

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价

张家泉¹, 胡天鹏^{1,2}, 邢新丽², 郑煌², 张丽¹, 占长林¹, 刘红霞¹, 肖文胜¹, 祁士华²

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 黄石 435003; 2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074)

摘要: 于 2015 年 8 月采集大冶湖表层沉积物 8 个及上覆水样 8 个, 使用 GC-MS 分析 16 种 EPA 优控 PAHs。结果表明在表层沉积物及水体中 $\sum$ PAHs 范围分别为: 35.94 ~ 2 032.73 ng·g⁻¹ 和 27.94 ~ 242.95 ng·L⁻¹, 平均值分别为 940.61 ng·g⁻¹ 和 107.77 ng·L⁻¹; 表层沉积物中 PAHs 分布呈现湖中高于岸边趋势, 水体则呈大致相反趋势, 表层沉积物中以 4~5 环高环化合物为主要组分, 在水体中主要以 2 环以及 4 环和 5 环 PAHs 为主, 与国内外其他湖泊相比处于中度污染水平; 来源解析表明大冶湖表层沉积物及水体中多环芳烃主要来自于高温燃烧源, 沉积物中 PAHs 高环分子都占据绝大部分, 反映出了沉积物受矿冶冶炼长期累积污染的效应; 所检测沉积物中各单体 PAH 及 $\sum$ PAHs 含量均未超过 ERM 以及 FEL, 表明大冶湖表层沉积物中 PAHs 无潜在生态风险; 终生致癌风险评价表明大冶湖水体中 PAHs 通过摄入和皮肤接触风险都处于 USEPA 推荐的可接受水平范围之内, 但都高于瑞典环保局和英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平, 需要对 7 种致癌 PAHs 污染加以防治。

关键词: 大冶湖; 表层沉积物; 水; 多环芳烃; 来源解析; 健康风险

中图分类号: X131.2; X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0170-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201606058

Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake

ZHANG Jia-quan¹, HU Tian-peng^{1,2}, XING Xin-li², ZHENG Huang², ZHANG Li¹, ZHAN Chang-lin¹, LIU Hong-xia¹, XIAO Wen-sheng¹, QI Shi-hua²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: 8 surface sediments and 8 water samples were collected from the Daye Lake in August 2015. The 16 kinds of EPA control polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed by GC-MS. The results showed that the PAHs concentrations of surface sediments and water ranged from 35.94 ng·g⁻¹ to 2 032.73 ng·g⁻¹ and from 27.94 ng·L⁻¹ to 242.95 ng·L⁻¹, with average contents of 940.61 ng·g⁻¹ and 107.77 ng·L⁻¹, respectively. The distribution of PAHs in surface sediments indicated that the contents in the center samples were higher than those in the bank samples, but the water showed nearly the opposite tendency. The 4-5 rings high molecular weight PAHs were the main components in the surface sediments, and the 2, 4 and 5 rings PAHs were given priority in water. Compared with the other domestic and oversea lakes, the PAHs pollution of the Daye Lake was at a moderate level. Source apportionment showed that the PAHs in surface sediments and water from the Daye Lake came from the combustion source, HWM-PAHs were the dominant part of the PAHs in the sediment, reflecting the sediment PAHs pollution under the effects of mining and smelting over a long period; All monomer PAHs and total PAHs content in sediment did not exceed the ERM and FEL limiting values, showing that there was no particularly serious ecological risk caused by PAHs in the surface sediments from the Daye Lake; the incremental lifetime cancer risks assessment showed that the uptake risk of PAHs in Daye Lake water through the ingestion and dermal absorption were both in the acceptable range recommended by the USEPA, but all sites had higher risk than the acceptable risk level recommended by the Sweden environmental protection agency and Royal society. The pollution of seven carcinogenic PAHs needs prevention and control.

Key words: Daye Lake; surface sediments; water; PAHs; source apportionment; health risk

多环芳烃(PAHs)是中性、非极性广泛存在于环境中的一类持久性有机污染物(POPs), 含有两个或两个以上芳香环, 因其高熔点、高持久性及“三致”(致癌、致畸、致突变)特性^[1,2], 多环芳烃通常会对水环境中生物体产生遗传毒性, 并通过食物链累积对人体健康产生危害, PAHs 成为全球性研究热点问题, 近年来关于 PAHs 破坏人体内分泌活动

报道十分常见^[3,4]。环境中的多环芳烃污染物主要是人为来源, 如石油的直接泄漏以及石油产品精炼、

收稿日期: 2016-06-11; 修订日期: 2016-08-22

基金项目: 湖北理工学院优秀青年科技创新团队资助计划项目(13xtz07); 湖北省科技支撑计划(对外科技合作类)项目(2014BHE0030); 湖北省水利重点科研课题项目(HBSLKY201407)

作者简介: 张家泉(1980~), 男, 副教授, 主要研究方向为矿冶环境污染化学, E-mail: j. zhang@hbpu.edu.cn

加工或者石油、木材及其他有机质的燃烧,少量来自于火山爆发,森林火灾以及岩石分化等自然源^[5-8]。因此,了解多环芳烃地球化学行为包括他们的分布、来源对于环境污染防治工作开展具有重要的意义。

黄石市位于湖北省东南部,是我国矿冶历史名城,大冶湖是黄石市面积最大的天然湖泊,为长江中下游代表性中型浅水湖泊,湖体狭长,呈东西走向,后流入长江。大冶湖主要接纳地表径流以及周边排污,湖泊面积约为 63.4 km²,平均水位约 16 m,最大蓄水量可达 2×10^8 m³。大冶湖底和四周储藏有大量的金属矿藏,至今流域内已被探明的矿产资源多达 43 种,其中以铜、铁、金、煤、钼、硫等矿产资源储藏量最为丰富,因而采矿、选矿、黑色和有色金属冶炼业十分发达,是我国九大有色冶炼基地之一,这些矿产及工业大多分布于湖区上游及西岸,重金属冶炼过程中产生的大量有机污染物(如 PAHs),曾长期未经处理直接进入湖泊水体及沉积物,存在较严重生态环境风险。而大冶湖流域随着经济开发圈的建成,逐步由郊区扩展为城区。因此,查明大冶湖水体及沉积物中 PAHs 污染水平、组成及分布,开展大冶湖 PAHs 来源与风险评价,对于环大冶湖生态新区建设具有科学的指导意义,可为大冶湖等浅水湖泊的有机污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2015 年 8 月根据大冶湖的走向,尽量靠湖中线,按照等距离分布依次用抓斗式采样器共采集了 8 个表层沉积物样品,在采集沉积物样品之前先于水面 20 cm 以下采集配套表层水体样品。沉积物样品采集后置于聚乙烯密实袋中,水样采集后保存于事先用丙酮清洗、现场用待采集处的水体再润洗 3 次的棕色玻璃瓶中,采样现场使用冰块保存所采集的表层沉积物及水体样品,运回实验室后,在 -20℃ 条件下保存样品待分析。采样点分布如图 1。

