

微山湖表层沉积物中多环芳烃的分布及风险评价

郑 曦^{1,2}, 韩宝平¹

(1.中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008; 2.徐州师范大学生命科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:采用现场采样及室内高效液相色谱分析测试的方法,探讨了微山湖表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的分布,并进行了风险评价。结果表明,微山湖表层沉积物中 16 种优控 PAHs 的总量范围在 324.93~1 576.65 ng·g⁻¹(干重)之间,平均值为 699.01 ng·g⁻¹,属中等污染水平,沉积物中的多环芳烃主要来源于煤炭、木材及石油的不完全燃烧。利用沉积物质量基准法(SQGs)、沉积物质量标准法分别对微山湖沉积物中多环芳烃的风险评价表明,严重的多环芳烃生态风险在微山湖沉积物中不存在,负面生物毒性效应则会偶尔发生,风险主要来源于低环的多环芳烃,以苈(Flu)和苌(Ace)为主。

关键词:微山湖;多环芳烃;表层沉积物;沉积物质量评价

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2185-07

Content Analysis and Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments from Weishan Lake, China

ZHENG Xi^{1,2}, HAN Bao-ping¹

(1.School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2.School of Life Science, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As an important storage lake of The Grand Canal(Northern Section of Jiangsu Province), the water quality of Weishan Lake will significantly affect the efficiency of Water Transfer Project from South to North. In order to define the levels of PAHs in Weishan Lake, ten sediment samples were collected from the lake in Weishan County, China, in 2009. In this study, 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were quantitatively determined by HPLC. The concentration(dry weight) of PAHs varied from 324.93 ng·g⁻¹ to 1 576.65 ng·g⁻¹, with average 699.01 ng·g⁻¹, which was in moderate level compared with other lakes. A significant difference in the PAHs pollution was observed at different regions. There were three regions(Weishan island, Erji dam and Shizi-xuehe river estuary) with the severer PAHs pollution in Weishan Lake, and the distribution of PAHs was closely related with human activities. The indexes of source identification indicated the main source of PAHs in the samples was combustion source, which included coal, oil and wood inadequate combustion. The ecological risk of surface sediment in Weishan Lake was assessed with the methods of sediment quality guidelines(SQGs) and sediment quality standards(SQs). The results showed that the concentration levels of PAHs in the study area had not caused the marked negative influence on organism. However Flu and Ace compounds were present in excess of the lower ERL, and biological effects might exist; The adverse biological toxicity effect might occasionally happen in Weishan Lake.

Keywords: Weishan Lake; PAHs; surface sediment; assessment of sediments' quality

多环芳烃(PAHs)是一类由两个或两个以上苯环构成的有机化合物,具有稳定的苯环结构。由于 PAHs 结构稳定,很难降解,且具有致癌、生物蓄积及长距离迁移效应等持久性有机污染物(POPs)所具有的特

性,美国环保署(US EPA)已选定 16 种 PAHs 作为其优先监控的指标。PAHs 可通过多种途径进入河口及岸带环境中,由于 PAHs 的疏水性及低水溶性,水环境中绝大部分 PAHs 吸附在颗粒物或转移至生物有机体内,并最终进入沉积物中。沉积物介质中 PAHs 的研究获得普遍关注,国内外均有大量报道^[1-6]。从 20 世纪 90 年代中期开始,国内对沉积物中 PAHs 的研究也逐渐增多,有关报道主要集中在含量、来源及污染水平上^[7-9]。童宝锋等^[7]研究了北京玉渊潭水相、悬浮

收稿日期:2010-02-27

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2008121)

