Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.8
第40卷 第8期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷　第 8 期
2019 年 8 月 15 日

目　次

2016 年京津冀地区红色预警时段 $PM_{2.5}$ 污染特征与浓度控制效果 …… 张冲, 郎建垒, 程水源, 王晓琦(3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 …… 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪(3405)
合肥市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素组成特征及重污染成因分析 …… 刘可可, 张红, 刘桂建(3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 …… 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞珑, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红(3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 …… 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖(3431)
长春秋季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 …… 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟(3438)
中国城市扩张及空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 污染的影响 …… 王桂林, 张炜(3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 排放的影响 …… 邓建国, 马子轸, 李振, 段雷, 蒋靖坤(3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 …… 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶(3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 …… 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳(3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 …… 宫静, 祁建华, 李鸿涛(3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 …… 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钏, 郭鹏然(3489)
截污调水后滇池表层沉积物中 16 种 PAHs 的分布特征 …… 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏(3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 …… 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟(3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 …… 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰(3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 …… 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳(3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 …… 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏(3539)
新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源 …… 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌(3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 …… 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志(3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 …… 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫(3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 …… 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴(3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 …… 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文(3588)
汾河下游水体 *nirS* 型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 …… 汪银龙, 冯民权, 董向前(3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 …… 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉(3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 …… 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然(3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响 …… 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷(3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 …… 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟(3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性 …… 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬(3633)
不同氨氮浓度对 4 株常见藻株生长及酶活性的影响 …… 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭(3642)
3 种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 …… 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水(3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 …… 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁(3660)
缺氧 MBBR 耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 …… 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀(3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 …… 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐(3675)
FeS 自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 …… 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海(3683)
ANAMMOX 体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 …… 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇(3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 …… 张冰, 吴林蔚, 文湘华(3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 …… 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海(3706)
异养硝化细菌 *Acinetobacter junii* NP1 的同步脱氮除磷特性及动力学分析 …… 杨垒, 陈宁, 任勇翔, 崔珅, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯(3713)
Type 0092 丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 …… 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻(3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及 N_2O 产生特征 …… 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双(3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 …… 王一宇, 王圣森, 戴九兰(3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 …… 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋(3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 …… 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞(3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 …… 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌(3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 …… 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮(3774)
铁铈氧化物对土壤As(Ⅴ)和 P 的稳定化效果 …… 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕(3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤 As 的稳定化作用 …… 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣(3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 …… 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水(3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 …… 汪月, 张名豪, 赵秀兰(3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 …… 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明(3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 …… 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅(3825)
不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 …… 何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡(3833)
基于成组生物毒性测试的 $PM_{2.5}$ 毒性 …… 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭(3840)
《环境科学》征订启事(3587)　《环境科学》征稿简则(3595)　信息(3611, 3705, 3745)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第8期 2019年8月
Vol. 40, No. 8 Aug., 2019

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征

胡昕怡[1], 高冰丽[2], 陈坦[1,3*], 王洪涛[2*], 金军[1,3], 饶竹[4], 朱雪芹[5], 王雪郡[1], 魏抱楷[1], 战楠[4], 刘彦廷[2], 戚敏[1]

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081; 4. 自然资源部生态地球化学重点实验室, 北京 100037; 5. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 截污调水等工程实施后, 滇池的外源污染已得到有效控制, 表层沉积物等内源污染物应加以重视. 为研究滇池表层沉积物中16种多环芳烃(PAHs)的分布特征, 采用气相色谱-质谱联用法(GC-MS)分析了2016年12月采集的19个滇池表层沉积物样品的PAHs含量, 解析其时空分布规律、来源及生态风险. 滇池表层沉积物中总多环芳烃(TPAHs)的含量范围为92.31~1 546.78 ng·g^{-1}, 平均值为496.30 ng·g^{-1}, 草海TPAHs含量(平均932.37 ng·g^{-1})远高于外海(平均380.02 ng·g^{-1}), 随着截污调水工程的开展, TPAHs含量较2012年大幅下降, 已处于我国重点水域中较低水平. 滇池表层沉积物中含量最高的物质为荧蒽(80.65 ng·g^{-1}), 毒性当量(TEQ)含量最高的物质为二苯并[a, h]蒽(42.97 ng·g^{-1}). PAHs组成以4环及5~6环为主(分别占总含量的40.38%和40.22%), PAHs构成较以往大体一致. 分子比值法分析结果表明, 滇池表层沉积物中PAHs主要由生物质或煤的燃烧贡献. 基于潜在生态风险标志对比法评估, 全湖总体处于低风险水平, 但草海的生态风险相对较高, 值得进一步关注. 本研究结果可为滇池水质的保持与提升提供基础数据和重要参考.