1.2 样品预处理

沉积物样品处理:表层沉积物经自然阴干,并去除动植物残体及杂质后,称取 10 g 样品及加入 5.0 μL 回收率指示物氘代萘(Naphthalene-d₈)、氘代二氢萘(Acenaphthene-d₁₀)、氘代菲(Phenanthrene-d₁₀)、氘代䓛(Chrysene-d₁₂)和氘代芘(Perylene-d₁₂),用 CH₂Cl₂ 120 ~ 140 mL 水浴温度 45℃ 下,在

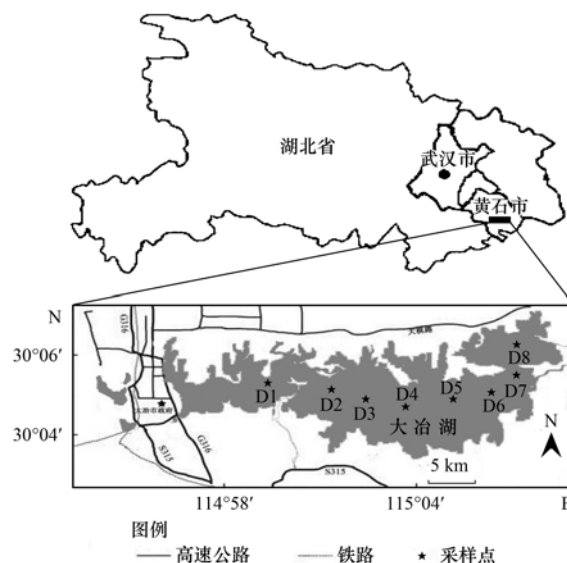


图 1 采样点示意

Fig. 1 Sampling sites

索氏提取器内抽提 24 h,并用铜片脱硫。

水样处理:取 1 L 水样置于分液漏斗中,加入 5.0 μL 回收率指示物,然后立即加入 25 mL CH₂Cl₂ 进行萃取,重复萃取 3 次。

沉积物及水样处理后的抽提液经旋蒸仪(德国 Heidolph RE-52)40℃ 条件下浓缩至约 5 mL 后,加入 5 ~ 10 mL 正己烷,继续浓缩至约 5 mL。浓缩液通过装有去活化的硅胶和氧化铝(体积比 2:1)的层析柱净化分离。用二氯甲烷和正己烷(体积比 2:3)混合液淋洗。淋洗液浓缩至 0.5 mL,转移至 2 mL 细胞瓶,用柔和的氮气(纯度 >99.99%)吹至 0.2 mL,加入内标标准物,低温保存至上机分析。其中,硅胶置于烘箱 180℃ 烘 12 h,氧化铝置于烘箱 270℃ 烘 12 h,作用是使其达到活化效果。冷却后,分别加 3% 质量比的去离子水去活化。

1.3 仪器分析和试剂标准

采用 Agilent 公司气相色谱-质谱联用仪(GC-MS 7890A-5975C MSD)分析 16 种美国 EPA 优控 PAHs 污染物,色谱柱为 DB-5MS 熔融石英毛细柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。色谱柱程序升温:初始温度 85℃,持续 2 min;以 4℃·min⁻¹ 升温至 290℃后,持续 25 min,直至所有组分从色谱柱中流出。进样口温度为 280℃,载气为氮气(纯度 >99.99%),流速为 1 mL·min⁻¹,不分流进样,进样量为 1.0 μL。

美国环保署(USEPA)列出的 16 种优控 PAHs 污染物:2 ~ 3 环包括萘(Nap)、萘烯(Acy)、萘(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)这 6 种,4 环

包括芘 (Pyr)、荧蒽 (Fla)、苯并[a]蒽 (BaA)、蒽 (Chr) 这 4 种, 5 环包括苯并[b]荧蒽 (BbF)、苯并[k]荧蒽 (BkF)、苯并[a]芘 (BaP)、二苯并[a,h]蒽 (DBA) 这 4 种, 6 环包括茚并[1,2,3-cd]芘 (IcdP)、苯并[ghi]芘 (BghiP) 这 2 种. PAHs 混合标准液(美国 Supco): 含蔡-d₈、苊-d₁₀、菲-d₁₀、蒽-d₁₂和芘-d₁₂, 所使用有机试剂正己烷(色谱纯)购自美国 Tedia 公司, 二氯甲烷(色谱纯)购自美国 J. T. Baker 公司, 内标标准物: 六甲基苯.

1.4 质量控制/质量保证(QA/QC)

沉积物和水样处理过程中都使用平行样、方法空白和程序空白进行质量控制和保证. 方法空白中无目标化合物检出, 平行样分析中 PAHs 相对偏差均小于 10%, 在误差允许范围内. Nap-D₈、Acy-D₁₀、Phe-D₁₀、Chr-D₁₂ 和 Pyr-D₁₂ 的平均回收率分别是 58% ± 6%、82% ± 9%、108% ± 10%、112% ± 13% 及 118% ± 11%. 最终结果经回收率校正.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物及水体中 PAHs 污染水平

表层沉积物及其配套水体中 PAHs 含量见表 1 所示. 在表层沉积物中 $\sum$ PAHs 含量范围为 35.94 ~ 2 032.73 ng·g⁻¹, 均值为 940.61 ng·g⁻¹; 7 种致

