因此,研究沉积物中PAHs的组成、分布与来源对于评价其污染状况及其生态风险具有重要意义.

目前,我国在多环芳烃分布和来源方面开展的研究,主要集中于江河(口)^[7-11]等水体,但对湖泊沉积物多环芳烃污染研究相对较少^[12-13].巢湖是安徽省主要的水源地,也是重要的水上运输枢纽.近年来,随着周边以及上游地区社会经济的快速发展,入湖工业废水与生活污水不断增加^[14];湖区四周居民日常生活煤、柴燃烧以及交通运输、旅游与渔船燃油排放的PAHs通过河流及大气干湿沉降进入巢湖沉积物中.这些残留在沉积物中的PAHs对水生生态系统甚至居民生活可能产生不利影响.因此,本文通过测定巢湖表层沉积物中PAHs含量,分析其残留水平、组成与分布特征,并探讨其可能来源与生态风险,为巢湖不同环境介质中PAHs污染防治提供科学依据.

1 研究区概况

巢湖位于安徽省中部,形态呈鸟巢状,是我国第五大淡水湖,东西长54.5 km,南北平均宽度15.1 km,平均水深2.4 m.有杭埠河、丰乐河、派河、南淝河等入湖河流,湖水经裕溪河入长江.由于大量工业废水排入湖区,再加上近年来流域旅游事业高速发展,给巢湖水生态环境造成了巨大的压力^[15].

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

2010年8月,借助全球卫星定位系统,采用彼得逊采样器对巢湖表层沉积物进行采样.共布设27个采样点(图1),其中西湖区13个,湖中区6个,东湖区8个.样品采集后,运回实验室,于-30℃保存直至分析.

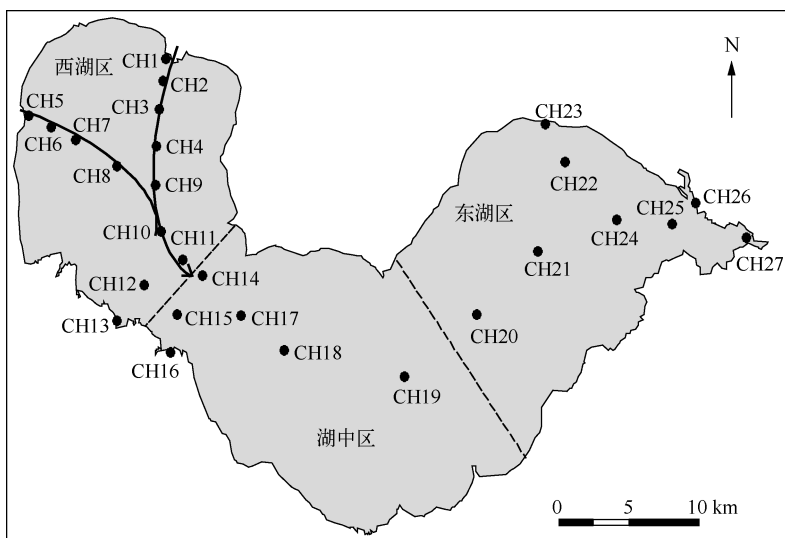


图1 巢湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Chaohu

2.2 样品预处理

沉积物样品经冷冻干燥研磨后过100目筛.多环芳烃的提取采用加速溶剂萃取法(ASE),取10 g样品与硅藻土混合后填满萃取池.以丙酮/正己烷混合液(体积比为1:1)作为提取剂,同时加入铜粉脱硫.萃取条

件如下:提取温度 125℃,系统压强 1500 psi,静态萃取时间 5 min,加热时间 7 min. 氮吹时间 60 s,循环 2 次. 收集萃取液,萃取液经浓缩后置换为正己烷,过自己填充的硅胶/氧化铝(质量比为 4:1)固相萃取柱. 15 ml 正己烷/二氯甲烷(体积比 7:3)淋洗,抽空. 收集淋洗液,用高纯氮气将淋洗液吹至近干,转换溶剂为乙腈,定容至 1 ml 待测.

2.3 仪器条件

美国 Agilent 公司高效液相色谱仪:Agilent Chemstation 工作站、Agilent 1200 系列紫外检测器、Agilent 1200 系列四元泵系统.

