

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex}和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张讯达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价

郭雪, 毕春娟*, 陈振楼, 王薛平

(华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 采用 GC-MS 联用技术分析了滴水湖及其水体交换区 23 个表层沉积物和土壤中 16 种多环芳烃 (PAHs) 的含量, 探讨其分布特征及来源并对其生态风险进行评价. 结果表明, 滴水湖沉积物中 16 种 PAHs 含量范围是 11.49 ~ 157.09 ng·g⁻¹, 平均含量为 66.60 ng·g⁻¹, 湖区沉积物中 PAHs 含量比入湖区低, 但比出湖区高. 湖区外的沉积物和土壤中 PAHs 组成主要以中、高分子量 PAHs (4 环、5 ~ 6 环) 为主, 而湖区内表层沉积物中 PAHs 组成则以低分子量 PAHs (2 ~ 3 环) 和高分子量 PAHs (5 ~ 6 环) 为主. 通过特征化合物分子比值法、主成分分析及多元线性回归模型判源, 表明湖区外沉积物和土壤中 PAHs 来源主要为燃烧源, 而湖区内沉积物中 PAHs 来源为燃烧源和石油类产品泄漏的混合来源. 生态风险评价显示, 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 生态风险较低.

关键词: 多环芳烃; 滴水湖; 沉积物; 分布特征; 污染来源; 风险评价

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2664-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.07.033

Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas

GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, WANG Xue-ping

(Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Twenty-three surface sediment samples were collected from Dishui Lake and its surroundings, and 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed using GC-MS. The distribution characteristics, possible sources and ecological risk were investigated. The results show that the concentrations of total PAHs range between 11.49 ng·g⁻¹ and 157.09 ng·g⁻¹ with a mean value of 66.60 ng·g⁻¹ in sediments from Dishui Lake, which is lower than the mean value in the catchment area but higher than that in the drainage area. Median and high molecular weight PAHs (4 rings, 5-6 rings) are the dominant compounds compared to the low molecular weight PAHs (2-3 rings) in surface sediments and soils from the lake's surroundings, while in Dishui Lake low and high molecular weight PAHs are the dominator. Based on the PAHs molecule ratios, using principal component analysis and multiple line regression, a combustion source is diagnosed in the lake's surroundings, while the mix sources of leakage of petroleum and combustion are found in Dishui Lake. Ecological risk assessment result indicates that PAHs in the sediments and soils in Dishui Lake and its water exchange areas pose little biological adverse impact.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Dishui Lake; sediments; distribution characteristics; pollution source; risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是世界各国优先控制的持久性有机污染物, 具有生物富集性和三致效应 (致癌、致畸和致突变), 主要源于化石燃料 (煤、石油等)、生物质 (秸秆、薪柴等) 的不完全燃烧以及石油产品的泄漏等. 其中燃烧过程中产生的 PAHs 可经大气颗粒物迁移和沉降等途径进入地表水体, 由于 PAHs 具有溶解度低、蒸气压小及辛醇-水分配系数高的特点, 更易于被沉积物吸附.

近年来, 国内外学者对天然湖泊表层沉积物中 PAHs 的浓度分布与危害进行了广泛研究^[1~3]. 然而, 目前对人工湖泊中有机污染物的研究还甚少, 大

多集中在水质理化监测及浮游动植物调查富营养化评价等方面^[4,5]. 滴水湖为上海市围垦滩地上人工开挖而成的人工湖泊, 沉积物受原来滩地沉积物、河流输入以及农田侵蚀的共同影响, 湖泊底泥成为了 PAHs 主要汇集地. 本研究选取上海市滴水湖这一

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2013-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271472); 上海市自然科学基金项目 (12ZR1409000); 上海市科委社会发展重点项目 (12231201900); 华东师范大学大型仪器设备开放基金项目

作者简介: 郭雪 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境与水资源, E-mail: ecnu_guoxue@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cjbi@geo.ecnu.edu.cn

典型区域,通过对滴水湖及其水体交换区沉积物中 16 种优控 PAHs 的污染水平、来源及其生态风险评价,以期对区域污染控制和湖泊生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2012 年 12 月在上海滴水湖及其水体交换区采集表层(0~10 cm)沉积物和农田土壤(0~20 cm)样品,根据滴水湖的水系特点及水文地质等情况共设计 23 个采样点。其中 1~13 样点位于滴水湖,14、15 样点分别位于 C 港入湖口和 A 港出湖口,16、17 样点分别位于 C 港引水闸的闸内、闸外,18~21 样点位于滴水湖附近的农田,22~23 样点位于南汇潮滩。入湖区样品是 14、16、17 样点,湖区样品是 1~13 样点,出湖区样品是 15、22、23 样点。采样点的分布见图 1。