作者简介:郑 曦(1971—),女,江苏徐州人,副教授,在读博士研究生,主要从事植物及环境生物学方面的研究。

E-mail:zhengxi824@163.com

物和沉积物中多环芳烃的含量、分布特征及污染来源。舒卫先、李世杰^[9]在太湖流域选择典型湖泊天目湖和太湖梅梁湾分别采集 7 个表层沉积物 (0~2 cm) 样品, 利用 GC/MS 分析了样品中 16 种优控多环芳烃。江锦花^[9]研究表明, 台州湾海域表层沉积物中 PAHs 的浓度范围为 85.4~167.6 ng·g⁻¹, 平均值为 138.62 ng·g⁻¹, 总多环芳烃的最大值是椒江码头。水体沉积物成为水环境中潜在的 PAHs 污染源, 了解水体沉积物中 PAHs 的分布、含量及来源对加强环境管理及保护十分重要。

南四湖由南阳、昭阳、独山和微山 4 个无明显分界的湖泊组成, 是山东省最大的多功能、水库型淡水湖。自 1960 年二级坝建成后, 南四湖通常被分为两部分, 二级坝以北包括南阳、昭阳、独山为上级湖, 以南主要是微山湖为下级湖。

目前, 南四湖污染状况相当严重。对南四湖沉积物中污染物质的研究已有关于重金属、硫化物、多氯联苯以及 DDT、六六六的报道^[10-13], 但对严重威胁人类健康的致癌、致突变物质多环芳烃的污染研究至今仍处于起步阶段。史双昕等^[14]对南四湖 4 个湖区 5 个站位的表层沉积物样品的研究表明, 南四湖表层沉积物中 PAHs 几乎全部由人类活动产生, 源为煤炭燃烧、木材燃烧、石油类高温裂解及油类污染。朱晨等^[15]对南四湖上级湖表层沉积物中的 15 种美国环保署 (US EPA) 优控多环芳烃 (PAHs) 进行了定量分析。测定结果表明, 沉积物中 15 种 PAHs 总含量范围为 163.0~2 983.8 ng·g⁻¹ (DW), 处于低风险水平, 尚未对生物造成显著的负面影响。但对于水面最大的下级湖——微山湖表层沉积物中 PAHs 的分布及含量却未见相关报道。微山湖作为“南水北调”东线工程重要的蓄水湖, 在南水北调工程正式输水后, 其河流底泥将扮演着“源”的角色, 会源源不断地向水中释放 PAHs, 恶化南水北调的水质, 直接关系到整个东线工程的水质状况。因此, 有必要对微山湖沉积物中多环芳烃的含量、分布、以及污染来源开展较为详细的研究。本文采用高效液相色谱法对微山湖下级湖表层沉积物中的 PAHs 进行分析测试, 对其含量、来源及生态风险进行了初步探讨。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2009 年 7 月用金属抓斗式采样器采集微山湖湖底表层沉积物样品, 具体采样点位见表 1 与图 1。