癌单体多环芳烃 $\sum_7$ PAHs 含量范围为 18.16 ~ 1 289.92 ng·g⁻¹, 均值为 576.32 ng·g⁻¹. 而在水体中 $\sum$ PAHs 含量范围为 27.94 ~ 242.95 ng·L⁻¹, 均值为 107.77 ng·L⁻¹; 7 种致癌单体多环芳烃 $\sum_7$ PAHs 含量范围为 14.82 ~ 94.79 ng·L⁻¹, 均值为 62.60 ng·L⁻¹. 我国尚无评判 PAHs 污染水平的标准, 根据 Long 等^[9] 的生态风险评价原则, 没有最低安全阈值的高环致癌性多环芳烃 BkF 和 BbF 只要存在于环境中, 就会对生物体健康产生威胁, 在整个大冶湖采样区这两种 PAH 单体检出率在沉积物和水体中都为 100%, 且与美国 EPA 标准比较大冶湖水体中 7 种致癌 PAHs 中 BaP、BkF、BbF 这 3 种超标率均为 100%, 而我国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 中规定 BaP 的限值为 2.8 ng·L⁻¹ 在大冶湖水体中 BaP 超标率达 100%, 表明研究区 PAHs 污染存在一定的风险.

大冶湖表层沉积物中 PAHs 处于中等污染水平与国内其他典型的河流、湖泊对比 (表 2), 大冶湖表层沉积物中 PAHs 含量远高于柘林湾养殖区、浙江千岛湖和太湖、略高于巢湖及太湖沉积物中 PAHs 含量, 远低于辽河表层沉积物中 PAHs 含量, 略低于珠江表层沉积物中的 PAHs, 与安庆长江沿岸

表 1 大冶湖表层沉积物及表层水体中 PAHs 含量¹⁾

Table 1 Concentrations of PAHs in the surface sediment and surface water from the Daye Lake

化合物	环数	TEF	沉积物/ng·g ⁻¹		水样/ng·L ⁻¹		EPA 标准
			范围	均值	范围	均值	
Nap	2 环	0.001	0.21 ~ 29.12	14.61	9.05 ~ 50.83	22.68	—
Acy	3 环	0.001	0.14 ~ 1.84	0.95	N. D. ~ 1.97	0.47	—
Ace	3 环	0.001	0.21 ~ 4.88	2.49	N. D. ~ 5.03	1.63	—
Flu	3 环	0.001	2.04 ~ 49.62	22.51	N. D. ~ 2.01	0.73	—
Phe	3 环	0.001	5.34 ~ 188.00	91.95	N. D. ~ 28.68	7.34	—
Ant	3 环	0.01	0.50 ~ 14.64	6.94	0.13 ~ 31.96	6.57	—
Fla	4 环	0.001	4.98 ~ 238.69	113.54	0.23 ~ 7.84	2.15	—
Pyr	4 环	0.001	3.48 ~ 178.87	86.04	0.12 ~ 6.56	1.52	—
BaA	4 环	0.1	1.30 ~ 80.52	40.83	N. D. ~ 5.53	1.47	4.4
Chr	4 环	0.01	1.46 ~ 156.06	62.12	N. D. ~ 6.85	1.12	4.4
BbF	5 环	0.1	6.16 ~ 393.52	173.25	5.36 ~ 37.35	19.87	4.4
BkF	5 环	0.1	1.62 ~ 104.76	44.89	2.67 ~ 32.94	16.16	4.4
BaP	5 环	1	1.06 ~ 103.29	47.21	6.79 ~ 49.75	18.69	4.4
DBA	5 环	1	3.25 ~ 247.59	106.3	N. D. ~ 10.33	4	4.4
IcdP	6 环	0.1	3.31 ~ 263.99	101.73	N. D. ~ 31.06	1.29	4.4
BghiP	6 环	0.01	0.58 ~ 57.25	25.27	N. D. ~ 16.05	2.09	—
LMW-PAHs			8.75 ~ 267.00	139.45	10.44 ~ 62.16	39.41	
HMW-PAHs			23.30 ~ 1 444.49	669.6	15.44 ~ 145.80	62.28	
$\sum_7$ PAHs			18.16 ~ 1 289.92	576.32	14.82 ~ 94.79	62.6	
$\sum$ PAHs			35.94 ~ 2 032.73	940.61	27.94 ~ 242.95	107.77	

1) LMW-PAHs 表示低分子量(2~3 环)多环芳烃化合物; HMW-PAHs 表示高分子量(4~5 环)多环芳烃化合物; N. D. 表示未检出; $\sum_7$ PAHs 表示 7 种致癌多环芳烃 (BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DBA、IcdP); TEF 表示毒性当量^[10]

湖泊群以及厦门杏林湾表层沉积物中 PAHs 污染水平相当；大冶湖水体中 PAHs 含量远高于珠江近海口以及舟山青浜岛水体中 PAHs 的含量，略高于西江水体 PAHs 的含量，低于巢湖水体、湖南饮用水以及广东养殖鱼塘水体中 PAHs 含量，远低于辽河大庆湖泊群以及钱塘江水体中 PAHs 含量。与国内相关研究对比可知大冶湖沉积物中多环芳烃污染与国内湖泊、河流污染程度大致相同，而水体中多环芳烃较之于国内湖泊、河流污染程度较轻。

表 2 国内典型湖泊、河流中沉积物、水体 PAHs 含量¹⁾

Table 2 Concentrations of PAHs in the sediment and water from domestic and overseas typical lakes and rivers						
项目	研究区域	PAHs 种类	含量范围	均值	污染水平	文献
沉积物/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	柘林湾	16	71.03 ~ 148.64	107.87	中等	[11]
	千岛湖	16	258.00 ~ 906.00	558.00	中等	[12]
	巢湖	16	109.70 ~ 6 245.80	908.51	中等	[13]
	杏林湾	16	413.00 ~ 2 748.81	949.56	中等	[14]
	太湖	16	256.60 ~ 1 709.00	829.00	中等	[15]
	安庆湖泊群	16	5.5 ~ 3 608.8	941.50	中等	[16]
	珠江	16	217.00 ~ 2 680.00	1 028.00	高水平	[6]
	辽河	16	120.80 ~ 22 120.00	3 281.00	高水平	[15]
	大冶湖	16	35.94 ~ 2 032.73	940.60	中等	本研究
	珠江口	16	15.50 ~ 54.90	—	—	[17]
水体/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	舟山	16	45.96 ~ 101.08	66.45	—	[18]
	西江	16	21.70 ~ 138.00	—	—	[19]
	巢湖	16	95.60 ~ 370.10	170.71	—	[13]
	湖南饮用水	16	70.22 ~ 673.80	253.13	—	[20]
	广东养殖鱼塘	16	53.55 ~ 679.97	272.53	—	[21]
	大庆湖泊群	16	200.00 ~ 1 210.00	—	—	[22]
	钱塘江	10	2 436.00 ~ 9 663.00	5 538.50	—	[23]
	大冶湖	16	27.94 ~ 242.95	107.77	—	本研究