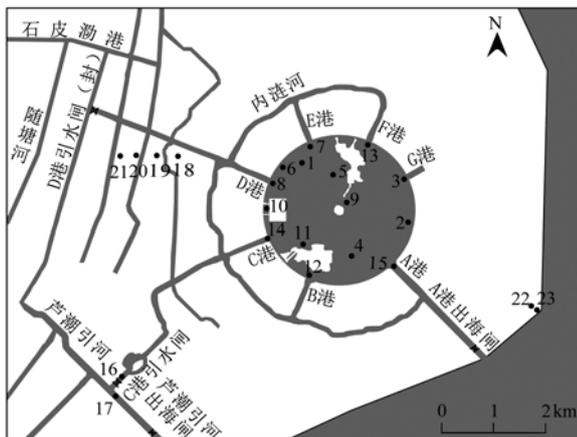


图 1 滴水湖及其水体交换区样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites around Dishui Lake of Shanghai

1.2 样品预处理

表层沉积物用 Ekman-Birge 采泥器 (HYDRO-BIOS, Germany) 采集后装入聚乙烯袋内冷藏(4℃)保存,样品经冻干机冻干、研磨后过 60 目不锈钢筛。称取已筛分、混匀的样品 5.0 g 和适量硅藻土放入到萃取池中,使用 ASE300 加速溶剂萃取仪 (Dionex, USA) 萃取。萃取剂选择丙酮和二氯甲烷(体积比 1:1)。萃取条件:加热温度为 100℃,萃取压力为 1 500 psi,静态萃取循环次数为 3 次,溶剂快速冲洗样品体积比为 60%,氮气吹扫收集提取液时间为 60 s。

萃取后的洗脱液使用 DryVap 全自动定量浓缩仪 (LabTech, USA) 浓缩至 2~3 mL,过硅胶/氧化

铝/无水硫酸钠层析柱(内径为 1 cm),硅胶 12 cm,氧化铝 6 cm,无水硫酸钠 1 cm。分别用 15 mL 正己烷和 70 mL 二氯甲烷与正己烷的混合溶剂(体积比为 3:7)淋洗出烷烃和 PAHs 组分。PAHs 淋洗液经正己烷转换溶剂后用 DryVap 全自动定量浓缩仪 (LabTech, USA) 浓缩至 0.9 mL,加入 0.1 mL 内标十氯联苯后待 GC/MS 上机检测。

表层沉积物的温度、pH 值等理化指标利用便携式仪器现场测定。沉积物中有机质含量采用重铬酸钾容量法 (GB/T 50123-1999) 测定。沉积物的粒径是经 0.05 mol·L⁻¹ 的六偏磷酸钠化学分散,超声处理后用激光粒度仪测定。

实验所用的有机溶剂(丙酮、二氯甲烷、正己烷)均为农残级,购自 Merck 公司(德国)。PAHs 标样(16 种优控 PAHs)、十氯联苯、氘代 PAHs (Naphthalene-d8、Aceaphthene-d10、Phenanthrene-d10、Chrysene-d12、Perylene-d12)均购自 Dr. Ehrenstorfer 公司(德国)。无水硫酸钠、中性氧化铝、硅藻土、硅胶、铜粉、六偏磷酸钠均为分析纯,购自国药集团。玻璃棉购自 CNW 公司(美国)。硅胶于 650℃ 烘烤 6 h,然后以 130℃ 条件下活化 16 h;硅藻土于 600℃ 马弗炉中加热 4 h;无水硫酸钠、中性氧化铝在马弗炉中经 450℃ 加热 4 h;玻璃棉在马弗炉中经 350℃ 灼烧 8 h。

1.3 样品测试

样品测定使用配有 CTC 自动进样器的气质联用仪 GC-MS (Agilent 7890A/5975C, 美国)。色谱条件:色谱柱选择 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 石英毛细管柱。载气为高纯氦气 (99.999%),流速为 1 mL·min⁻¹。进样口温度为 300℃,不分流进样,进样量为 1 μL。色谱柱升温程序为柱始温 80℃,保持 1 min;以 10℃·min⁻¹ 升温至 235℃,保持 0 min;以 4℃·min⁻¹ 升温至 300℃,保持 4 min。质谱条件:EI 源,电子能量 70 eV,离子源温度 280℃,四级杆温度 150℃。

标样包括美国环保局优先控制的 16 种 PAHs,分别为萘(Nap)、苊(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓑(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)以及苯并[g,h,i]芘(BghiP)。

1.4 质量保证和质量控制

以氘代 PAHs: Naphthalene-d8、Aceaphthene-d10、

Phenanthrene-d10、Chrysene-d12、Perylene-d12 混合标样作为回收率指示物,十氯联苯作为内标.每7个样品增加1个实验空白并且对每批样品加平行样.实验全程总空白值为 $0.14 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,相对标准偏差 $< 12.05\%$,方法的检出限为 $0.01 \sim 0.23 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,样品的加标回收率为 $75.2\% \sim 88.5\%$.样品目标化合物的定性通过标准样品和化合物的谱图进行,定量用内标法进行,最后结果经空白扣除和回收率校正.