色谱柱:Agilent ZORBAX Eclipse XDB-C18(4.6 mm×250 mm,5 μm). 检测器:紫外检测器(254 nm).

色谱条件:柱温:25℃. 流动相:乙腈-水,流速 0.75 ml/min,线性梯度洗脱. 0~40 min 内,乙腈从 60% 变为 100%,保持至 50 min,然后在 10 min 之内,乙腈从 100% 变回至 60%. 进样量:6 μl. 紫外检测波长为 254 nm.

2.4 质量控制与保证

标样稀释为各种浓度样品以测定已建立方法的检出限,本实验中多环芳烃的检测限为 0.05~0.50 ng/ml. 方法回收率在 83%~182%,满足痕量分析的要求. 方法回收率通过加入已知浓度标准品,采用同一实验方法测得,最后实验结果均经回收率校正.

3 结果与讨论

3.1 PAHs 的空间分布及组成特征

美国 EPA 规定的 16 种优先控制的多环芳烃分别为萘(Nap)、苊烯(Any)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IP)、屈(Chr)和苯并[g,h,i]芘(BghiP). 在巢湖 27 个采样点沉积物样品中除苊烯及茚并[1,2,3-cd]芘外,其余 14 种均被检出. 巢湖表层沉积物中多环芳烃总浓度为 116.0~2832.2 ng/g(DW),平均值为 898.9±791.0 ng/g(DW). 从分布特征来看,PAHs 含量最高点为 CH1,达到 2832.2 ng/g(DW);CH2 次之,浓度为 2662.5 ng/g(DW),这与其处于南淝河入湖口有关(图 2a). 合肥市区大量的工业废水、农业废水及生活污水经过排污管道直接排入南淝河,经由南淝河进入湖体,人类活动影响较大^[16]. PAHs 含量最低点为 CH12,浓度为 116.0 ng/g(DW),临近的 CH15 采样点浓度为 166.9 ng/g(DW),较 CH12 采样点略高. 这可能是由于其远离重污染区所致,另外湖水的稀释作用也是重要原因,采样点 CH12 及 CH15 处于丰乐-杭埠河至湖心的流向上,而丰乐-杭埠河是注入巢湖水量最大的河流,占总径流量的 65.1%,频繁的水体流动对污染物的稀释起了重要的作用. 巢湖不同湖区多环芳烃的污染情况也不尽相同,西湖区多环芳烃浓度最高,东湖区次之,湖中区最低,其浓度均值分别为 1193.9±976.0、888.6±430.0 和 273.5±111.0 ng/g(DW)(图 2b). 何开丽将巢湖分为东、西半湖,发现西半湖 PAHs 污染程度远高于东半湖^[17],与本研究结论基本一致.

通常多环芳烃来源较为复杂,不同成因的多环芳烃结构和组分存在差异,其环境行为也不同^[18],因此,阐明环境中多环芳烃的组成特征,可为了解其污染提供重要的信息. 巢湖表层沉积物中主要以 5~6 环 PAHs 为主,占总量的 32%~58%;2~3 环 PAHs 次之,占总量的 14%~51%;4 环 PAHs 最少,占总量的 14%~36%(图 3). 巢湖 27 个采样点表层沉积物中 Phe、Pyr、BbF、BaP 及 BghiP 浓度较高,这 5 种组分含量总和占巢湖表层沉积物 PAHs 总量的 57%. 邹爱红^[19]在研究巢湖水体有机物中也指出巢湖湖区污染与主要入湖河流污染有关,其研究得出巢湖水体中以 2 环 PAHs 为主,这可能是由 PAHs 物理性质决定的,随着环数的增多,分子量增加,水溶性降低,从而高环 PAHs 多环芳烃吸附在悬浮颗粒物上与外源输入共同进入沉积物中,这也可能是本实验中的沉积物以 5~6 环 PAHs 为主的原因.