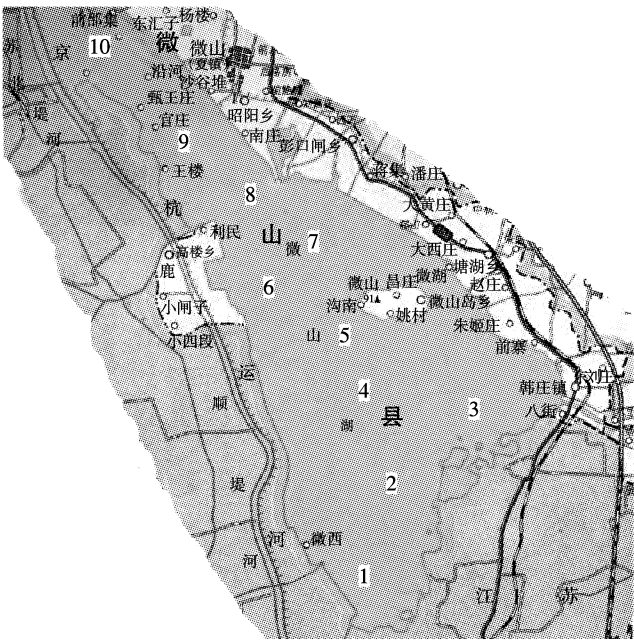


图 1 微山湖采样点分布

Figure 1 Map of sampling sites in Weishan Lake

表 1 微山湖采样点位置

Table 1 Sampling sites in Weishan Lake

样点	北纬	东经	位置说明
1	34°32'23"	117°13'44"	湖区
2	34°35'37"	117°16'12"	湖区
3	34°35'44"	117°19'57"	湖区
4	34°36'16"	117°16'14"	湖区
5	34°36'20"	117°13'31"	微山岛附近
6	34°36'17"	117°11'31"	湖区
7	34°40'24"	117°10'7"	湖区
8	34°42'49"	117°07'38"	薛河、十字河入口
9	34°45'18"	117°05'31"	湖区
10	34°48'18"	117°02'15"	二级坝附近

底泥样品风干后, 研磨过 100 目筛, 于 -20 ℃ 保存直到分析。精确称取 10 g 样品, 加入 50 mL 正己烷/丙酮混合溶液 (1:1, 体积比) 放置过夜。超声 (20 ℃) 处理 1 h, 4 000 r·min⁻¹ 离心 20 min, 萃取液旋蒸至约 1 mL, 过装有 1 g 无水硫酸钠和 2 g 硅胶的层析柱净化, 以 8 mL 正己烷预洗, 10 mL 正己烷/二氯甲烷混合溶液 (1:1, 体积比) 洗脱, 收集洗脱液旋蒸浓缩 (30 ℃) 至干, 用甲醇精确定容到 1.0 mL, 用 HPLC 进行 PAHs 分析^[16]。

色谱条件: 柱温为 40 ℃; 流动相为 80:20 (体积分数) 的甲醇: 水; 流速为 1.0 mL·min⁻¹; 进样量为 25 μL; 检测器为双波长紫外检测器; 检测波长为 254 nm。

1.2 主要仪器与试剂

高效液相色谱仪: 岛津液相色谱仪包括 LC-20AT 梯度泵, SPD-20A 二级管阵列紫外检测器。ODS-C18, 25 cm×0.46 mm 反相色谱柱; KQ-550DE 型医用数控超声波清洗器; SHZ-Ⅲ型循环水真空泵; RE-52AA 旋转蒸发仪; TDL-5 台式离心机; Simplicity 185 超纯水系统; 微量(25 μL)注射器。

16 种 PAHs 混合标样(PAH-Mix)购自美国 AccuStandard 公司, 浓度均为 0.1 mg·mL⁻¹; 甲醇、正己烷、二氯甲烷、丙酮(国药集团)均为高效液相色谱纯, 真空抽滤后排气备用; 无水硫酸钠、层析硅胶(100~200 目)为分析纯(使用前在马弗炉中 550 ℃烘焙 4 h, 放在干燥器中备用)。实验用水采用 Simplicity 185 超纯水系统处理。

样品检测的同时完成方法空白和程序空白。方法空白除萘有检出外, 其他无检出, 最后结果经回收率校正和空白扣除。

2 结果与分析

2.1 微山湖表层沉积物中 PAHs 的含量

在国内外许多相关研究中, 通常选择环境优先控制的 USA16 种典型 PAHs 的含量之和(ΣPAH)评价

其污染水平^[17-18]。微山湖各采样点位的 PAHs 总含量见表 2。由表 2 可见, 所测定的样品中 ΣPAH 含量范围在 374.93~1 576.65 ng·g⁻¹ 之间, 平均值为 699.01 ng·g⁻¹, 与国内其他水体相比, 处于中等污染水平^[17-9, 19-20]; PAHs 高值出现在 5#、8#、10# 点, ΣPAH 浓度分别为 874.87、1 173.06、1 576.65 ng·g⁻¹。5# 点靠近微山岛, 该岛有人居住, 生产生活污水基本上未经过处理, 直接排入湖中; 8# 点位于十字河与薛河的河口附近, 流经微山、枣庄两市, 接纳部分工业和生活污水; 10# 点位于南四湖最窄处, 紧邻二级坝, 水坝的拦截使得沉积物极易在此处堆积, 造成其 ΣPAH 浓度显著高于湖区的监测点位; 而位于湖区的点位 ΣPAH 浓度均较低。