表1 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤理化指标

Table 1 Physicochemical indexes of sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

沉积物和土壤理化指标	入湖区		湖区		出湖区	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
pH	6.69 ~ 7.95	7.36	7.04 ~ 9.06	7.93	7.92 ~ 8.35	8.14
温度/°C	7.20 ~ 9.30	8.60	6.40 ~ 8.80	7.98	5.00 ~ 7.90	6.90
TOC/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	6.14 ~ 18.96	10.90	1.54 ~ 6.47	3.67	3.50 ~ 4.33	3.92

制约,同时底质类型、生物扰动对其也有一定影响^[6].因此,滴水湖及其交换水体表层沉积物中 pH 值空间差异很可能与引水河道水体、湖区水团及其各自底栖生物扰动有关.

2.2 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤 PAHs 含量分布

从表2、表3可以看出,滴水湖表层沉积物中除 DahA 外,其他 PAHs 单体均有检出,PAHs 含量范围是 $11.49 \sim 157.09 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 $66.60 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,该含量远低于鄱阳湖^[2]、太湖^[7]、巢湖^[8]等,另外,由于个别样点的点源污染造成了湖区沉积物 PAHs 中蒽化合物平均值较高,但是在大多数样点中蒽化合物并不是主要的污染物.河流沉积物中

2 结果与讨论

2.1 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤理化性质

从表1可以看出,滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤的 pH 值均表现出弱碱性,从入湖区至湖区、出湖区沉积物 pH 值逐渐升高.由总有机碳值(TOC)可知,湖区沉积物中总有机碳含量较湖区外低,入湖区含量最高.沉积物 pH 值主要受水团性质

各种 PAHs 单体均有检出,PAHs 含量范围是 $47.56 \sim 773.77 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 $217.34 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,该值与辽河流域河流沉积物中^[8] PAHs 含量相当,但远低于黄浦江^[9]、北江^[10]等.河流沉积物 PAHs 中 Fla、Pyr、Phe 等单体含量较高,这也与欧冬妮等^[11]关于长江口滨岸沉积物中多环芳烃的研究相一致.滴水湖周边农田土壤中 PAHs 含量范围是 $9.64 \sim 56.62 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 $39.37 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,远低于河北大清河农田^[12]、杭州郊区农田^[13]、上海市崇明岛农田^[14]等.南汇潮滩沉积物中 PAHs 含量范围是 $110.93 \sim 122.30 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 $116.62 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,比杭州湾潮滩^[15]沉积物中 PAHs 含量高,但低于刘敏等^[16]对该区的研究.

表2 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 含量¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 PAHs contents in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

化合物	滴水湖		河流		农田土壤		潮滩	
	含量范围	均值	含量范围	均值	含量范围	均值	含量范围	均值
Nap	ND ~ 6.36	1.05	1.54 ~ 16.55	6.91	ND ~ 1.37	0.39	2.38 ~ 5.47	3.92
Acy	ND ~ 7.89	1.27	ND ~ 3.92	1.06	ND ~ 0.39	0.23	0.14 ~ 0.41	0.27
Ace	0.41 ~ 1.67	0.85	0.73 ~ 3.52	1.56	0.43 ~ 0.95	0.60	1.20 ~ 1.66	1.43
Flu	ND ~ 2.95	0.57	ND ~ 11.53	3.64	0.05 ~ 1.08	0.43	1.26 ~ 1.88	1.57
Phe	ND ~ 16.53	5.56	1.55 ~ 67.83	17.18	ND ~ 5.38	3.01	4.78 ~ 8.04	6.41
Ant	ND ~ 71.22	13.88	ND ~ 61.56	14.20	ND ~ 3.60	1.77	0.02 ~ 0.48	0.25
Fla	ND ~ 14.97	4.49	3.00 ~ 157.31	36.52	1.12 ~ 5.90	3.41	6.30 ~ 11.72	9.01
Pyr	ND ~ 9.94	3.50	2.30 ~ 110.10	26.47	0.70 ~ 3.98	2.59	5.73 ~ 10.93	8.33
BaA	3.88 ~ 11.84	5.68	4.20 ~ 53.32	16.22	3.97 ~ 5.03	4.51	7.86 ~ 13.16	10.51
Chr	3.33 ~ 8.56	4.33	3.84 ~ 63.54	16.73	3.36 ~ 4.06	3.73	8.97 ~ 11.25	10.11
BbF	ND ~ 9.04	6.76	7.82 ~ 43.48	16.68	ND ~ 8.25	6.02	11.89 ~ 14.34	13.11
BkF	ND ~ 8.26	5.85	7.46 ~ 29.56	12.98	ND ~ 7.82	5.77	10.07 ~ 11.50	10.78
BaP	ND ~ 22.41	5.65	1.28 ~ 66.11	15.74	ND ~ 2.33	1.35	7.83 ~ 33.06	20.45
IcdP	ND ~ 10.94	0.84	ND ~ 12.02	6.79	ND	—	10.39 ~ 11.05	10.72
DahA	ND	—	ND ~ 12.70	5.04	ND	—	ND	—
BghiP	ND ~ 10.24	6.32	7.15 ~ 60.71	19.62	ND ~ 7.90	5.55	7.95 ~ 11.52	9.74
\sum PAHs	11.49 ~ 157.09	66.60	47.56 ~ 773.77	217.34	9.64 ~ 56.62	39.37	110.93 ~ 122.30	116.62

