

## 武汉月湖水体和表层沉积物中 25 种半挥发性有机污染物分布特性\*

宋慧婷<sup>1,2</sup>, 贺 锋<sup>2</sup>, 成水平<sup>2</sup>, 梁 威<sup>2</sup>, 张丽萍<sup>2</sup>, 吴振斌<sup>2\*\*\*</sup>

(1: 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

(2: 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘 要:** 2006 年 4 月在武汉月湖采集了 8 个样点的水样和表层沉积物样品, 采用气-质联用技术分析样品中 25 种半挥发性有机污染物(SVOCs)的含量, 探讨月湖受有机物污染的程度. 水样中 25 种半挥发性有机污染物总浓度为 564.04 - 1209.41 ng/L, 平均值为 965.64 ng/L. 沉积物中总浓度为 8500.26 - 23347.20 ng/g(DW), 平均值为 14832.04 ng/g(DW). 邻苯二甲酸酯类物质是月湖的主要污染物, 其中, 邻苯二甲酸乙基己基酯和邻苯二甲酸二丁酯含量最高. 多环芳烃、硝基甲苯、异佛尔酮等均有不同程度检出, 靠近以前的排污口的样点浓度最高. 沉积物中 25 种半挥发性有机污染物的含量大约是水体中含量的 15 倍, 具有潜在生态风险.

**关键词:** 月湖; 水体; 表层沉积物; 半挥发性有机污染物(SVOCs)

## Distribution characteristics of 25 semi-volatile organic compounds in water and surface sediment from Lake Yuehu in Wuhan, China

SONG Huiting<sup>1,2</sup>, HE Feng<sup>2</sup>, CHENG Shuiping<sup>2</sup>, LIANG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Liping<sup>2</sup> & WU Zhenbin<sup>2</sup>

(1: *College of Resource and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

**Abstract:** Eight samples from lake water and eight from surface sediment were collected in the Lake Yuehu, Wuhan City, China in April, 2006. 25 semi-volatile organic compounds(SVOCs) were analyzed by GC-MS. The concentrations of the water samples were from 564.04 to 1209.41 ng/L with the mean of 965.64 ng/L. The concentrations of surface sediment samples were from 8500.26 to 23347.20 ng/g(DW) with the mean of 14832.04 ng/g(DW). Phthalic acid ester was the major pollutants. Phthalic acid ethyl hexyl ester and Phthalic acid dibutyl ester were the highest pollutants. Polycyclic aromatic hydrocarbon, Methyl nitrobenzene and Isophorone have been detected in the water and sediment samples. The highest concentration of the pollutants was found near the previous sewage outfall. The total concentration of 25 SVOCs in surface sediment was nearly 15 times of that in water.

**Keywords:** Lake Yuehu; water; surface sediment; semi-volatile organic compounds(SVOCs)

月湖位于武汉市中心地带, 东临长江, 北依汉水, 南靠梅子山, 周边有古琴台和晴川阁等名胜, 并兴建有武汉市大型文化艺术中心, 是武汉市一处集琴台知音文化、山水景观文化、知名企业于一体的文化区. 由于多年来大量废水未经处理直接排入, 月湖严重富营养化, 综合生态服务功能严重受损, 仅存水面  $60 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 湖中淤泥厚达 1.5 m<sup>[1-2]</sup>. 为改善水质, 重建健康城市景观水体, 国家科技部和武汉市政府于 2003 年启动了月湖治理工作. 有机污染物由于其易在环境中积累, 影响生物的繁衍与生长, 有些对生物体还具有致癌、致畸

\* 国家自然科学基金项目(50808069)、国家杰出青年科学基金项目(39925007)、国家重大科技专项“受污染城市水体修复技术与示范工程”项目(2002AA60121)、湖北省教育厅科研项目(Q20081001、Q20091010)、湖北省科技攻关重大项目(2006AA305A037)、武汉市科技局科技攻关项目(200960323123)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102)联合资助. 2009-02-10 收稿; 2009-12-17 收修改稿. 宋慧婷, 女, 1975 年生, 博士, 讲师; E-mail: sht75jzb@yahoo.com.cn.

\*\* 通讯作者; E-mail: wuzb@ihb.ac.cn.