1) 污染水平:低污染水平:0 ~ 100 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 中等污染水平:100 ~ 1 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 高污染水平:1 000 ~ 5 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 超高污染水平: > 5 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ [24]

2.2 表层沉积物及水体中 PAHs 分布及组成

2.2.1 表层沉积物及水体中 PAHs 分布

大冶湖表层沉积物及水体中 PAHs 分布及组成如图 2 图所示。由图 2(a)可知,沉积物中 PAHs 除了 D8 处外其他采样处的含量都较高,因大冶湖周边排污口很多,且尹家湖、红星湖、三里七湖这 3 个内湖的污染物直接排放至大冶湖,对大冶湖污染影响较大;表层沉积物中 PAHs 分布呈现湖中心高于岸边的趋势,可能与排污口冲刷,表层沉积物扰动岸边较湖心处大相关,最高值点在 D5 处,而 D5 处水体 PAHs 含量也较高,可能是排污口水体交换频繁、水流将污染物更多携带到水流最低区域(湖心区域),进而沉降到沉积物中,最小值出现在 D8 采样点,主要是因为 D8 靠近金海煤业开发区,接近西塞山开发区的南沿,新港物流园的西边界及韦源口排污口,表层沉积物受水体扰动大,颗粒物很难沉积,而表层沉积物中 PAHs 主要来自于水中悬浮颗粒物^[6],颗粒物所吸附的 PAHs 随颗粒物一起沉积至沉积物中。

PAHs 在水体中的分布与在表层沉积物中的分

布大致呈相反趋势,库岸区高于湖心区, $\sum$ PAHs 含量峰值在入湖区 D1 处,最小值在湖中心区 D4 处。D1、D2、D3 靠近尹家湖、红星湖、三里七湖这 3 个内湖入湖口,受内湖周边矿冶生产影响较大,其中 D1 处接近大港排污口; D4 为湖心位置,水体扰动较小,且受工矿企业等污染源影响较小,水体中多环芳烃含量较低;而 D6、D7、D8 处靠近金海煤业开发区,其中 D8 处水体污染较严重, PAHs 含量较高; D5 处水体 PAHs 含量也较高,一方面可能与 D5 处围网养鱼以及插网捕鱼有关,围网使得污染物集聚在网沿处,污染物难以扩散,从而引起水体 PAHs 含量增加,柯盛等^[25]证实养殖污染源对水体 PAHs 影响远大于生活等污染源的影响;另一方面可能与水体-沉积物处于吸附-解析动态平衡状态有关。

2.2.2 表层沉积物及水体中 PAHs 组成

有研究证实冶炼厂周边环境介质中 PAHs 组成以高环 PAHs 化合物为主^[26,27],大冶湖表层沉积物与水体中 PAHs 组成与其他冶炼厂周边环境 PAHs 组成相一致。由图 2(b)可知,大冶湖表层沉

积物中 4~5 环 HMW-PAHs 明显高于 2~3 环 LMW-PAHs 的含量,表层沉积物中 4~5 环占 $\sum$ PAHs 的 65.7%~71.3%,平均 71.2%;而在水体中主要以 2 环以及 4 环和 5 环 PAHs 为主,占水体中 $\sum$ PAHs 的 68%~97.55%,其中 HMW-PAHs 含量占 $\sum$ PAHs 的 57.8%,3 环以及 6 环 PAHs 含量基本可以忽略不计,特别是 6 环 PAHs 仅在 D1、D6、D8 处有检出,说明大冶湖水体及表层沉积物中 PAHs 受矿冶冶炼影响较严重. 水体中 6 环 PAHs 大多未检出而沉积物中 6 环 PAHs 含量也较低,但两者之

间 PAHs 组成相对比沉积物中 6 环的 PAHs 所占 $\sum$ PAHs 比例远高于水体,说明 PAHs 在环境介质之间迁移分配的过程中,4~6 环的 PAHs 化合物更加容易富集到沉积物中. HMW-PAHs 特别是 5 环及 6 环 PAHs 具有强烈的致癌特性,而在大冶湖沉积物及水体中 5 环及 5 环以上的 PAHs 含量都占 $\sum$ PAHs 的 30% 以上,说明研究区内 5~6 环组分可能会通过食物链富集从而对人体产生影响,特别对于大冶湖这样的淡水养殖场需要对 PAHs 污染加以关注.

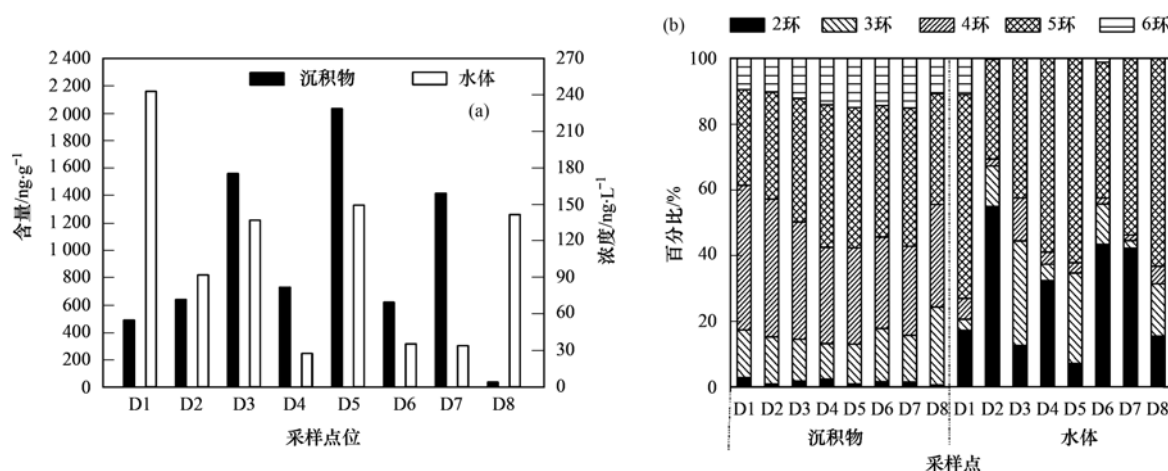


图 2 大冶湖表层沉积物及表层水体中 PAHs 分布及组成

Fig. 2 Distribution and constitution of PAHs in the surface sediment and water from the Daye Lake