1) ND: 未检出

表 3 国内不同地区沉积物和土壤中 PAHs 含量比较/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 3 Comparison of PAHs contents in sediments and soils/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

类型	研究区域	PAHs 种类	\sum PAHs/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		文献
			变化范围	平均值	
湖泊	江西鄱阳湖	16	33.0 ~ 369.1	157	[2]
	河北白洋淀	16	101.3 ~ 322.8	189.9	[3]
	江苏太湖	16	1 207 ~ 4 754	2 563	[7]
	安徽巢湖	15	116.0 ~ 2 832.2	898.9	[8]
	黑龙江连环湖	16	424 ~ 1 134	737	[17]
	上海滴水湖	16	11.49 ~ 157.09	66.60	本研究
江河	黄浦江	17	313 ~ 1 707	1 154	[9]
	北江	16	38.2 ~ 6 470	1 071	[10]
	辽河流域河流	16	61.91 ~ 840.53	287.33	[18]
	淮河(淮南至蚌埠)	17	308.12 ~ 1 090.37	547.31	[19]
	芦潮引河	16	123.49 ~ 773.77	448.63	本研究
	滴水湖 C 港	16	—	94.30	本研究
	滴水湖 A 港	16	—	47.56	本研究
农田土壤	河北大清河农田	16	54.2 ~ 3 231.6	405.1	[12]
	杭州郊区农田	16	507.21 ~ 781.44	675.26	[13]
	上海市崇明岛农田	16	24.92 ~ 1 014.61	192.83	[14]
	南京市六合区农田	16	45.6 ~ 210.9	126.7	[20]
	福州市农田	16	100.2 ~ 1 215.1	522.7	[21]
	滴水湖附近农田	16	9.64 ~ 56.62	39.37	本研究
潮滩	杭州湾	16	7.13 ~ 226.16	66.16	[15]
	上海南汇潮滩	16	57 ~ 829	397.83	[16]
	长江口潮滩	10	263 ~ 6 372	1 662	[22]
	珠江三角洲	16	1 167.4 ~ 21 329.0	4 891.4	[23]
	胶州湾	16	82 ~ 4 567	1 000	[24]
	上海南汇潮滩	16	110.93 ~ 122.30	116.62	本研究

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤 PAHs 含量空间分布,见图 2. 沉积物中 PAHs 总量均值表现为从 C 港引水闸至入湖口 C 港、湖区、出湖口 A 港依次降低,而 A 港至南汇潮滩又表现出升高的规律. 样点中 PAHs 最高值出现在 C 港引水闸处,农田土壤中 PAHs 含量最低. 这可能是因为入湖区的水系比出湖区受人为活动影响要大,一方面是芦潮引河、随塘河、石皮泖港附近约 20 户企业的工业废水污染,另一方面是临港新城建筑工地的施工废水及

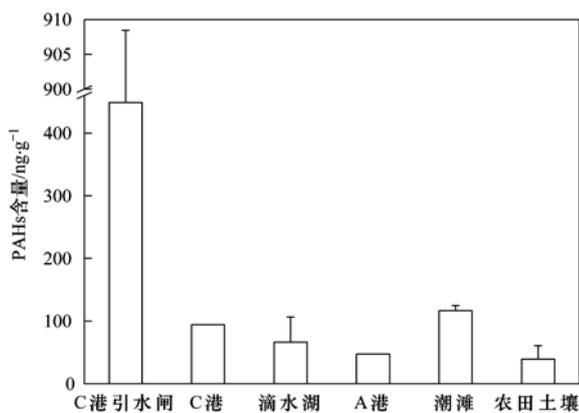


图 2 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 含量

Fig. 2 PAHs contents in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

C 港引水闸处(闸门位于上海海事大学内)高密度人群活动对涟河的影响. 加之,入湖区周边城镇居民的农业、生活废水大多经简单的化粪池处理后直接排入附近的石皮泖港和随塘河^[4],都使得入湖区水系环境恶化. 利用 ARCGIS 软件得出滴水湖表层沉积物中 PAHs 含量分布,见图 3. 湖区 C 港及其附近、