2.2 微山湖沉积物中 PAHs 的源解析

2.2.1 运用 LMW/HMW 比值判断

通常认为^[21-22], 主要源于石油泄漏的石油源 PAHs 中一般 2、3 环 PAHs 化合物(LMW)的比例较高; 而来自煤炭、木材、石油等有机物不完全燃烧的化石燃料燃烧源 PAHs 中 4~6 环 PAHs 化合物(HMW)的比例较高。因此, 当 LMW/HMW 大于 1 时, 认为 PAHs 化合物主要来自石油源; 而 LMW/HMW 小于 1 时, 则判定 PAHs 化合物主要来自煤炭、木材、石油等的燃烧。

表 2 微山湖表层沉积物中 PAHs 的含量(ng·g⁻¹)

Table 2 Data of 16 PAHs in the sediments from Weishan Lake sediment-dredging(ng·g⁻¹)

化合物	采样点编号										平均
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	
Nap	184.5	115.4	119.2	126.1	192.4	149.4	127.4	156.98	123.02	228.5	152.29
Acy	nd	8.79	13.14	7.19	nd	nd	6.83	7.09	6.71	37.09	12.41
Ace	53.3	23.76	61.65	58.84	178.57	31.34	58.82	156.98	58.82	225.1	90.72
Flu	70.2	45.3	70.07	67.82	91.33	50.8	69.01	130.3	66.76	159.83	90.62
Phe	89.76	139.69	132.56	134.08	165.78	118.97	78.99	205.78	154.66	357.98	101.83
Ant	12.5	30.6	29.05	21.33	73.4	12.97	30.67	84.9	34.06	95.89	42.54
Fla	18.45	17.23	29.06	13.68	32.94	7.87	9.71	96.83	20.56	125.79	34.2
Pyr	12.56	12.78	4.83	7.53	13.32	1.05	7.09	16.98	19.75	32.93	11.88
BaA	23.7	18.86	13.89	20.65	82.72	5.69	17.54	12.1	13	10.99	21.91
Chy	34.23	30.5	11.23	14.89	nd	39.74	13.32	37.86	13.1	52.98	27.54
BbF	8.79	29.67	nd	nd	33.01	9.47	nd	25.98	nd	nd	21.38
BkF	nd	nd	33.45	23.97	30.61	nd	35.76	nd	32.12	35.23	32.11
BaP	47.32	23.76	nd	nd	311.5	10.23	nd	42.78	nd	nd	24.38
DBahA	27.58	nd	25.06	37.86	115.3	nd	29.98	nd	30.57	81.36	40.97
BghiP	53.96	128.34	17.38	40.86	31.45	38.05	70.65	190.7	16.08	132.98	72.05
IPY	nd	8.63	nd	nd	nd	nd	nd	7.8	nd	nd	8.22
ΣPAH	490.47	532.8	497.99	474.8	874.87	374.93	555.77	1 173.06	489.51	1 576.65	699.01

注: nd 代表未检测出。

由表 3 可见,本次监测的 10 个微山湖表层沉积物样品中,监测点位的 LMW/HMW 的比值均小于 1,表明监测点位的 PAHs 来源于煤炭、石油等化石燃料的不完全燃烧。

2.2.2 运用菲/蒽和荧蒽/芘比值判断

由于多环芳烃的特性,其特殊成分(菲/蒽和荧蒽/芘)的比值可以标识蒸馏石油的残渣。常用菲/蒽(Phen/Ant)和荧蒽/芘(Fla/Pyr)来判断多环芳烃的来源^[23-24]。当荧蒽/芘比值大于 1 或菲/蒽比值小于 10 时,认为 PAHs 主要来自化石燃料的不完全燃烧;荧蒽/芘比值小于 1 或菲/蒽比值大于 10,则来自石油源。本次监测的微山湖表层沉积物中荧蒽/芘、菲/蒽的比值见表 3。可以看出,所有点位均为菲/蒽比值小于 10、荧蒽/芘比值大于 1,提示监测点位的 PAHs 来源于煤炭、石油等化石燃料的不完全燃烧。