2.3 表层沉积物及水体中 PAHs 来源解析

在环境介质中 PAHs 来源主要是人为来源,自然来源贡献很低^[28,29]. 人为来源主要为高温燃烧过程排放和石油产品的挥发、泄漏、低温转化不完全燃烧等, HMW-PAHs 主要来自于生物质及化石燃料的高温燃烧所排放,而 2~3 环 LMW-PAHs 则主要来源于石油产品的低温转化、不完全燃烧以及石油及其精炼品的挥发、泄漏等^[28,29]. 本研究利用 PAHs 组分分子比例诊断法来分析大冶湖表层沉积物及水体中 PAHs 的来源(图 3).

运用同分异构体比值进一步判断 PAHs 的来源,在实际运用中,往往选择稳定性较好的 PAH 同系物作为源解析的标志物,基于 PAH 同系物之间比值来区分燃烧源以及石油源,包括 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 等. 在本研究的水体中由于很多单体在水中未检出,则选取 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 来推断 PAHs 的来源. 大量研究证实^[6,8,30,31],当 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr}) < 0.4$ 时,指示石油泄

漏源,介于 0.4~0.5 之间时,指示石油及其精炼品的燃烧源, >0.5 时,指示煤等化石燃料及生物质的燃烧源;当 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) < 0.2$ 时,表明主要是石油泄漏污染源, >0.35 时表示煤等化石燃料及生物质的燃烧源,介于两者之间则指示石油及其精炼品的燃烧源. 在大冶湖水体及沉积物中 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值都大于 0.4,表明大冶湖水体及沉积物中 PAHs 都源自于石油或者生物质、煤等的燃烧;在大冶湖沉积物中 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值除了 D1、D2、D3 介于 0.2~0.35 之间,其他点位比值都大于 0.35,而在水体中由于 D6、D7 两个点位 BaA 及 Chr 未检出,其他点位 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值都大于 0.35,表明大冶湖水体及沉积物中 PAHs 主要受高温燃烧来源的影响. 来源解析显示大冶湖水体及沉积物中 PAHs 主要来自于燃烧源,而黄石市是一个矿冶之城,冶炼厂高温燃烧对于大冶湖水体沉积物中 PAHs 有显著地贡献,在所有采样点沉积物中高分子量 PAHs 都占据绝大部分,反映出了沉积物受矿冶冶炼长期累积污染的效应,同时也表现出了

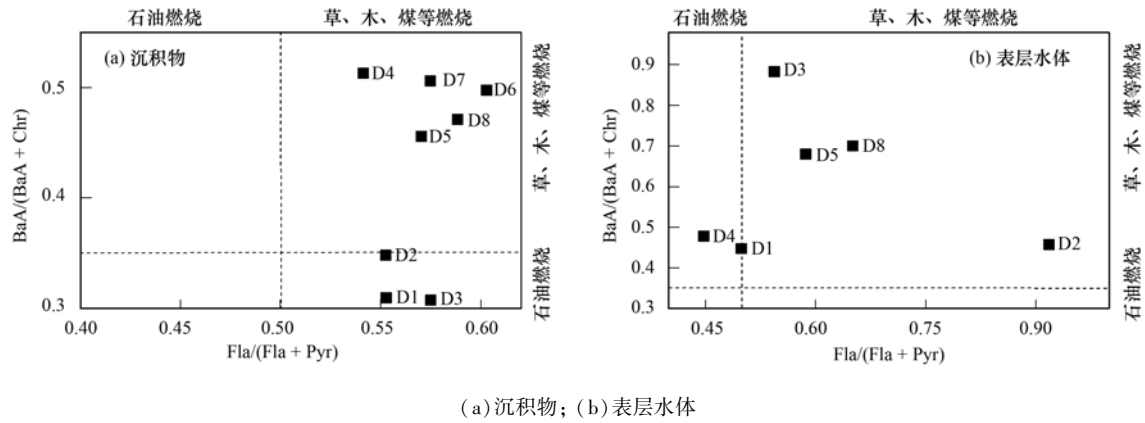


图3 大冶湖表层沉积物及表层水体中 PAHs 来源解析

Fig. 3 Sources of the PAHs in the surface sediment and water from the Daye Lake

沉积物是 POPs 汇的特性.

2.4 沉积物生态风险评价

质量基准法和质量标准法是用来评估土壤及沉积物中 PAHs 潜在生态风险的常用方法,本研究利用 Long 等^[9]提出的沉积物质量基准以及加拿大于 2006 年发布的多环芳烃沉积物质量标准^[12,32,33]对大冶湖沉积物潜在生态风险进行表征,评价结果见表 3. 质量基准法分为效应低值(ERL)对生物体毒副

作用发生的风险几率 < 10% 和对生物体毒副作用发生的风险几率 > 50% 的效应中值(ERM),相对污染系数 RCF 是对沉积物中 PAHs 污染的定量表征,RCF 为沉积物中 PAHs 浓度与效应低值的比值;质量标准法分为 5 个阈值 REL、TEL、OEL、PEL、FEL,分别表示罕见效应、临界效应、偶然效应、可能效应以及频繁效应的浓度阈值^[12,32,33],将 16 种优控 PAHs 任一种超过最高限值的点位给标注出,见表 3.