3.2 河口至湖心表层沉积物中 PAHs 分布特征

由于流域地形、地貌条件的制约,巢湖流域形成的高密度水系呈放射状汇入巢湖,最终经裕溪河与长江进行水体交换^[20],因此 PAHs 的空间分布除受到沿岸人类活动的影响外,也与巢湖流域特殊的水动力条件密切相关. 由南淝河口向湖心延伸,表层沉积物中 PAHs 浓度呈明显的下降趋势;但是派河口向湖心方向

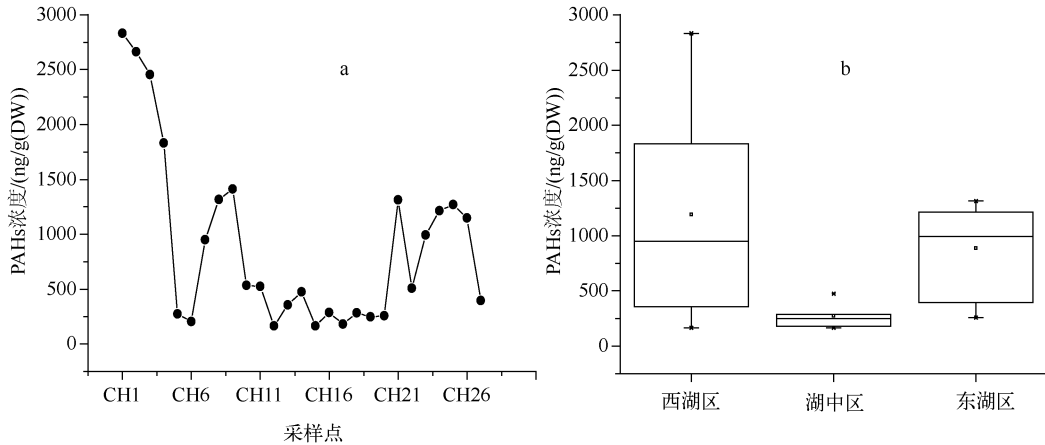


图2 巢湖表层沉积物多环芳烃含量分布

Fig. 2 The concentration of PAHs in the surface sediment of Lake Chaohu

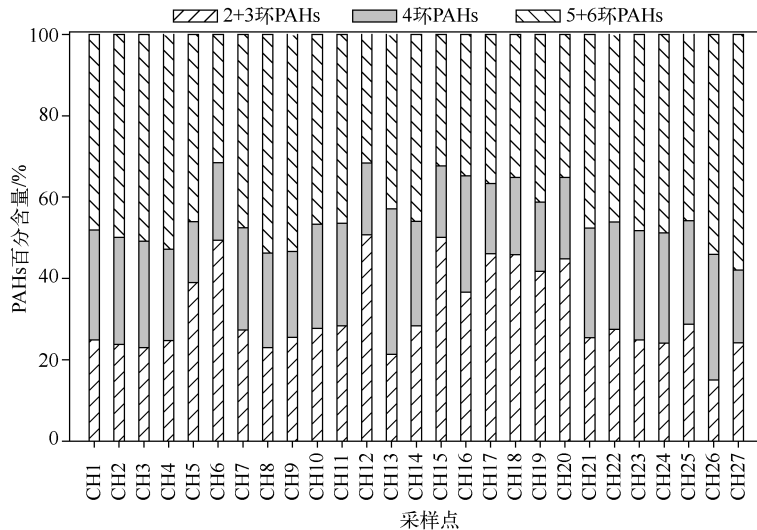


图3 巢湖表层沉积物多环芳烃的组成特征

Fig. 3 The profiles of PAHs in the surface sediment of Lake Chaohu

随着距离增加,沉积物中 PAHs 浓度先呈上升趋势,在采样点 CH9 处达到最高点,随后呈下降趋势(图 4)。南淝河河口处于河湖交界区域,Lisitsin^[21]的研究表明由于“边际过滤效应(marginal filter)”存在,在交界区域,90%~93%的悬浮颗粒物都会因各种物理化学作用而沉淀,而 PAHs 主要吸附在悬浮颗粒物上,这直接导致 PAHs 浓度随着离岸距离的增加而减小,另外水体的稀释作用在 PAHs 浓度变化中也起了重要的作用。在由派河河口向湖心的流动过程中,“边际过滤效应”、水体稀释的共同作用且受到南淝河严重污染的影响,在初始阶段南淝河污染的影响占到主导地位,致 PAHs 浓度呈上升趋势,随着离岸距离增加,南淝河污染影响减小,“边际过滤效应”及水体稀释作用占主导,这是导致 PAHs 浓度在这一阶段下降的主要原因。巢湖污染底泥的分布特征符合湖泊沉积学规律,即表层沉积物属于严重污染层,富含有机质。但由于在派河河口进行了生态底泥疏浚工程,富含有机质的表层沉积物被清除,故导致靠近派河河口的 CH5、CH6 多环芳烃浓度较低。