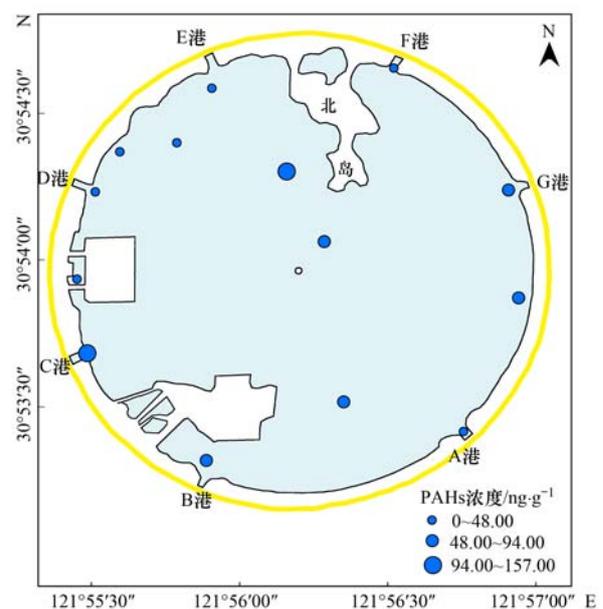


图 3 滴水湖沉积物中 PAHs 含量分布

Fig. 3 The PAHs content distribution in sediments from Dishui Lake

G 港入湖口处 (即旅游项目二号基地)、北岛西侧 PAHs 含量较高,而在湖心附近及靠近出湖口 A 港样点 PAHs 含量较低。

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 含量与 TOC(总有机碳)、黏粒含量进行相关性分析,

见图 4. 沉积物和土壤中 PAHs 含量与 TOC 存在显著的正相关关系,而与黏粒含量相关性不显著,这表明 TOC 是控制滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 含量的重要因素,即有机质含量而非有机质结构对该区沉积物中 PAHs 的分布起到了主导作用。

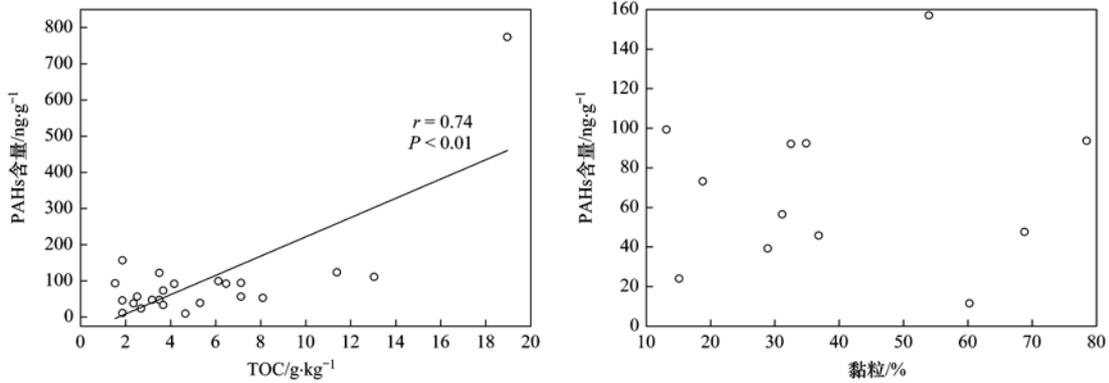


图 4 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 含量与 TOC、黏粒相关性

Fig. 4 Correlation between PAHs content and TOC, clay content in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

2.3 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 组成

根据 PAHs 的环数,将 16 种 PAHs 分为低分子量 PAHs(2~3 环),中分子量 PAHs(4 环)和高分子量 PAHs(5~6 环)3 组.由图 5 可知,湖区外沉积物和土壤中 PAHs 组成主要以中、高分子量 PAHs 为主,河流沉积物的中、高分子量 PAHs 分别占到 44.1%、35.4%,潮滩分别为 32.5%、55.6%,农田土壤分别为 36.2%、47.5%,而低分子量占比相对