表3 沉积物质量基准法及质量标准法阈值及评价结果¹⁾

Table 3 Threshold and evaluation result of sediment quality guidelines and quality standard

PAHs	质量基准法阈值		评价结果		质量标准法阈值					评价结果	
	ERL	ERM	RCF > 1	点位	REL	TEL	OEL	PEL	FEL	区间	点位
Nap	160	2 100	—		17	35	120	390	1 200	> FEL	—
Acy	16	500	—		3.3	5.9	30	130	340		
Ace	44	640	—		3.7	6.7	21	89	940	PEL ~ FEL	D3、D5、D7
Flu	19	540	D3、D6、D7		10	21	61	140	1 200		
Phe	240	1 500	—		25	42	130	520	1 100		
Ant	85.3	1 100	—		16	47	110	240	1 100	OEL ~ PEL	D2、D4、D6
Fla	600	5 100	—		47	110	450	2 400	4 900		
Pyr	665	2 600	—		29	53	230	880	1 500		
BaA	261	1 600	—		14	32	120	390	760	TEL ~ OEL	D1
Chr	384	2 800	—		26	57	240	860	1 600		
BaP	430	1 600	—		11	32	150	780	3 200		
DBA	63.4	260	D3、D4、D5、D6、D7		3.3	6.2	43	140	200	REL ~ TEL	—
BbF	N. A.	N. A.			N. A.	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.		
BkF	N. A.	N. A.			N. A.	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.	< REL	D8

1) “N. A.”表示无最低安全阈值,“—”表示没有相应点位

质量基准法评价结果显示:大冶湖表层沉积物中 Flu 及 DBA 两种单体 PAH 在 D3、D6、D7 都超出了 ERL,介于 ERL ~ ERM 之间,而 DBA 在 D4、D5 也超出了 ERL,介于 ERL ~ ERM 之间,证明在大冶湖沉积物中 PAHs 潜在生态风险发生几率不大.但在 D5 处非常接近效应区间中值(ERM),且无最低

安全阈值的致癌 PAHs 单体 BbF、BkF 和 IcdP 在大冶湖沉积物中检出率均高达 100%,无最低安全阈值的 PAHs 只要存在于环境中就会对生物体产生毒副作用.

质量标准法评价结果显示:D8 小于 REL,低于罕见效应浓度值,对生物的不良影响概率可以忽略

不计,但 D8 处水体 PAHs 含量较高,尤其是 D8 处靠近两个工业园区,一个物流园区,需要对 D8 处水体以及排污口进行长期监测,防止 PAHs 污染进一步加重; D1 介于 TEL 和 OEL 之间,对生物的不良影响概率较低,但 D1 为大冶湖外湖入湖口,且水体中 PAHs 含量最高,需加强检测,最好能够长期在线监测,控制污染物排放入湖; D2、D4、D6 这 3 个点位 PAHs 浓度介于 OEL 与 PEL 之间,这 3 处表层沉积物中 PAHs 对生物体的潜在危害较大;表层沉积物中 PAHs 对生物潜在危害最大出现在 D3、D5、D7 这 3 个点位,PAHs 浓度介于 PEL 与 FEL 之间,而 D5 处为淡水养殖边界处,且水体 PAHs 含量也较高,需要引起关注,并对沉积物毒性风险进行评估,对 PAHs 污染采取治理措施。大冶湖所有采样点位中检出的 PAHs 浓度效应值都低于 FEL 值,表明大冶湖沉积物

对生物体潜在风险不高。但 D5、D6、D7 靠近大冶湖渔业养殖区域,且生态风险概率也处于中度偏高水准,因此该区域清淤工作需要重点清理,且清淤后的底泥需要妥善处置,以免引起二次污染。结合质量基准法和质量标准法可以看出大冶湖表层沉积物中最易对生物体造成危害的 PAHs 单体化合物是 Flu、DBA 以及没有最低安全限值的 BbF、BkF 和 IcdP,对生物的不良影响概率最高处是 D3、D5、D7。

2.5 水体健康风险评价

利用 USEPA 推荐的终生致癌风险 (ILCRs) 结合毒性当量浓度 (TEQ_{BaP})^[10,34,35] 对大冶湖水体中 PAHs 对人体的潜在致癌风险进行定量表征,地表水及地下水 PAHs 主要经过摄入以及皮肤接触两个暴露方式会对人体产生潜在致癌风险,计算公式如下(其中各参数含义及取值见表 4)^[35-37]:

$$TEQ_{BaP} = \sum c_i \times TEF$$

$$ILCRs_{\text{摄入}} = \frac{TEQ_{BaP} \times IRW \times CSF_i \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$ILCRs_{\text{皮肤接触}} = \frac{TEQ_{BaP} \times SA \times K_p \times ABS \times ET \times EF \times ED \times CF \times CSF_d}{BW \times AT}$$

表 4 终生致癌风险评价参数^[35-37]

Table 4 Parameters used for estimation of the incremental lifetime cancer risks (ILCRs)

参数	含义	取值/单位	参数	含义	取值/单位
c_i	化合物浓度	见表 1	SA	皮肤暴露面积	2 800 cm ²
TEF	毒性当量	见表 1	K_p	皮肤渗透常数	0.001
IRW	直接摄入率	2.0 L·d ⁻¹	ABS	皮肤吸收因素	0.001
EF	每年暴露天数	350 d	ET	暴露时间	0.6 h·d ⁻¹
ED	持续暴露时间	70 a	CF	转换系数	1 L·(1 000 cm ³) ⁻¹
BW	体重	70 kg	CSF_i	摄入 BaP 的致癌斜率系数	7.3 kg·d·mg ⁻¹
AT	平均时间	ED × EF d	CSF_d	皮肤接触 BaP 的致癌斜率系数	25 kg·d·mg ⁻¹