和致突变作用<sup>[3-4]</sup>. 因此, 调查水体中半挥发性有机污染物的组成和分布特征对于湖泊治理工作具有重要意义. 沉积物作为水环境中有机污染物的主要蓄积库, 与湖泊污染密切相关. 沉积物中的有机污染物可通过与上覆水的物理化学和生物作用, 重新进入水体, 再次污染水体<sup>[5]</sup>. 为此, 笔者于 2006 年 4 月采集了武汉月湖水样和表层沉积物样品, 采用气-质联用仪定量检测了其中的 25 种半挥发性有机污染物, 探讨月湖受有机物污染的状况, 为进一步的水体修复工作提供基础数据.

## 1 湖泊概况与研究方法

### 1.1 材料与与方法

月湖位于武汉市汉阳龟山以西, 汉水以南, 总面积约 0.66 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.2 m, 是长江中下游典型城市富营养化浅水湖泊<sup>[6]</sup>. 采用全球定位系统 (GPS) 定位, 于 2006 年 4 月采集了月湖 8 个样点的水样及对应的表层沉积物样品, 样点具体分布见图 1.

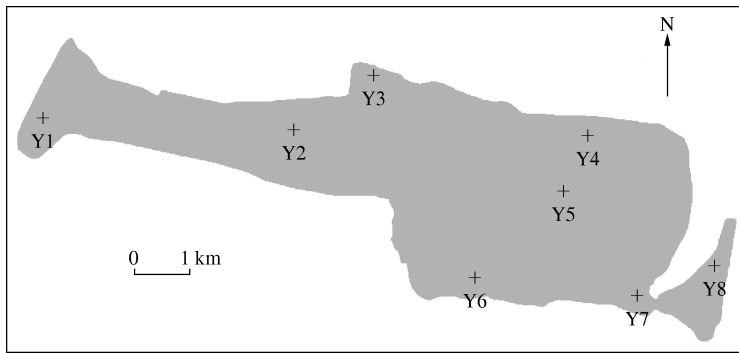


图 1 月湖采样点分布示意图

Fig. 1 Map of Lake Yuehu showing sampling locations

取 4L 水样经 0.7 μm 的玻璃纤维滤膜 (Whatman GF/F, 0.7 μm, Φ47mm, 在 450℃ 下灼烧 5h) 过滤后, 用 HLB 柱 (6ml, 500mg; Waters, 美国) 进行固相萃取 (Angilent Co., 美国). 先依次用二氯甲烷、甲醇、超纯水活化小柱, 加液后保持 5min, 调节好真空度, 控制水样过柱的流速恒定在 5ml/min. 富集完毕后, 依次用 10ml 乙酸乙酯、丙酮洗脱, 洗脱液收集后旋转蒸发浓缩, 氮吹定容到 0.5ml<sup>[7-8]</sup>.

表层沉积物样品采集后分装, -55℃ 下冷冻干燥, 研磨过筛. 取样品 2g, 加入 1:1 (V:V) 正己烷和丙酮索氏提取 16-20h<sup>[3-4]</sup>, 用活化铜片脱硫. 提取液浓缩到约 1ml, 再通过装有无水硫酸、硅胶和氧化铝的吸附柱净化, 用 7:3 (V:V) 正己烷和二氯甲烷洗脱, 洗脱液经旋转蒸发浓缩, 氮吹定容到 1ml 进行检测.

实验中所用玻璃仪器均经洗液清洗, 并 430℃ 灼烧 6h. 所用有机溶剂乙酸乙酯、二氯甲烷、正己烷、丙酮、甲醇等均为美国 TEDIA 公司色谱纯级; 无水硫酸钠为分析纯 (上海国药化学试剂公司), 经二氯甲烷抽提后, 450℃ 下马弗炉中焙烧 6h, 备用; 硅胶 (100-200 目, 青岛海洋化工厂)、中性氧化铝 (100-200 目, 美国 Supelco 公司), 经抽提后, 分别在 (180 ± 2)℃ 和 (250 ± 2)℃ 活化 12h, 冷至室温再加去离子水灭活, 平衡后储于干燥器中备用. 超纯水为美国 Milli-Q System (Millipore, Watford) 纯水仪制备.

### 1.2 样品分析

采用美国安捷伦公司生产的 GC-MS 联用仪 (型号: 6890N/5973 inert), 数据采集与处理系统为 Hewlett Packard Chemstation for Windows, 质谱图库为 Nist 02.