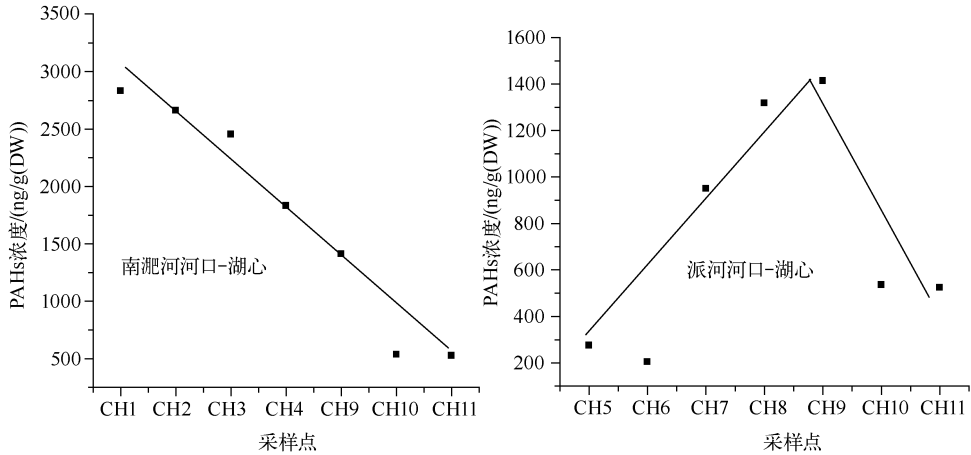


图4 河口向湖心流向沉积物中多环芳烃含量变化趋势

Fig. 4 The trend of PAHs from river mouth to centre of lake in the surface sediment of Lake Chaohu

由于水溶性低,辛醇水分配系数高,PAHs等疏水性有机污染物80%以上分配富集在沉积物的有机质中^[9].沉积物中由于富含有机质,因此具有复杂的孔隙结构,其孔隙结构具有快速吸附的外表面及缓慢吸附的内表面,因而极易吸附PAHs,从而成了PAHs的蓄积库.巢湖表层沉积物中多环芳烃含量与总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)呈显著的线性相关(图5),具有高多环芳烃浓度的南淝河河口有机质含量明显较高,这说明沉积物中的有机质在控制区域PAHs的归宿上起着一定的作用(表1). Karickhoff、Wang等的研究也指出TOC是沉积物中吸附PAHs的控制因子^[22-23].

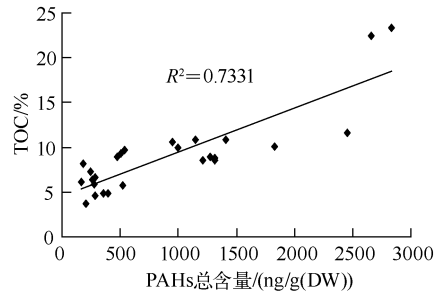


图5 巢湖表层沉积物中PAHs与TOC的关系
Fig. 5 Correlation analysis between contents of PAHs and TOC in the surface sediment of Lake Chaohu

表1 巢湖表层沉积物中TOC含量

Tab. 1 The concentration of TOC in the surface sediment of Lake Chaohu

点位	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14
TOC/g	23.41	22.35	11.60	10.10	5.83	3.64	10.63	8.82	10.89	9.71	5.70	6.15	4.82	8.97
点位	CH15	CH16	CH17	CH18	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	CH24	CH25	CH26	CH27	
TOC/g	6.13	4.63	8.13	6.67	7.30	6.38	8.59	9.32	10.00	8.59	8.97	10.80	4.89	