由表 5 可知大冶湖水体中 PAHs 总致癌风险 ($\sum ILCRs$) 为 $1.49 \times 10^{-5} \sim 1.59 \times 10^{-6} a^{-1}$ 之间,均值为 $5.08 \times 10^{-6} a^{-1}$;通过皮肤接触途径产生的致癌风险介于 $4.57 \times 10^{-9} \sim 4.26 \times 10^{-8} a^{-1}$,均值为 $1.46 \times 10^{-8} a^{-1}$,通过直接摄入途径产生的致癌风险介于 $1.56 \times 10^{-5} \sim 1.48 \times 10^{-6} a^{-1}$ 之间,均值为 $5.06 \times 10^{-6} a^{-1}$,通过摄入暴露途径产生的致癌风险是皮肤接触暴露途径的 $10^3 \sim 10^4$ 倍。大冶湖水体中 PAHs 总致癌风险 ($\sum ILCRs$) 都介于 USEPA 所推荐的可接受致癌风险水平 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 之间,除 D1、D5、D8 这 3 处外都低于国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-6} a^{-1}$,D1 处致癌风险是 ICRP 最大可接受风险水平的 2.98 倍,但都高于瑞典环保局和英国皇家协会推荐

的最大可接受风险水平 $1.0 \times 10^{-6} a^{-1}$,D1 处甚至超出了该限值一个数量级。致癌风险最高出现在 D1 处,最低值出现在 D6 处。需要对入湖区加以防治,对 3 个内湖水体污染加以治理,防治内湖污染物对大冶湖水体的进一步污染。大冶湖水体中 ILCRs 值分布与 TEQ_{BaP} 分布相一致,而 TEQ_{BaP} 值与 7 种致癌物质浓度有关,因此 ILCRs 值与 7 种致癌 PAHs 浓度呈正相关关系,所以 ILCRs 最低值出现在 D6 处而不是 $\sum$ PAHs 最低值 D4 处,因为 D4 处 7 种致癌 PAHs 浓度含量高于 D6 处也高于 D7 处,因此 D4 处健康风险反而比 D6、D7 处要高。虽然大冶湖不是饮用水源地,但多环芳烃亲脂疏水特性使其可以在生物体内大量富集,通过食物链最终进入人体,而大冶湖为淡水渔业养殖场,因此实际致癌风险还大

表 5 水体中 PAHs 毒性当量浓度及终生致癌风险 (ILCR)

Table 5 TEQ_{BaP} and incremental lifetime cancer risks of the PAHs in water from the Daye Lake

项目	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	均值
TEQ _{BaP} /ng·L ⁻¹	71.03	10.31	14.71	9.60	30.32	7.62	9.51	41.02	24.26
皮肤接触/a ⁻¹	4.26E-08	6.18E-09	8.83E-09	5.76E-09	1.82E-08	4.57E-09	5.70E-09	2.46E-08	1.46E-08
摄入/a ⁻¹	1.48E-05	2.15E-06	3.07E-06	2.00E-06	6.32E-06	1.59E-06	1.98E-06	8.56E-06	5.06E-06
∑ILCRs/a ⁻¹	1.49E-05	2.16E-06	3.08E-06	2.01E-06	6.34E-06	1.59E-06	1.99E-06	8.58E-06	5.08E-06

于计算值。因此需要对大冶湖多环芳烃污染开展防治工作,特别是入湖区,需要对 3 个内湖排进大冶湖的水体进行监控,并对 3 个内湖水体加以治理。

3 结论

(1)在大冶湖表层沉积物及水体中 16 种 EPA 优控 PAHs, ∑PAHs 分别为 35.94 ~ 2 032.73 ng·g⁻¹、27.94 ~ 242.95 ng·L⁻¹,平均值含量分别为 940.61 ng·g⁻¹、107.77 ng·L⁻¹,表层沉积物污染呈现湖中高于岸边趋势,水体则呈相反趋势,表层沉积物中以 4~5 环高环化合物为主要组分,在水体中主要以 2 环以及 4 环和 5 环 PAHs 为主,大冶湖与国内其他湖泊污染水平相当,需对清淤后的污泥进行妥善处理。

(2)来源解析表明大冶湖表层沉积物及水体中多环芳烃主要来自于高温燃烧源,沉积物中 PAHs 高环分子都占据绝大部分,反映出了沉积物受矿冶冶炼长期累积污染的效应,同时也表现出了沉积物是 POPs 汇的特性。

(3)大冶湖沉积物中各 PAHs 化合物的浓度均未超过 ERM 以及 FEL,说明大冶湖表层沉积物 PAHs 潜在生态风险发生概率不高,但是有 3 个点位已经超过了质量标准法的可能效应浓度值,且这 3 个点位靠近渔业养殖区,需要对环境及人体风险进行评价。

(4)健康风险评价表明,大冶湖水体中 PAHs 终生致癌风险水平处于美国 EPA 推荐的可接受水平范围内,但都高于瑞典环保局和英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平 1.0 × 10⁻⁶ a⁻¹,存在一定的潜在危害,7 种致癌 PAHs 的污染需要加强治理,需要对入湖区域污染加以治理,控制污染物入湖。

参考文献:

[1] 周婕成,陈振楼,毕春娟,等.温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源[J].环境科学,2012,33(12):4226-4236.
Zhou J C, Chen Z L, Bi C J, et al. Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban rivers of Wenzhou City [J]. Environmental Science, 2012, 33(12):

4226-4236.
[2] Adeleye A O, Jin H Y, Di Y, et al. Distribution and ecological risk of organic pollutants in the sediments and seafood of Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, East China Sea[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 1540-1548.
[3] Hawliczek A, Nota B, Ceniijn P, et al. Developmental toxicity and endocrine disrupting potency of 4-azapyrene, benzo b fluorene and retene in the zebrafish *Danio rerio*[J]. Reproductive Toxicology, 2012, 33(2): 213-223.
[4] Zakaria M P, Takada H, Tsutsumi S, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia; a widespread input of petrogenic PAHs [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(9): 1907-1918.
[5] 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.
Lv J G, Bi C J, Chen Z L, et al. Distrabution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil of the Chongming Island in Shanghai [J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4270-4275.
[6] 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.
Luo X J, Chen S J, Mai B X, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from rivers of Pearl River Delta and its nearby South China Sea[J]. Environmental Science, 2005, 26(4): 129-134.
[7] 钱冉冉,闫景明,吴水平,等.厦门市冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析[J].环境科学,2012,33(9):2939-2945.
Qian R R, Yan J M, Wu S P, et al. Characteristics and sources of PM₁₀-bound PAHs during haze period in winter-spring of Xiamen[J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 2939-2945.
[8] 孙玉川,沈立成,袁道先.表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析[J].环境科学,2014,35(6):2091-2098.
Sun Y C, Shen L C, Yuan D X. Contamination and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring water[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2091-2098.
[9] 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(1): 81-97.
[10] Zhang J Q, Qu C K, Qi S H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric dustfall from the industrial corridor in Hubei Province, Central China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 37(5): 891-903.