综上所述,微山湖沉积物中的多环芳烃主要来源于煤炭、生活燃柴的不完全燃烧和来往养殖船只的燃油排放。

2.3 微山湖沉积物中 PAHs 的风险评价

2.3.1 沉积物质量基准法

沉积物质量基准法(SQGs)是评估淡水、港湾和海洋沉积物质量的有用工具^[6,25],常用的评价基准为:当沉积物中某种 PAHs 的浓度低于效应范围低值(ERL),表明生物毒性效应很少发生;当污染物浓度高于效应范围中值(ERM)时,表明生物毒性效应将频繁发生;如果介于二者之间,生物毒性效应会偶尔发生^[26-28]。相对污染系数(RCF)是沉积物中 PAHs 浓度与 ERL 的比值,是表征 PAHs 潜在生物毒性风险的量化指标。

用 SQGs 评价微山湖表层沉积物中 PAHs 的生物毒性效应见表 4,其中列出 12 种 PAHs 的 ERL 和 ERM 值。根据风险评价标准可知,各采样点每一种多环芳烃和多环芳烃总量远低于效应区间中值(ERM),这表明严重的多环芳烃生态风险在微山湖沉积物中不存在。同时表中也显示,微山湖的相对污染系数(RCF)结果>1,即负面生物毒性效应会偶尔发生,并且这些点位显示低分子量 PAHs 的负面毒性效应显

表 4 微山湖表层沉积物中 PAHs 的质量基准评价表(ng·g⁻¹,干重)
Table 4 Assessment according the quality guidelines to PAHs in surface sediments of Weishan Lake(ng·g⁻¹, dw)

PAHs	ERL	ERM	含量范围	RCF=PAHs/ERL>1 的点位编号
Nap	160	2 100	115.4~228.5(3)	1,5,10
Ace	16	500	23.76~225.1(10)	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Acy	44	640	6.71~37.09	
Flu	19	540	45.3~159.83(9)	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Phe	240	1 500	89.76~357.98(1)	10
Ant	85.3	1 100	12.5~95.89(1)	10
Fla	600	5 100	7.87~125.79	
Pyr	665	2 600	1.05~32.93	
BaA	261	1 600	5.69~82.72	
Chy	384	2 800	11.23~52.98	
BaP	430	1 600	23.76~311.5	
DahA	63.4	260	25.06~85.36(2)	5,10
ΣPAHs	4 022	40 792	324.13~1 576.65	

注:括号内的数字代表超过 ERL 值的样点数。

著,微山湖表层沉积物尤以芴(Flu)和芘(Ace)为重。5# 和 10# 样品中 PAHs 含量超过 ERL 值的频率较高,表明发生生物毒性效应的概率较高。

2.3.2 沉积物质量标准法

我国目前尚未颁布相关 PAHs 的沉积物质量标准,本研究采用加拿大魁北克省 2006 年最新颁布的沉积物质量标准对微山湖开展评价^[29],该标准包含 5 个阈值,分别为生物毒性影响的罕见效应浓度值(REL)、临界效应浓度值(TEL)、偶然效应浓度值(OEL)、可能效应浓度值(PEL)和频繁效应浓度值(FEL),12 种 PAHs 的上述 5 个阈值见表 5。这 5 个阈值的划分可作为环境管理(修复、疏浚、控制污染排放等)执行对策的参考标准。

用加拿大沉积物质量标准设定的 5 个阈值来评价微山湖表层沉积物中 PAHs 的污染程度见表 6。把各点位 12 种 PAHs 中至少有一种是超过低值标准的站位编号列于表 6 中,将各站位的污染程度区分在各阈值之间。