关键词: 滇池; 表层沉积物; 多环芳烃(PAHs); 含量; 毒性当量(TEQ)

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)08-3501-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201901113

Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project

HU Xin-yi[1], GAO Bing-li[2], CHEN Tan[1,3*], WANG Hong-tao[2*], JIN Jun[1,3], RAO Zhu[4], ZHU Xue-qin[5], WANG Xue-jun[1], WEI Bao-kai[1], ZHAN Nan[4], LIU Yan-ting[2], QI Min[1]

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Public Health, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Ecological Geochemistry, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China; 5. Chinese Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The external pollution of Dianchi Lake has been effectively controlled with the implementation of the integrated water environment control project. However, further attention should be paid to endogenous pollutants, such as surface sediments. To investigate the distribution of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Dianchi Lake, PAH concentrations in 19 surface sediment samples (collected in December 2016) were quantitatively measured by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The spatial and temporal distribution, sources, and ecological risks were also analyzed. The concentration of total PAHs (TPAHs) in the Dianchi Lake surface sediments varied in the range of 92.31-1546.78 ng·g^{-1} with an average of 496.30 ng·g^{-1}. The average concentration of TPAHs in the surface sediments from Caohai (932.37 ng·g^{-1}) was much greater than that from Waihai (380.02 ng·g^{-1}). With the implement of the integrated water environment control project, the concentration of TPAHs in the surface sediments from Dianchi Lake was significantly lower than those detected in 2012, and was already relatively low level among other key waterbodies in China. The PAH with the highest concentration was fluoranthene (80.65 ng·g^{-1}) and the substance with the highest toxic equivalent quantity (TEQ) was dibenz[a, h] anthracene (42.97 ng·g^{-1}). The PAHs were mainly composed of 4 ring and 5-6 ring compounds (with the concentration ratio of 40.38% and 40.22%, respectively), which indicated that the proportions of middle-ring and high-ring compounds were generally consistent. The results of the molecular diagnostic ratio analysis showed that the primary source of PAHs in Dianchi Lake surface sediments are biomass and coal combustion. Based on the potential ecological risk marker comparison method, the entire lake was classified as having a low ecological risk, while the ecological risk of Caohai was relatively higher, which should be concerned further. The results provide initial data and act as an important reference for the conservation and improvement of water quality in Dianchi Lake.

Key words: Dianchi Lake; surface sediments; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); concentration; toxic equivalent quantity (TEQ)

收稿日期: 2019-01-14; **修订日期**: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578312, 41877188); 自然资源部生态地球化学重点实验室开放基金项目; 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205-001-06)

作者简介: 胡昕怡(1997~), 女, 主要研究方向为场地污染调查与修复, E-mail: huxinyi9725@163.com

* 通信作者, E-mail: chentan05@tsinghua.org.cn; htwang@tsinghua.edu.cn

滇池是我国西南地区重要的淡水湖泊. 为改善滇池的水环境质量, 近年来全面实施了环湖截污、引水入滇(即牛栏江-滇池补水工程)等六大工程, 外源污染得到有效控制. 2016 年, 滇池水质近 20 年首次由劣Ⅴ类提升为Ⅴ类[1], 内源污染物已成为影响水质的关键因素.

多环芳烃(PAHs)是一类至少含有两个苯环的有机化合物, 广泛分布于环境介质中, 其中一些种类具有"三致"效应[2]. 除极少量由自然过程产生外, PAHs 主要由工业过程、生物质燃烧和化石燃料燃烧等人类活动产生、排放, 并通过各种途径进入水、土壤、大气等环境介质, 经食物链生物放大与富集后, 威胁人类健康和生态安全[3]. 我国 PAHs 排放强度大[4]、污染范围广[5~13]. 水体是环境中 PAHs 重要的汇, 因其具有疏水性, 水体中的 PAHs 吸附到悬浮颗粒后沉降于沉积物, 或直接被表层沉积物富集, 因此, 表层沉积物是水体中 PAHs 的重要储库.