所用标样为美国 SIGMA 公司生产的 EPA525 制定的 25 种半挥发性有机污染物混标, 分别为异佛尔酮、2,6-二硝基甲苯、2,4-二硝基甲苯、六氯环戊二烯、五氯酚、萘烯、六氯苯、菲、蒽、芘、茚、苯并 (a) 蒽、苯并 (b) 蒽、苯并 (k) 蒽、苯并 (a) 芘、茚并 (1,2,3-cd) 芘、二苯并 (a,h) 蒽、苯并 (ghi) 芘、邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二正丁酯、邻苯二甲酸丁基苯基酯、邻苯二甲酸二乙基己基酯、己二酸二乙基己基酯, 溶剂为丙酮. 其中, 五氯酚为 4000 μg/ml, 其余均为 1000 μg/ml.

色谱条件:HP-5ms 柱(30m×0.25mm×0.25 $\mu$ m);载气为高纯 He,流速 1.0ml/min;进样量 1 $\mu$ l,柱头压 25psi,进口温度为 270 $^{\circ}$ C,不分流进样,恒流进样模式;测定柱温为程序升温:50 $^{\circ}$ C 保留 1min,20 $^{\circ}$ C/min 到 120 $^{\circ}$ C,1 $^{\circ}$ C/min 到 130 $^{\circ}$ C,2 $^{\circ}$ C/min 到 170 $^{\circ}$ C,保留 2min,30 $^{\circ}$ C/min 到 250 $^{\circ}$ C,保留 8min,3 $^{\circ}$ C/min 到 290 $^{\circ}$ C,保留 10min. 质谱条件:接口温度 290 $^{\circ}$ C,离子源温度 250 $^{\circ}$ C,四极杆温度 150 $^{\circ}$ C,电离能 70eV,溶剂延迟 3.5min;调谐文件:DFTPP;SIM 方式,扫描范围 45.00–500.00amu,扫描速度 2.8scan/s,扫描间隔 0.1s.

采用本方法进行加标回收率实验,水样和沉积物的回收率分别为 67%–102% 和 72%–97%,标准偏差均小于 10%,检测限分别为 0.02ng/L 和 0.015ng/g. 采用保留时间、标准谱图库检索和标样相结合进行定量.

## 2 结果与讨论

优先控制有机污染物和内分泌干扰物由于其对人类健康构成危害,其研究更为重要<sup>[9-14]</sup>. 本研究中所检测的 25 种半挥发性有机物基本属于优先控制有机污染物和内分泌干扰物,月湖水体和表层沉积物 25 种半挥发性有机污染物的检测结果见表 1. 实验数据表明,五氯酚、六氯环戊二烯、二苯并(a,h)葱和苯并(ghi)芘,茚并(1,2,3-cd)芘这四种因低于检测限而未能在研究区域水样中检出,六氯苯、五氯酚和六氯环戊二烯在沉积物样中也未能检测出来,其它种类的有机污染物在各个采样点样品中均有不同程度的检出,检出率分别为 84% 和 88%.

25 种半挥发性有机物在整个检测范围内,从水样和表层沉积物加起来的总浓度看,Y3 和 Y4 浓度最高,污染最为严重. 这两个点所处的位置都很接近居民区,目前月湖虽已截污,但仍有附近的居民生活污水排入湖. 其次是 Y7 和 Y8,靠近公路和公园出口,人流量大,雨水冲刷道路上有机残留物(如轮胎残留物)和山上流下的地表水都是这两个位点的污染源,而小月湖由于面积狭小,水流不畅,污染物容易滞留也是造成其浓度略高的原因之一. Y2、Y5 和 Y6 相差不大,Y2、Y5 位于湖心的位置,Y6 位置较偏,远离居民区和公路,人流量少,污染源相对较少,而且这些位点种植了水草,因而污染程度相对较低. 位于大围隔处的 Y1 污染程度最低,此处作为水体修复的实验区,进行了人工浮床和种植水草等修复措施,通过植物根系的吸收以及水草的吸附、吸收、降解等作用降低有机物浓度.