3.3 多环芳烃的来源

多环芳烃主要来源于自然源和人为源.自然源包括森林大火、火山喷发和生物合成等;人为源主要包括石油污染相关的PAHs及燃烧产生的PAHs^[24].目前用于甄别环境中PAHs污染源的方法主要有比值法、特征化合物法、轮廓图法和多元统计法等^[25],其中比值法由于简单、易用而得到广泛应用. Ant/(Ant + Phe)和BaA/(BaA + Chr)值可用于区分PAHs的来源是燃烧还是原油污染. Ant/(Ant + Phe) < 0.1表明PAHs源自原油污染,而Ant/(Ant + Phe) > 0.1则表明是燃烧源;BaA/(BaA + Chr) < 0.2,表示石油源, BaA/(BaA + Chr) > 0.2则表示燃烧源.判断巢湖表层沉积物中PAHs污染来源的Ant/(Ant + Phe)比值为0.13~0.33(图6),表明PAHs来源为木材、煤及焦炉等燃烧源;BaA/(BaA + Chr)值为0.40~0.64,表明PAHs以汽油、木材及煤等燃烧为主要来源.以上两种方法均表明巢湖表层沉积物中PAHs来源于燃烧.巢湖周边地区交通

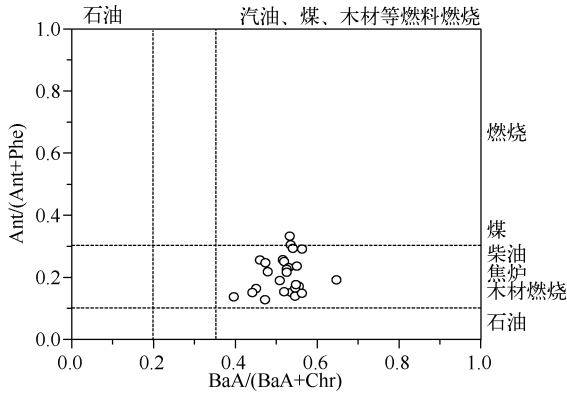


图6 巢湖表层沉积物中 PAHs 的来源诊断

Fig. 6 Sources identification of PAHs in the surface sediment of Lake Chaohu

表2 国内其他地区河流、湖泊及海湾表层沉积物多环芳烃比较*

Tab. 2 Comparison of concentrations of PAHs in the surface sediment from various regions in China

采样点	多环芳烃种类	PAHs 浓度/(ng/g(DW))
江河	珠江三角洲 ^[29]	25
	珠江河口 ^[8]	16
	黄浦江 ^[30]	16
	第二松花江中下游 ^[31]	5
	黄河干流 ^[32]	16
	淮河(淮南-蚌埠段) ^[33]	16
湖泊	江苏云龙湖 ^[13]	15
	白洋淀 ^[26]	16
	天目湖 ^[34]	16
	南四湖 ^[35]	16
	安徽巢湖 ^[本研究]	14
海湾	渤海湾近岸 ^[10]	10
	南海近岸带 ^[8]	16
	台州湾海域 ^[11]	15
	香港维多利亚港 ^[36]	8

* 括号内为平均值.

PAHs 的浓度则高出巢湖表层沉积物 2~6 倍(表 2). 综上可知, 巢湖表层沉积物中 PAHs 污染程度与国内其它河流、河口及近海海岸相比处于中等污染水平.

3.5 巢湖表层沉积物中多环芳烃的生态风险评估

低分子量(2~3 环) PAHs 具有显著急性毒性, 而某些高分子量 PAHs 则有潜在的致癌作用^[37]. Long 等^[38] 提出了沉积物中 PAHs 潜在生态风险低值(Effects Range Low, ERL)和中值(Effects Range Median, ERM). 当污染物含量大于 ERM, 则产生严重的生态风险; 当污染物含量在二者之间, 则具有潜在的生态风险; 当污染物含量小于 ERL, 则不产生负面生态风险. 大部分采样点沉积物中多环芳烃含量均低于对应化合物的 ERL 值, 仅南淝河口沉积物中的萘、蒽、二苯并[a, h]蒽、芴、菲高于相应的 ERL, 但小于相应的 ERM