截污调水前, 滇池流域表层沉积物中 PAHs 含量较高, 具有潜在生态风险[12~16]. 截污调水工程实施后, 滇池水质、水量变化极可能造成表层沉积物中 PAHs 解吸, 形成二次污染. 对于滇池水质首次全面转好(2016 年)之后的水质管控而言, 掌握滇池全湖范围表层沉积物分布特征, 对于滇池水质的保持与提升具有重要意义. 为分析滇池截污调水后表层沉积物中 PAHs 的分布情况, 本文于 2016 年 12 月采集了滇池 19 个表层沉积物样品, 以气相色谱-质谱联用法(GC-MS)分析样品中美国环境保护署(USEPA)列出的 16 种优先控制 PAHs 的含量, 解析其时空分布特征、来源及生态风险.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

在滇池全湖范围内, 河流入湖口、湖滨带及湖泊中心等典型功能区域均匀布设 19 个采样点(图 1), 其中草海 4 个采样点(1 ~ 4 号), 外海 15 个采样点(5 ~ 19 号). 草海和外海以海埂大坝为界, 5 号采样点设置在海埂大坝附近. 9 个采样点(1、3、5、18、17、9、10、13 和 12 号)大致由北向南分布, 视为剖面, 以解析表层沉积物中 PAHs 的空间分布特点. 采样时间为 2016 年 12 月 4 ~ 5 日, 当日微风, 湖水平静. 以柱状重力采样器(采样管直径 10 cm, 长度 80 cm)采集滇池底部 0 ~ 20 cm 的表层沉积物, 样品以聚乙烯自封袋密封后置于采样箱中低温保存, 上岸后将样品冷冻保存(-18℃), 经冷冻干燥(约 -50℃)后研磨过 60 目筛(0.25 mm), 置于聚乙烯自封袋中在 4℃以下保存备用.

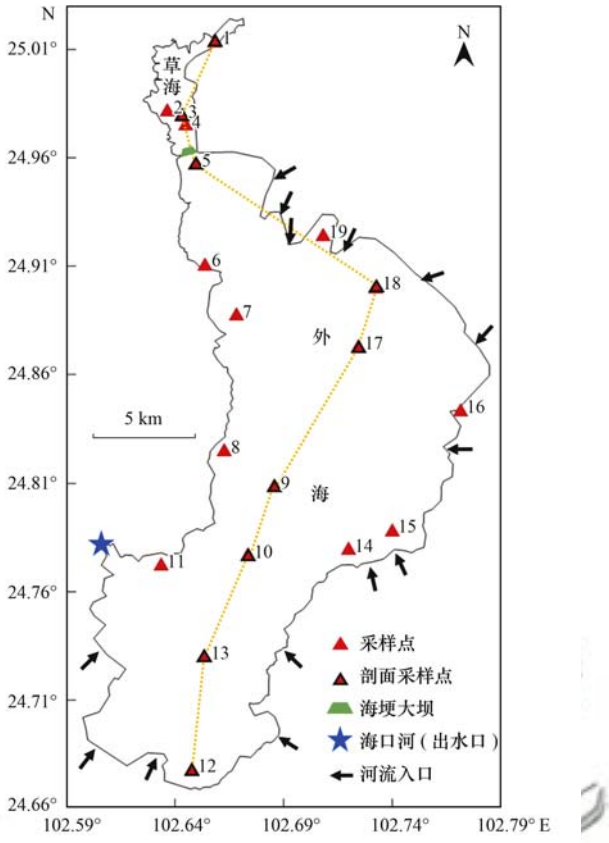


图 1 滇池表层沉积物采样点布置

Fig. 1 Sampling site layout for surface sediments in Dianchi Lake

1.2 试剂与材料

16 种 PAHs 的混合标准溶液, 包括萘(NAP)、苊烯(ACY)、苊(ACE)、芴(FLU)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLT)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(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(IDP)、二苯并[a, h]蒽(DBA)和苯并[g, h, i]苝(BPY), 浓度 0.2 mg·mL^{-1}, 美国 AccuStandard. 内标物:萘-D_8、苊-D_{10}、菲-D_{10}、䓛-D_{12}、苝-D_{12}, 浓度1 000 μg·mL^{-1}, 美国 AccuStandard. 替代物:2-氟联苯、对三联苯-D_{14}, 浓度1 000 μg·mL^{-1}, 美国 AccuStandard. 正己烷为农残级, 纯度 95%, J&K Scientific; 丙酮为 HPLC 级, 纯度 99%, 美国 Fisher.