25 种半挥发性有机污染物在月湖水样中的总浓度在 564.04(Y4)–1209.41(Y3)ng/L 之间,平均值为 965.64ng/L. 水样中总浓度依次为:Y3 > Y2 > Y8 > Y5 > Y1 > Y6 > Y7 > Y4. Y3 点位于四小闸、湖水通江出口处,此处有机污染物浓度远高于其他几个样点,说明湖水在汇入江水之前此处有不同程度的富集. 沉积物中 25 种半挥发性有机污染物总浓度为 8500.26(Y1)–23347.20(Y4)ng/g(DW),平均值为 14832.04ng/g(DW). Y3 和 Y4 这两个样点浓度最高,达到了 20000ng/g(DW)以上,Y4 点比较靠近以前的排污口因而浓度比较高. 这两点周边曾有工厂和医院,以前的废水排放进来也会在此沉积下来造成沉积物中含量较高. 其次浓度均低于 20000ng/g(DW),依次为 15422.77(Y7)、15126.98(Y8)、11753.83(Y5)、11149.97(Y2)、10290.7(Y6)ng/g(DW). 沉积物中 25 种半挥发性有机污染物的含量大约是水体中含量的 15 倍. 很明显,出现这种结果与附近的经济发展和工业化是分不开的. 已有的研究表明即便是在大规模禁止使用后的十几年后,PAHs 等有机物仍长期残留在环境中,而且土地的开发利用、表面径流等加速了残留的有机物的流失. 月湖靠近城市和工业区,周边曾有与化工、医药等有关的企业,除此之外就是生活污水和雨水冲刷道路上有机残留物(如轮胎残留物)和山上流下的地表水,检出的有机污染物污染程度与污染源的关系十分密切. 这些结果与王海等在武汉东湖<sup>[11]</sup>、太湖<sup>[12]</sup>和李青山在长春南湖<sup>[13]</sup>的研究结果相似.

月湖定量检测的 6 种邻苯二甲酸酯的含量明显高于其它类别,水样中浓度在 441.92(Y4)–917.11ng/L(Y3)之间,平均值为 724.64ng/L,占了 25 种有机物总量的 69%–82%. 表层沉积物样中含量在 6432.79(Y1)到 21837.54(Y4)ng/g(DW),平均值为 13409.18ng/g(DW),占有有机物总量的 75%–98%. 说明邻苯二甲酸酯类物质是月湖主要的污染物. 其中,邻苯二甲酸乙基己基酯和邻苯二甲酸二丁酯含量明显高于其它有机污染物. 水样中邻苯二甲酸二乙基己基酯浓度从 246.68 到 500.77ng/L,平均值在 395.29ng/L. 邻苯二甲酸二正丁酯浓度从 171.78 到 377.27ng/L,平均值为 292.87ng/L. 邻苯二甲酸二正丁酯和邻苯二甲酸二乙

表 1 月湖水样和表层沉积物中 25 种半挥发性有机污染物定量分析结果(ng/L)  
Tab. 1 Quantitative analysis result of 25 SVOCs in water and surface sediment of Lake Yuehu