网络由国道、高速路、市/区级公路等组成, 交通便利, 污染较严重. 目前使用汽油为燃料的机动车数量最多, 使用柴油和天然气为燃料的相对较少, 致使沉积物中可以检测出明显的汽油燃烧源; 另外城市中汽车燃烧产物和家庭燃烧产物中较高浓度的 PAHs 随着雨水的冲刷进入水体, 最终进入到沉积物中, 成为巢湖表层沉积物中 PAHs 的另一个人为来源; 随着巢湖周边区域旅游业的开发, 使用柴油或者汽油为燃料的游船增多, 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 PAHs 的一个主要来源.

多环芳烃环数相对丰度可以反映来自热解或石油类污染^[26]. 有研究显示, 高分子量的 4 环和 5~6 环 PAHs 主要来自燃烧源, 而低分子量的 2~3 环 PAHs 则主要来自石油类物质的输入^[27-28]. 巢湖表层沉积物中以 5~6 环 PAHs 为主, 占总量的 32%~58%, 表明燃烧源(如汽车尾气、煤及木材燃烧)是该区域沉积物中 PAHs 的主要来源. 这与比值法所得出的结论是一致的.

3.4 巢湖表层沉积物中多环芳烃污染水平

巢湖表层沉积物中 PAHs 浓度与珠江三角洲相近, 处于同一水平; 与珠江河口、淮河、江苏云龙湖、白洋淀、渤海湾近岸、南海近岸带和台州湾海域相比, 高出 2~69 倍; 而经济发达地区的河流、河口及近海海岸, 如香港维多利亚港、黄河干流、第二松花江中下游及黄浦江沉积物中

(表3),可见目前巢湖表层沉积物中多环芳烃生态风险较小,但是随着城市快速发展、汽车使用数量的大幅度增加,加上 PAHs 不易被分解、在中长时间存在特性,其潜在的生态风险仍不能被忽视.

4 结论

14 种优先控制 PAHs 在巢湖表层沉积物各采样点均有检出,具有高致癌性的 5~6 环 PAHs 占较大比例.巢湖表层沉积物 PAHs 与有机质含量呈显著的线性相关,主要来源于汽油、木材及煤的燃烧.与国内其它地区水体比较得出,巢湖表层沉积物中 PAHs 污染程度处于中等污染水平,但除南淝河口外,巢湖其他表层沉积物 PAHs 生态风险较小.

5 参考文献

[1] 朱 樱,吴文婧,王军军等.小白洋淀水-沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险.湖泊科学,2009,21(5):637-646.

[2] 欧冬妮,刘 敏,许世远等.基于多参数指标的长江口滨岸多环芳烃来源辨析.地理学报,2008,63(5):535-543.

[3] Lauenstein GG, Kimbrough KL. Chemical contamination of the Hudson-Raritan Estuary as a result of the attack on the World Trade Center: Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in mussels and sediment. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 284-294.

[4] Yang Z, Feng J, Niu J *et al.* Release of polycyclic aromatic hydrocarbons from Yangtze River sediment cores during periods of simulated resuspension. *Environmental Pollution*, 2008, 155: 366-374.

[5] Latimer JS, Davis WR, Keith DJ. Mobilization of PAHs and PCBs from in-place contaminated marine sediments during simulated resuspension events. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1999, 49: 577-595.

[6] Schneider A, Porter E, Baker A. Polychlorinated biphenyl release from resuspended Hudson River sediment. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 1097-1103.

[7] 许士奋,蒋 新,王连生等.长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物.中国环境科学,2000,20(2):128-131.

[8] 罗孝俊,陈社军,麦碧娟等.珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源.环境科学,2005,26(4):129-134.

[9] 陈卓敏,高效江,宋祖光等.杭州湾潮滩表层沉积物中多环芳烃的分布及来源.中国环境科学,2006,26(2):233-237.

[10] 林秀梅,刘文新,陈江麟等.渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评价.环境科学学报,2005,25(1):70-75.

[11] 江锦花.台州湾海域表层沉积物中多环芳烃的浓度水平、富集规律及来源.海洋通报,2007,26(4):85-90.

[12] 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.河海大学学报:自然科学版,2004,32(6):607-610.