1.3 样品前处理

向 2 g 样品中加入 2 g Na_2SO_4, 以脱脂滤纸包覆, 置于索氏提取管内. 向管内加入 10 μg·mL^{-1}的替代物(2-氟联苯和对三联苯-D_{14}混合标准溶液)10 μL, 向已加入石油醚的平底烧瓶中加入少许铜片, 回流 6 ~ 8 h. 转移残液, 氮吹浓缩(KL512/509J 型 12 位氮吹仪, 配数控恒温水浴, 北京康林科技有限责任公司), 加入 10 μg·mL^{-1}的内标物 10 μL 后以

正己烷定容至 1.0 mL 待测.

1.4　GC-MS 分析

日本 Shimadzu QP-2010 Ultra 气质联用仪. 美国 Agilent 公司 DB-5MS 色谱柱(30.0 m×0.25 mm i. d., 膜厚 0.25 μm. 升温程序:初始温度 70℃, 保留 3 min, 以 10 ℃·min^{-1}升温至 270℃, 保留 1 min, 以 5 ℃·min^{-1}升温至 285℃, 以 10 ℃·min^{-1}继续升温至 305℃, 保留 10 min. 进样口、四极杆温度为 280℃, 离子源温度为 240℃. 载气流速为 1.3 mL·min^{-1}, 不分流模式进样 1 μL. 电子轰击(EI)离子源, 选择离子模式(SIM)定量分析.

1.5　质量控制

采用空白样品、空白加标样品、平行样品控制数据质量. 以石英砂为空白基质, 其中加入氘代混合 PAHs 标准(萘-D_8、苊-D_{10}、菲-D_{10}、䓛-D_{12}和苝-D_{12}). 每 20 个样品添加 1 组上述质量控制样品. 本研究中空白加标回收率为 60.5% ~ 106.4%. 平行样品相对标准偏差平均值低于 10.0%. 替代物 2-氟联苯和对三联苯-D_{14}的回收率分别为 66.4% ~ 71.2%、105.0% ~ 127.0%.

2　结果与讨论

2.1　表层沉积物的 PAHs 分布特征

滇池表层沉积物中 TPAHs 含量范围为 92.31 ~ 1 546.78 ng·g^{-1}, 平均含量为 496.30 ng·g^{-1}(以干重计); 各类 PAHs 的含量在 0 ~ 264 ng·g^{-1}之间, 平均值为 34.42 ng·g^{-1}(表 1). 滇池表层沉积物中 TPAHs 含量呈现以下分布趋势[图 2(a)]:以海埂大坝为界, 海埂大坝以北区域(草海), TPAHs 含量自北向南逐渐减小; 海埂大坝以南区域(外海), TPAHs 含量整体分布均匀, 南部略高, 沿岸略低于湖心. 采样前最近的一次草海湖底清淤工程, 中部及北部于 2002 年完成, 其余地区于 2010 年完成. 草海中部及北部污染物再次淤积, 导致中北部表层沉积物中 TPAHs 含量高于南部. 湖泊沿岸地区疏浚更加容易、彻底, 同时, 滇池流域水网密布, 沿岸分布多个入湖口, 复杂的水利条件、较快的流速不利于污染物的沉积, 使得外海沿岸地区的 TPAHs 含量低于湖心.

草海表层沉积物中 TPAHs 含量(411.85 ~ 1 546.78 ng·g^{-1})明显高于外海(92.31 ~ 866.78 ng·g^{-1}), 不同种类 PAHs 的含量较外海高 0.74 ~ 2.45 倍. 草海曾长期作为昆明市生产生活污水的受纳水体, 污染物随污水排入草海后, 经海埂大坝缓慢流入外海, 污染物进入外海后得到稀释, 草海表层沉积物中较外海截留了更多 PAHs.

表 2 对比了 Zhao 等[13]于 2012 年 12 月采集的滇池表层沉积物中 PAHs 及本研究的变化情况. 从全湖、草海和外海这 3 个方面比较, 2016 年滇池表层沉积物 TPAHs 含量均发生了显著下降. 全湖 TPAHs 平均含量下降1 047 ng·g^{-1}(降幅 67.8%), 草海下降3 816 ng·g^{-1}(降幅 80.4%), 外海下降 682 ng·g^{-1}(降幅 64.2%). TPAHs 含量大幅下降, 推测与截污调水工程密切相关. 截污工程有助降低 PAHs 排放、进入水体的总量, 调水工程通过增加入湖水量、提升了水体的更新速度, 都可能是滇池表层沉积物中 TPAHs 含量降低的重要原因. 表 3 汇总了近 10 年我国重点水域表层沉积物中 TPAHs 的含量情况, 2016 年滇池表层沉积物中 TPAHs 含量在我国重点水域中已处于较低水平.