种类	化合物	水样										表层沉积物							
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8		
酞酸酯类	邻苯二甲酸二甲酯	3.86	5.62	6.54	1.50	4.31	0.92	8.67	5.43	5.62	6.68	14.37	7.95	8.36	2.36	8.25	4.39		
	邻苯二甲酸二乙酯	8.31	9.02	8.20	3.80	6.46	8.89	25.33	11.50	6.35	10.31	27.43	8.84	28.93	14.66	16.78	18.68		
	邻苯二甲酸二正丁酯	342.54	325.46	377.27	171.78	242.24	258.44	267.42	357.80	957.62	1691.70	2619.41	1188.62	944.42	925.01	998.10	1075.09		
	邻苯二甲酸丁基苯基酯	5.14	1.86	10.10	1.95	3.44	13.00	28.05	3.94	34.46	7.02	136.17	4.08	23.28	1.63	139.25	24.70		
	邻苯二甲酸二乙基苯基酯	383.26	463.08	500.77	246.68	378.32	360.88	358.29	471.04	5286.35	8383.02	17392.71	20540.93	10411.25	8720.80	10986.00	13675.29		
	己二酸二乙基己基酯	12.59	17.22	14.23	16.21	20.72	2.34	0.67	22.07	142.41	20.89	67.56	87.12	19.24	122.73	360.99	95.73		
PAHs	六氯苯	2.13	2.34	2.75	1.26	1.73	2.17	1.37	2.09	-	-	-	-	-	-	-	-		
	菲	23.75	21.01	26.58	31.16	14.74	14.05	19.04	27.26	448.45	273.91	417.95	427.24	74.61	190.20	358.19	65.57		
	萘	3.79	4.10	3.88	2.92	4.42	4.66	3.60	7.86	61.29	44.65	78.43	51.65	7.58	23.11	70.12	7.13		
	苊	3.06	3.28	4.03	2.95	1.94	4.41	2.22	1.64	225.75	8.58	312.67	168.49	43.80	155.83	279.81	36.97		
	苊芘	16.95	14.51	18.03	9.28	10.84	9.72	9.83	17.57	122.75	71.91	132.82	92.92	21.78	21.23	109.72	18.36		
	屈	1.01	1.24	1.38	0.75	0.81	0.79	0.83	1.37	210.76	66.36	313.69	90.81	9.61	13.80	296.63	7.45		
	苯并(a)蒽	1.09	1.56	1.89	1.02	1.39	1.09	1.01	1.25	116.50	83.39	188.14	114.92	12.23	16.81	168.42	9.36		
	苯并(b)荧蒽	0.56	0.85	0.86	0.23	0.63	0.49	0.53	0.86	185.97	157.25	451.14	190.38	22.26	16.25	482.87	17.57		
	苯并(k)荧蒽	0.29	0.37	0.35	0.16	0.24	0.20	0.22	0.20	42.59	45.95	47.18	78.18	6.87	6.20	106.06	9.78		
	苯并(a)芘	0.38	0.46	0.35	0.24	0.39	0.39	0.24	0.30	86.60	71.45	227.54	84.63	12.56	4.59	216.92	9.85		
	茚并(1,2,3-cd)比	-	-	-	-	-	-	-	-	54.06	64.26	305.91	65.05	16.11	4.74	301.38	11.82		
	二苯并(a,h)蒽	-	-	-	-	-	-	-	-	15.66	14.25	64.22	15.42	1.91	0	62.73	1.47		
	苯并(ghi)芘	-	-	-	-	-	-	-	-	56.95	49.99	11.72	51.89	13.20	9.55	258.05	9.85		
	2,6-二硝基甲苯	16.85	138.87	103.68	7.92	101.26	95.00	19.96	86.65	386.15	13.10	20.47	9.06	25.72	0	36.40	0		
甲苯	2,4-二硝基甲苯	8.54	26.26	4.86	4.51	18.20	16.53	16.70	15.87	33.63	26.42	177.60	28.61	20.77	28.93	122.71	21.71		
	异佛尔酮 3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮	78.09	138.09	117.32	57.22	131.68	114.37	95.83	91.83	14.42	31.78	41.29	32.26	27.25	12.33	28.4	5.56		
其它	萘烯	4.49	5.87	6.33	2.52	3.31	3.25	3.30	5.66	5.99	7.18	16.23	8.21	2.16	0	15.05	0.70		
	六氯环戊二烯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	五氯酚	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

-表示未检出.

基己基酯最高浓度也在 Y3 这个点上. 邻苯二甲酸二乙基己基酯和邻苯二甲酸二正丁酯总浓度加起来占 25 种有机污染物总浓度的 71%. 和国内已经有的工作相比<sup>[11-14]</sup>, 本文月湖水中邻苯二甲酸二丁酯浓度约为东湖水中邻苯二甲酸二丁酯浓度的 2 倍 ( $nd < \text{未检出} > -0.121 \mu\text{g/L}$ ), 低于长江和嘉陵江(重庆段)源水中邻苯二甲酸二丁酯浓度 ( $nd - 9.48 \mu\text{g/L}$ )、长江(江阴段)源水中邻苯二甲酸二丁酯浓度 ( $nd - 5.79 \mu\text{g/L}$ ) 和杭州市自来水水源中邻苯二甲酸二丁酯浓度 ( $1 - 33 \mu\text{g/L}$ , 平均为  $16.8 \mu\text{g/L}$ ). 我国邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二乙基己基酯的地表水质标准分别是  $3 \mu\text{g/L}$  和  $8 \mu\text{g/L}$ , 该两种酯类浓度均未超标, 相对国内其他部分水体污染程度较轻. 表层沉积物中, 邻苯二甲酸乙基己基酯的含量在 Y4 点达到最高,  $20540.93 \text{ng/g}$  (DW), 平均浓度为  $11924.54 \text{ng/g}$  (DW), 比东湖高出了约 1 倍. 邻苯二甲酸二丁酯含量略低, 平均浓度为  $1300.00 \text{ng/g}$  (DW), 比东湖含量低了 2 倍<sup>[9]</sup>. 酞酸酯类物质主要用作塑料增塑剂, 随着塑料工业的发展和塑料制品的广泛应用, 酞酸酯已大量进入环境, 普遍存在于土壤、底泥、水体、生物、空气及大气降尘物等环境样品中, 成为环境中无所不在的污染物, 对生态环境和人类健康造成了一定影响. 因此, 应重视邻苯二甲酸酯的污染, 进一步找出合理的治理办法.