表 3 微山湖底泥中 LMW/HMW、菲/蒽和荧蒽/芘的比值

Table 3 Ratios of LMW/HMW,phenanthrene to anthracene and fluoranthene to pyrene in sediments of Weishan Lake

项目	采样点编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phen/Ant	7.18	4.57	4.56	6.29	2.26	9.17	2.58	2.42	4.54	3.73
Fla/Pyr	1.47	1.35	6.02	1.82	2.47	7.50	1.37	5.70	1.04	3.82
LMW/HMW	0.97	0.47	0.99	0.89	0.57	0.78	0.996	0.71	0.85	0.78

表 5 加拿大魁北克省淡水沉积物中 PAHs 的
质量评价标准($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 5 Criteria for the assessment of freshwater sediment
quality of PAHs($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)

PAHs	REL	TEL	OEL	PEL	FEL
Nap	17	35	120	390	1 200
Ace	3.7	6.7	21	89	940
Acy	3.3	5.9	30	130	340
Flu	10	21	61	140	1 200
Phe	25	42	130	520	1 100
Ant	16	47	110	240	1 100
Fla	47	110	450	2 400	4 900
Pyr	29	53	230	880	1 500
BaA	14	32	120	390	760
Chr	26	57	240	860	1 600
BaP	11	32	150	780	3 200
DahA	3.3	6.2	43	140	200

表 6 微山湖表层沉积物中 PAHs 的污染程度分析

Table 6 Analysis for the degree of pollution of PAHs in surface
sediments from Weishan Lake

沉积物质量标准范围	采样点位
大于 FEL	—
介于 PEL 和 FEL 之间	5, 8, 10
介于 OEL 和 PEL 之间	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9
介于 TEL 和 OEL 之间	—
介于 REL 和 TEL 之间	—
小于 REL	—

研究显示,微山湖采样点中有 7 个点位(表 6)介于 OEL 和 PEL 之间,即这些样点中 PAHs 对生物的不良影响概率较高,需查明污染源,并对沉积物环境风险进行评估;3 个点位介于 PEL 和 FEL 之间,沉积物中污染物对水生生物毒性效应较高,应查明来源,开展污染风险评估,确定整治要求并采取行动消除污染物进入途径;没有一个站位沉积物中检出的 PAHs 大于 FEL 值,表明微山湖尚不存在需要立即开展 PAHs 污染底质修复的区域。

3 讨论

南四湖通常被分为两部分,二级坝以北为上级湖、以南为下级湖(即微山湖),有来自鲁、苏、豫、皖 32 县的 53 条河流汇入其中,绝大部分来自其中 10 条最大的河流,而这 10 条河流全部汇入上级湖,因此上级湖成为南四湖主要的汇水区,南四湖地区北高南低,入湖河流携带大量的泥沙,并集中淤积在二级坝

及微山湖处,致使各湖区站位 ΣPAHs 含量不均匀,南部的污染物很难向北部扩散。朱晨等^[15]研究表明,上级湖入湖河流河口处及二级坝附近的监测点位的 ΣPAH 浓度范围为 $934.8\sim 2\,983.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重),平均 ΣPAH 浓度为 $1\,799.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重),上级湖湖区的 ΣPAH 浓度范围为 $163.0\sim 786.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重),平均 ΣPAH 浓度为 $491.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重)。PAHs 浓度受到入湖河流的影响较大,与入湖河流两岸的工农业布局和城市分布存在一定的相关性,多环芳烃主要来源于煤炭、木材及石油的不完全燃烧,仅个别点位的 PAHs 可能属于混合来源。