表 1　滇池表层沉积物中 PAHs 的含量[1)]/ng·g^{-1}

Table 1　PAHs concentrations in the surface sediments of Dianchi Lake/ng·g^{-1}

物质	草海(采样点 4 个)			外海(采样点 15 个)			全湖	
	范围	中位数	平均值	范围	中位数	平均值	中位数	平均值
NAP	4.11 ~ 73.92	35.38	37.20	3.08 ~ 46.86	10.24	15.04	12.76	19.70
ACY	n. d. ~ 12.61	6.88	7.29	n. d. ~ 3.89	3.89	3.89	5.39	6.44
ACE	n. d. ~ 12.09	10.39	8.60	n. d. ~ 7.75	2.53	3.30	2.99	4.89
FLU	23.03 ~ 91.35	34.26	45.73	n. d. ~ 49.66	16.23	19.24	17.87	26.81
PHE	36.39 ~ 152.91	71.58	83.11	10.80 ~ 90.22	32.59	37.99	36.39	47.49
ANT	11.81 ~ 42.35	22.06	24.57	2.20 ~ 29.42	6.45	7.13	6.87	10.80
FLT	85.01 ~ 264.24	140.83	157.73	15.73 ~ 148.6	64.31	60.09	67.86	80.65
PYR	66.25 ~ 214.52	112.10	126.24	11.53 ~ 111.3	43.67	41.24	45.85	59.13
BaA	19.85 ~ 88.14	51.76	52.88	6.37 ~ 46.37	16.62	20.92	23.76	27.65
CHR	12.65 ~ 153.51	61.83	72.45	8.56 ~ 49.74	22.45	24.22	22.49	34.38
BbF	23.49 ~ 103.88	48.69	56.19	6.87 ~ 52.1	29.42	26.61	29.42	32.84
BkF	5.15 ~ 34.22	12.04	15.87	1.59 ~ 39.13	7.32	8.86	7.32	10.33
BaP	11.16 ~ 64.14	36.40	37.02	n. d. ~ 34.78	12.94	14.27	13.25	19.33
IDP	36.89 ~ 127.93	74.44	78.42	8.29 ~ 70.99	43.57	39.48	43.57	47.68
DBA	30.85 ~ 100.69	63.55	64.66	8.07 ~ 62.49	43.27	37.18	43.27	42.97
BPY	24.06 ~ 124.57	62.44	68.38	6.27 ~ 58.53	35.23	33.32	35.23	40.70
TPAHs	411.85 ~ 1 546.78	885.43	932.37	92.31 ~ 866.78	422.43	380.02	435.76	496.30

1) n. d. 表示未检出

表 2 滇池 2012 年表层沉积物 PAHs 含量与本研究对比

Table 2 Comparison of PAH concentrations in the surface sediments of Dianchi Lake in 2012 and during the study period

项目		2016-12(本研究)	2012-12[13]
采样点数量		19	23
TPAHs 含量/ng·g^{-1}	全湖	92.31 ~ 1 546.78(平均值:496.30)	210 ~ 11 070(平均值:1 543)
	草海	411.85 ~ 1 546.78(平均值:932.37)	1 492 ~ 11 070(平均值:4 748)
	外海	92.31 ~ 866.78(平均值:380.02)	210 ~ 2 506(平均值:1 062)
PAHs 组成/%	2 ~ 3 环	11.92 ~ 27.96	5.5 ~ 27.3
	4 环及 5 ~ 6 环	72.04 ~ 88.08	72.7 ~ 94.5