较低,河流、潮滩沉积物和农田土壤中分别为 20.5%、11.9%和 16.3%.湖区表层沉积物中 PAHs 组成则以低分子量和高分子量为主,分别占到 34.8%、38.2%,中分子量占比较低,占到 27.0%.通常,低分子量 PAHs 主要来源于石油类污染或天然成岩过程等,而中高分子量 PAHs 则主要来自化石燃料高温燃烧与裂解.因此,可初步判定湖区外沉积物和土壤中 PAHs 主要来源为燃烧源,而湖区沉积物中 PAHs 来源为燃烧和石油类产品泄漏的混

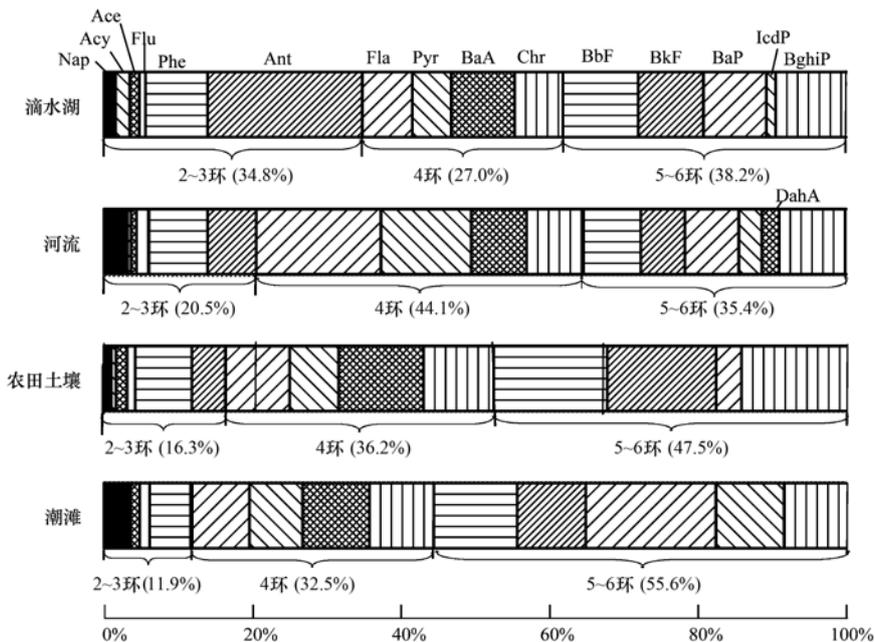


图 5 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 组成

Fig. 5 Compositions of PAHs in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

合源。

2.4 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 判源分析

由于各种多环芳烃在吸附特性、水溶性和挥发性等方面存在差异,而且在排放到环境中会发生变化,因此往往选择分子量相同且具有一定稳定性的母体多环芳作为源解析的分子标志物。其中 LMW/HMW、Flu/(Flu + Pyr)、BaA/(BaA + Chr) 等比值常

被用作判断 PAHs 来源的特征比值^[25]。

图 6 表示滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的同分异构体比值和 LMW/HMW 比值的分布。可以看出,各介质中 PAHs 来源较为相似,集中表现为燃烧源,主要为草、木和煤的燃烧,仅有滴水湖的部分样点表现为石油来源。这说明随着滴水湖旅游资源的开发,湖中游船的石油泄漏与燃烧也逐渐成为滴水湖表层沉积物有机污染的来源。

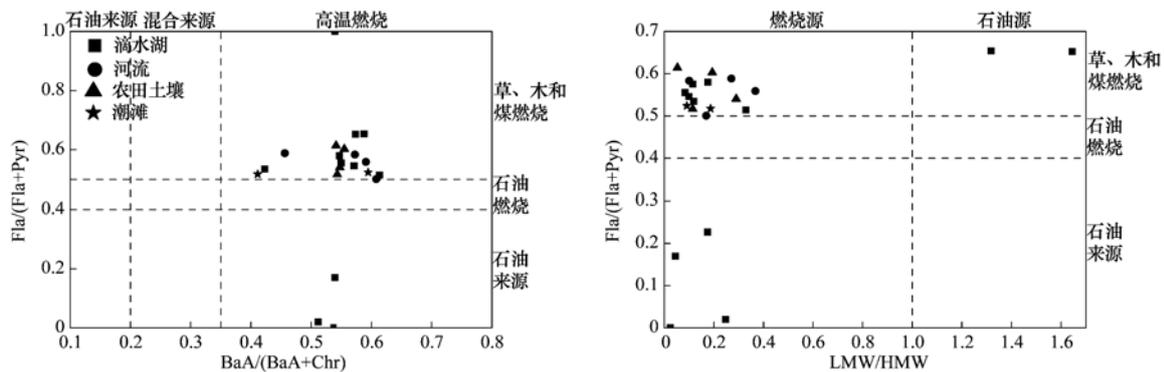


图 6 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 来源分析

Fig. 6 Source apportionment of PAHs in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