[13] 丁文文,韦 萍.徐州市云龙湖沉积物中多环芳烃的污染研究.安徽农业科学,2007,35(34):11197-11198.

[14] 李如忠.巢湖水环境生态修复探讨.合肥工业大学学报:社会科学版,2002,16(5):130-133.

[15] 王 睿.巢湖流域水环境质量评价与水质预测模型研究[学位论文].合肥:合肥工业大学,2009.

[16] 纪 岚,杨立武,李 菁等.南淝河水污染现状与可持续发展对策研究.安徽大学学报:自然科学版,2006,30(4):91-94.

[17] 何开丽.巢湖富营养化现状与治理对策.环境保护,2004,4:22-24.

[18] 周怀东,赵 健,陆 瑾.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.生态毒理学报,2008,3

表3 巢湖表层沉积物多环芳烃生态风险评估
(ng/g(DW))

Tab.3 Toxicity evaluation of PAHs for the surface sediment of Lake Chaohu

PAHs	ERL	ERM	本研究
萘	16	500	1.1~101.3
蒽	85	1100	3.0~129.3
苯并[a]蒽	261	1600	5.8~259.8
苯并芘	430	1600	4.3~331.2
屈	384	2800	5.8~226.9
二苯并[a,h]蒽	63	260	2.2~123.8
荧蒽	600	5100	0.7~45.8
芴	19	540	9.2~129.2
萘	160	2100	11.4~83.1
菲	240	1500	18.5~261.2
芘	665	2600	15.0~232.1

- (3): 291-299.
- [19] 邹爱红. 巢湖西半湖水体中有机污染物监测及污染现状的研究[学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [20] 张生根. 基于 GIS 的巢湖流域考古信息系统研究与建设. 测绘与空间地理信息, 2007, 30(4): 28-32.
- [21] Lisitsin AP. Marginal filter of the oceans. *Oceanologia*, 1994, 34(5): 735-747.
- [22] Karickhoff SW, Brown DS, Scott TA. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments. *Water Research*, 1979, 13: 241-248.
- [23] Wang XC, Zhang YX, Chen RF. Distribution and partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different size fractions in sediments from Boston Harbor, United States. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42: 1139-1149.
- [24] 包 贞, 潘志彦. 环境中的多环芳烃的分布及降解. 浙江工业大学学报, 2003, 31(5): 528-533.
- [25] 程远梅, 祝凌燕, 田胜艳等. 海河及渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与来源. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2420-2426.
- [26] 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. 环境科学研究, 2009, 22(3): 321-326.
- [27] Soclo HH, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments; case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 40: 387-396.
- [28] 张枝焕, 卢 另, 贺光秀等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析. 生态环境学报, 2011, 20(4): 668-675.
- [29] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价. 生态毒理学报, 2006, 1(1): 17-24.
- [30] 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. 环境化学, 2005, 24(6): 703-707.
- [31] 陆继龙, 蔡 波, 郝立波等. 第二松花江中下游河段底泥中多环芳烃的初步研究. 岩矿测试, 2007, 26(4): 325-327.
- [32] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常. 黄河沉积物中多环芳烃的分布特征及来源分析. 环境科学研究, 2005, 18(2): 48-50.
- [33] 王 庆, 丁 毅, 李玉成等. 淮河淮南—蚌埠段沉积物中的多环芳烃污染性状研究. 宿州学院学报, 2007, 22(6): 103-106.
- [34] 舒卫先, 李世杰. 江苏天目湖表层沉积物中多环芳烃污染特征与来源. 长江流域资源与环境, 2009, 18(1): 27-32.
- [35] 史双昕, 杨永亮, 石 磊等. 南四湖表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源. 青岛大学学报: 工程技术版, 2005, 20(4): 95-99.
- [36] Hong GH, Xu L, Zhang L *et al.* Environmental fate and chemistry of organic pollutions in the sediments of Xiamen and Victoria Harbors. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31: 229-236.
- [37] 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. 湖泊科学, 2009, 21(5): 647-653.
- [38] Long ER, Macdonald DD, Smith SL *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuary sediments. *Environmental Management*, 1995, 19: 81-97.