表 3 我国重点水域表层沉积物中 TPAHs 含量

Table 3 Concentrations of TPAHs in the surface sediments of key waters in China

地点	TPAHs 含量/ng·g^{-1}	采样日期(年-月)	采样点数量/个	文献
长江武汉段干流	46.1 ~ 424.0	2016-08	15	[18]
长江中下游和淮河沿岸的浅湖	11.8 ~ 231.9	2008 ~ 2009	111	[7]
黄河三角洲及邻近的沿海地区	56.69 ~ 227.96	2012-11	18	[6]
辽河流域	82.5 ~ 25 374.4	2014-06	24	[8]
海河干流	171.4 ~ 9 511.2	2011-06	17	[9]
胶州湾北部墨水河	196.51 ~ 8 549.33	2015-01	17	[19]
北京市永定河等五条主要河流	232.5 ~ 5 429.7	2016-10	5	[20]
上海市公园湖泊	55.7 ~ 4 928	2012-07	33	[21]
安徽省杭埠-丰乐河	71.3 ± 15 ~ 3 372 ± 402	2014-12	12	[22]
舟山近海	1 017.9 ~ 3 047.1	2012	8	[23]
湖北省大冶湖	35.94 ~ 2 032.73	2015-08	8	[24]
河北省白洋淀	163.20 ~ 861.43	2016-03	15	[25]

不同种类 PAHs 的毒性差异较大，含量不能直接客观表达毒性水平. 为评估表层沉积物采样点中 PAHs 的毒性，以 BaP 为基准，将不同种类 PAHs 按毒性重新计量获得毒性当量(TEQ). 按式(1)归一化计算各采样点 PAHs 的毒性当量含量：

$$C_{\mathrm{TEQ}i} = C_i \cdot \mathrm{TEF}_i \quad (1)$$

$$C_{\mathrm{TEQ}} = \sum C_{\mathrm{TEQ}i} \quad (2)$$

式中，$C_{\mathrm{TEQ}i}$是采样点中第 i 种 PAHs 物质的毒性当量含量，C_i 是第 i 种 PAHs 物质的含量，TEF_i 是第 i 种 PAHs 物质的毒性当量因子，C_{TEQ}是 TPAHs 的毒性当量含量. 本研究中，滇池表层沉积物中 TPAHs 毒性当量含量介于 14.12 ~ 215.36 ng·g^{-1}之间，平均为 77.88 ng·g^{-1}[图 2(e)]. 草海表层沉积物的 TPAHs 毒性当量含量平均值(130.29 ng·g^{-1})是外海(63.90 ng·g^{-1})的 2.04 倍. PAHs 毒性当量含量与含量变化趋势大体相同，沿岸低、中心高的分布情况更为明显[图 2(e) ~ 2(h)]. 对毒性当量含量贡献最大的物质为 DBA(各采样点平均 42.97 ng·g^{-1})，占各采样点 TPAHs 平均毒性当量含量的 55.17%.

本研究关注的 16 种 PAHs，根据来源及结构差异可分为 2 ~ 3 环 PAHs(NAP、ACY、ACE、FLU、PHE、ANT)、4 环 PAHs(FLT、PYR、BaA、CHR)和 5 ~ 6 环 PAHs(BbF、BkF、BaP、DBA、BPY、IDP)这 3 类. 滇池表层沉积物中不同环数 PAHs 的含量分布特征与 TPAHs 近似，PAHs 来源无显著差异[图 2(b) ~ 2(d)]. 各滇池表层沉积物采样点中，2 ~ 3 环 PAHs 含量在 16.08 ~ 369.43 ng·g^{-1}范围内，平均含量为 101.68 ng·g^{-1}；4 环 PAHs 含量范围为 42.18 ~ 720.40 ng·g^{-1}，平均含量为 201.80 ng·g^{-1}；5 ~ 6 环 PAHs 含量分布在 34.05 ~ 555.43 ng·g^{-1}范围内，平均含量为 192.82 ng·g^{-1}. PAHs 组成以 4 环及 5 ~ 6 环为主[图 3(a)]，含量分别占总含量的 40.38% 和 40.22%，主要由于高环 PAHs 的辛醇-水分配系数大，疏水性更强，更易于向沉积物相分配[26]，较 2012 年滇池表层沉积物 PAHs 组成情况大体一致(表 2)[13, 26]. 5 ~ 6 环 PAHs 在总毒性当量含量中占比最高，达到了 95% 以上[图 3(b)]，环境风险主要由 5 ~ 6 环 PAHs 贡献，高环 PAHs 与化石燃料高温燃烧、裂解密切相关[27, 28]，为进一步降低其环境风险，可以此为切入点着手控制.