据文献报道<sup>[11]</sup>, 在东湖水体中曾检测出的多环芳烃母体萘、蒽、芴, 东湖沉积物中检出的均为多环芳烃衍生物, 此次在月湖水体和沉积物中均有检出. 此次水体中所检测出的多环芳烃类总浓度在  $38.70 - 63.98 \text{ng/L}$  之间, 平均值为  $57.10 \text{ng/L}$ , 占 25 种有机物总浓度的 4% - 6%. 表层沉积物中检出的多环芳烃类总浓度在  $205.83 - 2725.92 \text{ng/g}$  (DW) 之间, 平均值为  $1279.80 \text{ng/g}$  (DW), 占了总浓度的 1% - 20%. 多环芳烃类总浓度与东湖沉积物总量相当 ( $0.15 - 10.83 \mu\text{g/g}$ )<sup>[11]</sup>. 其中, 芴和菲的含量较高.

异佛尔酮即 3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮是美国环境保护局优先控制污染物, 在月湖水样和沉积物样品中均有检出, 浓度分别在  $57.22 - 138.09 \text{ng/L}$  和  $5.56 - 41.29 \text{ng/g}$  之间. 异佛尔酮作为溶剂, 在塑料、胶粘剂、医药和香料等行业中应用广泛, 其来源还需进一步调查.

从以上检测结果可以看出, 月湖不同位点均受到了不同程度的污染, 与其所处的地理位置有一定的关系. 月湖处在城市中心区, 人口稠密地区排放出的污染物种类多, 曾经是附近居民生活污水和小型工业废水的主要纳污区, 有机污染物输入量大, 沉积下来一定量的污染物, 具有潜在生态风险.

### 3 结论

检测了月湖受 25 种半挥发性有机污染物的污染程度, Y3 和 Y4 点污染相对严重, 说明附近可能有新的点源排放, 污染程度与污染源关系密切. 酞酸酯类物质是月湖主要污染物, 检出浓度未超出国家标准, 但仍需要予以重视. 多环芳烃类、硝基甲苯、异佛尔酮等均有不同程度检出.

致谢: 感谢中国科学院水生生物研究所张甬元研究员、刘保元研究员和王全求、陶敏、杨丽华等研究生以及其他合作单位在本实验中的支持和协助.

### 4 参考文献

- [1] 姜莘红, 梁小民, 陈芳等. 月湖底栖动物的空间格局及其对水草可恢复区的指示. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(4): 502-505.
- [2] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 24-29.
- [3] 张路, 范成新, 鲜敏鸣等. 太湖底泥和疏浚堆场中持久性有机污染物的分布及潜在生态风险. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 18-24.
- [4] Reid BJ, Jones KC, Semple KT. Bioavailability of persistent organic pollutants in soils and sediments—a perspective on mechanisms, consequences and assessment. *Environment Pollution*, 2000, **108**(1): 103-112.
- [5] Yuan D, Yang D, Wade TL et al. Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(1): 101-111.
- [6] 陈国元, 李建秋, 李清曼等. 武汉月湖沉积物不同形态氮含量与转换途径的垂直变化. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 463-469.
- [7] Eichelberger JW, Behymer TD, Budde WL. Method 525.1 Revision 2. U. S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Cincinnati, Ohio, 1991.

- [ 8 ] Eichelberger JW, Munch JW, Shoemaker JA. Method 525.2 Revision 1. U. S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Cincinnati, Ohio, 1994.
- [ 9 ] Zeng Feng, Cui Kunyan, Xie Zhiyong *et al.* Occurrence of phthalate esters in water and sediment of urban lakes in a subtropical city, Guangzhou, South China. *Environment International*, 2008, **34**:372-380.
- [ 10 ] Mandana Ghisari, Eva Cecilie Bonefeld-Jorgensen. Effects of plasticizers and their mixtures on estrogen receptor and thyroidhormone functions. *Toxicology Letters*, 2009, **189**:67-77.
- [ 11 ] 王 海, 王春霞, 陈 伟等. 武汉东湖表层沉积物有机物污染状况. 环境科学学报, 2002, **22**(4):434-438.
- [ 12 ] Wang Hai, Wang Chunxia, Wu Wenzhong *et al.* Persistent organic pollutants in water and surface sediments of Taihu Lake, China and risk assessment. *Chemosphere*, 2003, **50**:557-562.
- [ 13 ] 李青山. 长春南湖富营养化现状及预测研究. 中国环境科学, 1991, **11**(6):420-425.
- [ 14 ] 李 霁, 刘征涛, 李捍东等. 长江口水体中半挥发性有机污染物的分布特征. 环境科学研究, 2007, **20**(1):12-17.