为了进一步了解滴水湖湖区表层沉积物和土壤中 PAHs 的来源情况,采用主成分分析及多元线性回归法定量分析其来源。由于极少样点 DahA 有检出,故仅对 15 种 PAHs 含量进行主成分分析,结果见表 4。主成分 1 中 BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP 等组分载荷较高,代表了交通燃料(汽油、柴油等)燃烧^[26]。主成分 2 中 Acy、Ace、Phe、Ant、Fla 等组分载荷较高,代表了煤、木炭的燃烧^[26]。主成分 3 中 Nap、Flu 等组分载荷较高,代表了是石油的燃烧与泄漏^[26]。

以标准化主成分得分变量为自变量,标准化的 15 种 PAHs 总量为因变量,进行多元线性回归分析。计算出主成分 1(交通燃料燃烧)的贡献率是 29.0%,主成分 2(煤、木炭燃烧)的贡献率是 59.8%,主成分 3(石油燃烧与泄漏)的贡献率是 11.2%。这正与特征化合物指数法判定的结果一致。滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的燃烧来源主要是因为滴水湖是由流经市区的大治河引水,经随塘河汇入湖区,使得沿途居民生活燃料及周边道路上交通燃料燃烧产生的 PAHs 随雨水的冲刷、大气沉降等形式进入水体。另外,芦潮引河、随塘河、石皮泖港附近企业的污水排放,临港新城建筑工地的施工污染等,也使得较高浓度的 PAHs 进入滴

湖水水系并富集在沉积物中。而湖区沉积物中 PAHs 表现为燃烧源和石油类产品泄漏的混合来源,说明随着滴水湖旅游业的开发,湖区游船燃料的燃烧和泄漏也成为滴水湖表层沉积物中 PAHs 的污染源,应当引起重视。

表 4 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 主成分分析¹⁾

Table 4 Principal component analysis (PCA) for PAHs in sediments and soils from Dishui Lake and its surroundings

PAHs	主成分		
	1	2	3
Nap	0.14	-0.07	0.92*
Acy	-0.24	0.88*	-0.27
Ace	0.17	0.80*	0.48
Flu	0.20	0.07	0.92*
Phe	-0.07	0.97*	0.04
Ant	-0.38	0.82*	-0.36
Fla	0.29	0.84*	0.36
Pyr	0.52	0.46	0.64
BaA	0.85*	-0.05	0.05
Chr	0.81*	-0.01	0.11
BbF	0.84*	-0.01	0.36
BkF	0.80*	-0.01	0.36
BaP	0.73*	-0.06	0.01
IcdP	0.70*	-0.05	0.43
BghiP	0.62	-0.05	0.60
方差贡献率/%	44.37	26.74	10.29

1) KMO 检验系数 = 0.6 > 0.5; Bartlett 球度检验 Sig = 0.00 < 0.05; * 表示单一 PAHs 在此主成分上有较大的载荷 (≥ 0.7)

2.5 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 生态风险评价

由于 BaP 单体最能反映环境中 PAHs 的致癌潜能,因此采用其他 PAHs 单体相对于 BaP 的毒性当量因子 (TEF_i) 来分析 PAHs 毒性当量浓度 (TEQ_{PAHs})^[27],并进行 PAHs 健康风险评价.公式如下:

$$TEQ_{PAHs} = \sum TEF_i \cdot c_i$$

式中,TEF_i 为 7 种 PAHs 单体 (BaA、BaP、BbF、BkF、IcdP、DahA、Chr) 相对于 BaP 的毒性当量因子,据美国环保署规定分别为 0.1、1、0.1、0.01、0.1、1、0.001; c_i 为 7 种 PAHs 单体浓度 (ng·g⁻¹). 经计算得滴水湖湖区沉积物中 PAHs 毒性当量浓度为 0.39 ~ 23.80 ng·g⁻¹ (平均 7.04 ng·g⁻¹),湖区外沉积物和土壤中 PAHs 毒性当量浓度为 0.40 ~ 90.05 ng·g⁻¹ (平均 17.98 ng·g⁻¹). 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 TEQ_{PAHs} 远低于中国贵州的红枫湖 (334.3 ng·g⁻¹)^[28]、太湖梅梁湾 (407 ng·g⁻¹)^[7] 等,但湖区沉积物中 PAHs 毒性当量浓度与中国黑龙江的连环湖 (2.87 ~ 33.89 ng·g⁻¹)^[17] 水平相当. 可见滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的生态风险较低,但是芦潮引河闸内、闸外沉积物中 TEQ_{PAHs} 均高于研究区域其他样点,有发生生态风险的可能,应该引起重视.