- [11] 郭鹏然, 卫亚宁, 王毅, 等. 柘林湾养殖区表层沉积物多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(4): 671-679.
- Guo P R, Wei Y N, Wang Y, *et al.* Distribution, source and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the aquiculture sea area, Zhelin Bay in Guangdong Province, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(4): 671-679.
- [12] 张明, 唐访良, 吴志旭, 等. 千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 253-258.
- Zhang M, Tang F L, Wu Z X, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Xin'anjiang Reservoir [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(1): 253-258.
- [13] Qin N, He W, Kong X Z, *et al.* Distribution, partitioning and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water-SPM-sediment system of Lake Chaohu, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **496**: 414-423.
- [14] 程启明, 黄青, 廖祯妮, 等. 厦门杏林湾水系表层沉积物中 PAHs 分析与风险评估[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 179-185.
- Cheng Q M, Huang Q, Liao Z N, *et al.* Risk assessment and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Xinglin Bay Suburb rivers of Xiamen [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 179-185.
- [15] 刘楠楠, 陈鹏, 朱淑贞, 等. 辽河和太湖沉积物中 PAHs 和 OCPs 的分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 293-300.
- Liu N N, Chen P, Zhu S Z, *et al.* Distribution characteristics of PAHs and OCPs in sediments of Liaohe River and Taihu Lake and their risk evaluation based on sediment quality criteria[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(2): 293-300.
- [16] 李法松, 韩铖, 操璟璟, 等. 长江安庆段及毗邻湖泊沉积物中多环芳烃分布及风险评价[J]. 环境化学, 2016, **35**(4): 739-748.
- Li F S, Han C, Cao J J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Anqing section of Yangtze River and lakes around Anqing City [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(4): 739-748.
- [17] 罗孝俊, 陈社军, 余梅, 等. 多环芳烃在珠江口表层水体中的分布与分配[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2385-2391.
- Luo X J, Chen S J, Yu M, *et al.* Distribution and partition of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from the Pearl River Estuary[J]. Environmental Science, 2008, **29**(9): 2385-2391.
- [18] 郑煌, 邢新丽, 顾延生, 等. 舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 513-519.
- Zheng H, Xing X L, Gu Y S, *et al.* Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental media from Qingbang Island, Zhoushan, China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 513-519.
- [19] Deng H M, Peng P A, Huang W L, *et al.* Distribution and loadings of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xijiang River in Guangdong, South China[J]. Chemosphere, 2006, **64**(8): 1401-1411.
- [20] 常明, 王贝贝, 赵秀阁, 等. 湖南某地饮用水中多环芳烃的健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(8): 904-909.
- Chang M, Wang B B, Zhao X G, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in a city in Hunan Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(8): 904-909.
- [21] 谢文平, 朱新平, 郑光明, 等. 广东罗非鱼养殖区水体及鱼体中多环芳烃的含量与健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(12): 2450-2456.
- Xie W P, Zhu X P, Zheng G M, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and fish from *Tilapia* pond of Guangdong[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(12): 2450-2456.
- [22] 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 等. 大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4291-4301.
- Wang X D, Zang S Y, Zhang Y H, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of PAHs in water and fishes from Daqing Lakes [J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4291-4301.
- [23] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, *et al.* Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China[J]. Water Research, 2004, **38**(16): 3558-3568.
- [24] An N N, Liu S L, Yin Y J, *et al.* Spatial distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the reservoir sediments after impoundment of Manwan Dam in the middle of Lancang River, China[J]. Ecotoxicology, 2016, **25**(6): 1072-1081.
- [25] 柯盛, 赵利容, 孙省利. 湛江湾陆源入海排污口海域 PAHs 分布特征及来源[J]. 海洋环境科学, 2014, **33**(1): 71-77.
- Ke S, Zhao L R, Sun S L. Distribution characteristics and sources of PAHs in sea water of the land based outlet of Zhanjiang Bay[J]. Marine Environmental Science, 2014, **33**(1): 71-77.
- [26] 田靖, 朱媛媛, 杨洪彪, 等. 大型钢铁厂及其周边土壤多环芳烃污染现状调查、评价与源解析[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 1002-1008.
- Tian J, Zhu Y Y, Yang H B, *et al.* Investigation, assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in soil from a large iron and steel plant and its surrounding areas, in China [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(6): 1002-1008.
- [27] 吴迪, 汪宜龙, 刘伟健, 等. 河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 740-749.
- Wu D, Wang Y L, Liu W J, *et al.* Concentrations and component profiles PAHs in surface soils and wheat grains from the cornfields close to the steel smelting industry in Handan, Hebei Province [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 740-749.
- [28] Khairy M A, Lohmann R. Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Alexandria, Egypt[J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 895-903.
- [29] Jiang Y F, Hu X F, Yves U J, *et al.* Status, source and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust of an industrial city, NW China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **106**: 11-18.

- [30] Ye B X, Zhang Z H, Mao T. Pollution sources identification of polycyclic aromatic hydrocarbons of soils in Tianjin area, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(4): 525-534.
- [31] 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.
Ning Y, Ke Y C, Deng J C, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment in Lake Chaohu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(6): 891-898.
- [32] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 353-360.
- [33] Yang Y, Ligouis B, Pies C, *et al.* Occurrence of coal and coal-derived particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a river floodplain soil [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(1): 121-129.
- [34] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [35] Liang F, Yang S G, Sun C. Primary Health Risk Analysis of Metals in Surface Water of Taihu Lake, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(4): 404-408.
- [36] Sun C Y, Zhang J Q, Ma Q Y, *et al.* Human health and ecological risk assessment of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking source water from a large mixed-use reservoir[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(11): 13956-13969.
- [37] Sarria-Villa R, Ocampo-Duque W, Pérez M, *et al.* Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **540**: 455-465.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301