本研究的南四湖下级湖(即微山湖)沿湖多处地方围栏养殖,养殖船只较多,湖区从事养殖业的机动船的燃油排放以及周边农田作物焚烧、生活燃柴、煤炭等人类活动的影响是微山湖多环芳烃的主要来源。从微山湖表层沉积物中 ΣPAHs 浓度的空间分布(表 2)来看,微山湖不同采样点位的 ΣPAHs 总含量范围在 $324.13\sim 1\,576.65\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间(干重),平均值为 $699.01\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重)。 ΣPAHs 浓度受到人为活动和入湖河流的影响较大,二级坝与微山岛附近人类的生产生活频繁,入湖河水带来的多环芳烃在河口处沉积下来,造成二级坝、微山岛、十字河与薛河的河口附近水域的沉积物中 PAHs 浓度相应呈现出较高的水平,说明人类活动和入湖河流是微山湖水环境中 ΣPAHs 的重要来源。源解析表明微山湖沉积物中的多环芳烃主要来源于煤炭、木材及石油的不完全燃烧。此研究结果同南四湖上级湖的结论比较一致。

由上可知,南四湖沉积物中多环芳烃的浓度总趋势是南部高于北部,入湖河流河口处及二级坝附近 ΣPAH 浓度最高;沉积物中的多环芳烃主要来源于煤炭、木材及石油的不完全燃烧,16 种优控 PAHs 的总量范围基本处于低风险水平,尚未对生物造成显著的负面影响。

4 结论

(1)微山湖不同采样点位的 PAHs 总含量范围在 $374.93\sim 1\,576.65\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $699.01\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,与国内外其他湖泊相比处于中等污染水平,人类活动和入湖河流是微山湖水环境中 PAHs 的重要来源。

(2)微山湖沉积物中的多环芳烃主要来源于煤炭、木材及石油的不完全燃烧。

(3)微山湖沉积物样品中 ΣPAH 含量较低,均未超过 ERL 值,严重的多环芳烃生态风险在微山湖沉积

物中不存在,负面生物毒性效应会偶尔发生,风险主要来源于低环的多环芳烃,以茚(Flu)和萘(Ace)为主。

参考文献:

- [1] 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[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2):48-50.
LUO Xue-mei, LIU Chang-ming, HE Meng-chang. Distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment from the Yellow River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2):48-50.
- [2] Vane C H, Harrison I, Kim A W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from the Mersey Estuary, UK[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 374:112-126.
- [3] 姜福欣,刘征涛,冯 流,等. 黄河河口区域有机污染物的特征分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2):6-10.
JIANG Fu-xin, LIU Zheng-tao, FENG Liu, et al. Character analysis of organic pollutants in Yellow River Estuary Area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(2):6-10.
- [4] 沈 琼,王开颜,张 巍,等. 北京市通州区河流悬浮物中多环芳烃的分布特征[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3):58-62.
SHEN Qiong, WANG Kai-yan, ZHANG Wei, et al. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the suspend particle of rivers from Tongzhou District of Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(3):58-62.
- [5] 丘耀文,张 干,郭玲利,等. 深圳湾生态系统多环芳烃(PAHs)特征及其生态危害[J]. 环境科学, 2007, 28(5):1056-1061.
QIU Yao-wen, ZHANG Gan, GUO Ling-li, et al. Characteristics of PAHs in the ecosystem of Deep Bay and their ecological risk[J]. *Environmental Sciences*, 2007, 28(5):1056-1061.
- [6] Long E R, Ingersoll C G, MacDonald D D. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotient, a critical review[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(6):1726-1736.
- [7] 童宝锋,刘玲花,刘晓茹,等. 北京玉渊潭水相、悬浮物和沉积物中的多环芳烃[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4):450-455.
TONG Bao-feng, LIU Ling-hua, LIU Xiao-ru, et al. Studies on PAHs in water, suspended particular matter and sediment of Yuyuantan Lake, Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4):450-455.
- [8] 舒卫先,李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1409-1414.
SHU Wei-xian, LI Shi-jie. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface sediment from two typical lakes in the Taihu Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1409-1414.
- [9] 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[J]. 海洋通报, 2007, 26(4):85-89.
JIANG Jin-hua. Concentration, accumulation and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments in Taizhou Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(4):85-89.
- [10] 王晓军,潘恒健,杨丽原,等. 南四湖表层沉积物重金属元素的污染分析[J]. 海洋湖泊通报, 2005, 2:22-28.
WANG Xiao-jun, PAN Heng-jian, YANG Li-yuan, et al. Analysis of heavy metals concentrations in surface sediments of Nansihu Lake[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005, 2:22-28.
- [11] 刘恩峰,沈 吉,杨丽原,等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1377-1383.
LIU En-feng, SHEN Jie, YANG Li-yuan, et al. Chemical fractionation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Nansihu Lake and its main inflow rivers, China [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1377-1383.
- [12] 李红莉,李国刚,高 虹,等. 南四湖表层沉积物中多氯联苯的空间分布特征[J]. 中国环境监测, 2007, 23(6):61-64.
LI Hong-li, LI Guo-gang, GAO Hong, et al. Spatial distribution characteristic of polychlorinated biphenyls in surface sediments of Lake Nansihu[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(6):61-64.
- [13] 李红莉,李国刚,杨 帆,等. 南四湖沉积物中有机氯农药和多氯联苯垂直分布特征[J]. 环境科学, 2007, 28(7):1590-1594.
LI Hong-li, LI Guo-gang, YANG Fan, et al. Vertical distribution characteristics of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediment core from Lake Nansihu[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(7):1590-1594.
- [14] 史双昕,杨永亮,石 磊. 南四湖表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2005, 20(4):95-99.
SHI Shuang-xin, YANG Yong-liang, SHI Lei. The distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the Nansi Lake[J]. *Journal of Qingdao University(E & T)*, 2005, 20(4):95-99.
- [15] 朱 晨,李红莉,高 虹,等. 南四湖上级湖表层沉积物中多环芳烃的含量及分布特征[J]. 中国环境监测, 2009, 25(2):75-78.
ZHU Chen, LI Hong-li, GAO Hong, et al. Concentrations and distribution characteristic of PAHs in surface sediments of Nansi Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(2):75-78.
- [16] Niu J F, Chen J W, Martens D, et al. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed on spruce(*Picea abies* (L.) Karst.) needles under sunlight irradiation[J]. *Environ Pollut*, 2003, 123(1):39-45.
- [17] WU Ying, ZHANG Jing, LI Daoji, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Yalujiang Estuary, North China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(5):619-625.
- [18] ZENG Y E, VISTA C L. Organic pollutants in the coastal environment of San Diego, California. I. Source Identification and assessment compositional indices of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16(2):179-188.
- [19] 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, 3:291-299.
ZHOU Huai-dong, ZHAO Jian, LU Jin, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Baiyangdian Wetland[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3:291-299.
- [20] Xu J, Yu Y, Wang P, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments from Yellow River, China [J]. *Chemosphere*, 2007, 67:1408-1414.
- [21] Soclo H H, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydro-

- carbons(PAHs) in coastal marine sediments:Case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine(France) areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40:387-396.
- [22] Wang X C, Sun S, Ma H Q, et al. Sources and distribution of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52:129-138.
- [23] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and mussels of the Western Mediterranean Sea[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1998(7):765-776.
- [24] Doong R, Lin Y T. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan[J]. *Water Res*, 2004, 38:1733.
- [25] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-Based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2000, 39:20-31.
- [26] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19:81-97.
- [27] Long E R, Field L J, MacDonald D D. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17:714-727.
- [28] MacDonald D D, Carr R S, Calder F D, et al. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. *Ecotoxicology*, 1996, 5:253-278.
- [29] Environment Canada and Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Criteria for the assessment of sediment quality in Quebec and application frameworks:prevention, dredging and remediation[S]. Québec:Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, 2007, 1-39.

致谢:本研究在采样与检测过程中,得到徐州师范大学生命科学学院温洪宇博士和徐州市质监所葛冬梅博士的大力相助,在此表示诚挚的谢意。