3 结论

(1) 滴水湖沉积物中 16 种 PAHs 含量范围是 11.49 ~ 157.09 ng·g⁻¹,平均含量为 66.60 ng·g⁻¹,滴水湖及其水体交换区沉积物中 PAHs 总量均值表现为从 C 港引水闸至入湖口 C 港、湖区、出湖口 A 港依次降低. 分别与国内湖泊、江河、农田、潮滩相比,该区沉积物和土壤中 PAHs 含量均处于低程度污染水平.

(2) 湖区外的沉积物和土壤中 PAHs 组成主要以中、高分子量 PAHs (4 环、5 ~ 6 环) 为主,而湖区内表层沉积物中 PAHs 组成则以低分子量 PAHs (2 ~ 3 环) 和高分子量 PAHs (5 ~ 6 环) 为主.

(3) 通过特征化合物指数法和主成分分析及多元线性回归法定量表明,湖区外沉积物/土壤中 PAHs 来源主要为燃烧源,而湖区内沉积物中 PAHs 来源为燃烧源和石油类产品泄漏的混合来源. 其中,交通燃料 (汽油、柴油等) 燃烧的贡献率是 29.0%,煤、木炭燃烧的贡献率是 59.8%,石油燃烧与泄漏

的贡献率是 11.2%.

(4) 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 生态风险较低.

致谢:感谢韩景超、陶征楷、诸葛祥真在采样过程中给予的帮助!

参考文献:

- [1] Kannan K, Johnson-Restrepo B, Yohn S S, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Michigan inland lakes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(13): 4700-4706.
- [2] Lu M, Zeng D C, Liao Y, *et al.* Distribution and characterization of organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Poyang Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**(1): 491-497.
- [3] Hu G C, Luo X J, Li F C, *et al.* Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. *Journal of Environment Sciences*, 2010, **22**(2): 176-183.
- [4] 徐建官. 滴水湖水质现状及保护初探 [J]. *环境监测管理与技术*, 2010, **22**(1): 64-70.
- [5] 田华, 刘水芹, 方伟, 等. 人工湖泊滴水湖水质演变趋势及富营养化分析 [J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(6): 26-31.
- [6] 齐红艳, 范德江, 徐琳, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物 pH, Eh 分布及制约因素 [J]. *沉积学报*, 2008, **26**(5): 820-827.
- [7] Qiao M, Wang C X, Huang S B, *et al.* Composition, sources, and potential toxicological significance of PAHs in the surface sediments of the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Environment International*, 2006, **32**(1): 28-33.
- [8] 宁怡, 柯用春, 邓建才, 等. 巢湖表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(6): 891-898.
- [9] Liu Y, Chen L, Zhao J F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of rivers and an estuary in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(2): 298-305.
- [10] 许静, 任明忠, 杜国勇, 等. 北江表层沉积物中多环芳烃的分布与风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2009, **30**(11): 3269-3275.
- [11] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 3033-3049.
- [12] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 大清河流域表层土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(7): 1452-1458.
- [13] 于国光, 张志恒, 叶雪珠, 等. 杭州市郊区表层土壤中的多环芳烃 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 925-928.
- [14] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4270-4275.

- [15] 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[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(2): 233-237.
- [16] 刘敏, 许世远, 陈振楼. 上海南汇淤泥质潮滩表层沉积物中多环芳烃[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(3): 284-288.
- [17] Sun L, Zang S Y. Relationship between polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and particle size in dated core sediments in Lake Lianhuan, Northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2013, **461**(1): 180-187.
- [18] Guo W, He M C, Yang Z F, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 93-104.
- [19] 彭欢, 杨毅, 刘敏, 等. 淮南-蚌埠段淮河流域沉积物中 PAHs 的分布及来源辨析[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1192-1197.
- [20] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 江苏省部分地区农田表土多环芳烃含量比较及来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 71-75.
- [21] 韩志刚, 杨玉盛, 杨红玉, 等. 福州市农业土壤多环芳烃的含量来源及生态风险[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, **3**(2): 34-41.
- [22] 刘敏, 侯立军, 邹惠仙, 等. 长江口潮滩表层沉积物中多环芳烃分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(4): 343-346.
- [23] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 192-197.
- [24] 杨永亮, 麦碧娴, 潘静, 等. 胶州湾表层沉积物中多环芳烃的分布及来源[J]. 海洋环境科学, 2003, **22**(4): 38-43.
- [25] Soclo H H, Garrigues P H, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(5): 387-396.
- [26] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [27] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(1): 1-11.
- [28] Guo J Y, Wu F C, Zhang L, *et al.* Screening level of PAHs in sediment core from Lake Hongfeng, Southwest China [J]. Archives of Environment Contamination and Toxicology, 2011, **60**(4): 590-596.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行