滇池有 14 条主要入湖河流，大多分布于滇池东岸，只有一个天然出水口，位于滇池西南侧海口镇附近，牛栏江-滇池补水工程经盘龙江、大清河、宝象河、马料河和洛龙河等 5 条河流进入滇池[17]. 湖心地区较沿岸污染物混合更加均匀，水流也更为平缓，利于污染物的沉积. 为清晰直观地反映滇池表

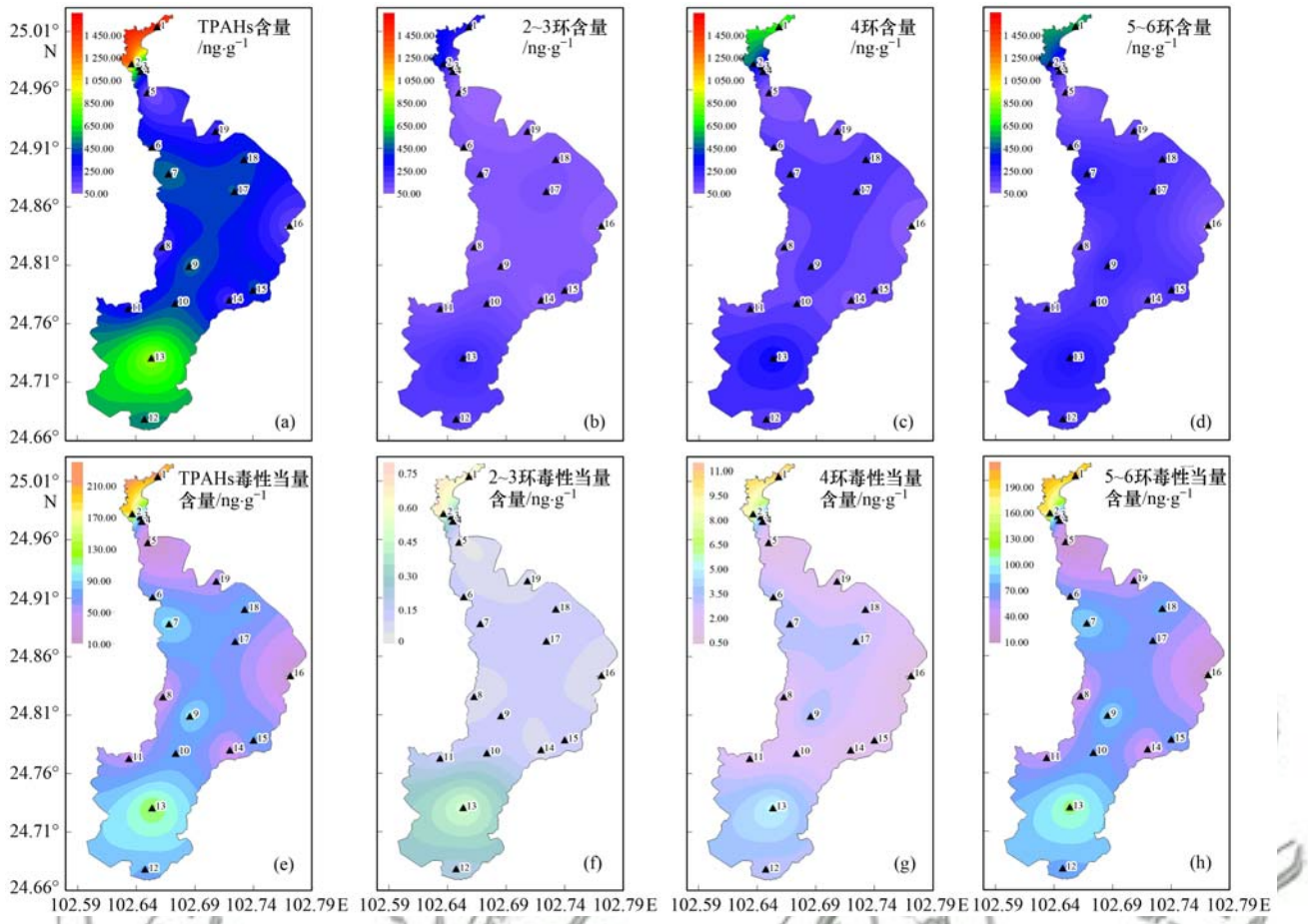
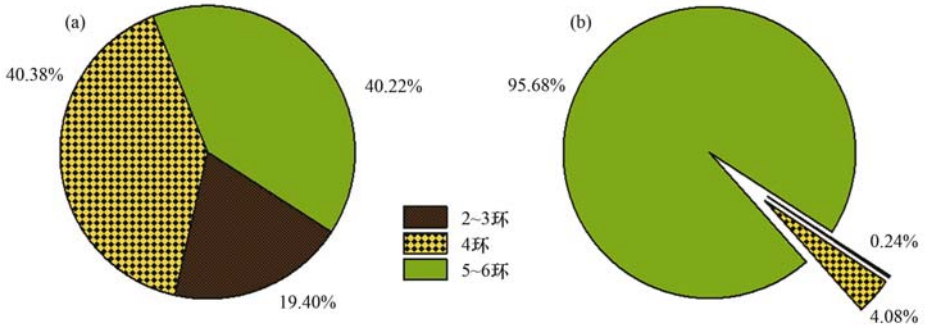


图 2　滇池表层沉积物中 PAHs 含量及毒性当量含量空间分布

Fig. 2　Distribution of PAHs concentrations and TEQ concentrations in the surface sediments of Dianchi Lake



(a)不同环数 PAHs 含量组成；(b)不同环数 PAHs 毒性当量含量组成

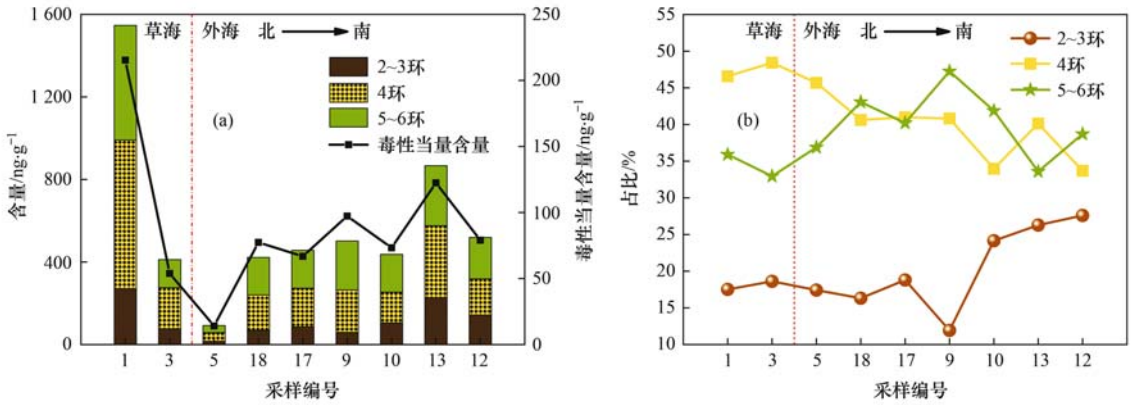
图 3　滇池表层沉积物中不同环数的 PAHs 组成

Fig. 3　Composition of PAHs with different rings in the surface sediments of Dianchi Lake

层沉积物中 PAHs 南北走向的分布规律以为后续工程实施提供初步依据，同时尽量减少滇池四周复杂的水力条件及频繁的人为活动对沿岸污染物分布情况的干扰，本研究选取了位于湖心且贯穿滇池的 9 个采样点绘制剖面图(图 4)．TPAHs 含量及毒性当量含量最高值出现在草海(1 号采样点)分别为 1 546.78 ng·g^{-1}和 215.36 ng·g^{-1}，海埂大坝附近(5 号采样点)出现 TPAHs 含量(92.31 ng·g^{-1})及毒性当量含量(14.12 ng·g^{-1})最低点，且在外海呈现总体平稳的趋势．18、17、9、10、13、12 号采样点剖面上 TPAHs 含量平均值为 534.10 ng·g^{-1}，由 422.43 ng·g^{-1}略增至 519.33 ng·g^{-1}，毒性当量含量由 77.34 ng·g^{-1}略增至 78.99 ng·g^{-1}．剖面采样点 2～3 环 PAHs 占比由南向北缓慢递增(17.52%～27.60%)，草海(1 号和 3 号采样点)4 环 PAHs 占比最高，自北向南逐渐降低(46.57%～33.69%)，5～6 环 PAHs 占比于 18、17、9、10 号采样点剖面上发生了较大波动外，其余点位占比平稳．

2.2　表层沉积物中 PAHs 的来源解析

分子比值法在解析湖泊表层沉积物 PAHs 的来



(a)TPAHs 含量及毒性当量含量变化；(b)不同环数 PAHs 占比变化

图 4 南北剖面上 PAHs 分布规律

Fig. 4 Distribution of PAHs across a north-south profile

源中应用十分广泛[12, 14~16]. 本研究采用 BaA/(BaA + CHR)和 IDP/(IDP + BPY)这 2 种特征分子比值，讨论滇池表层沉积物 PAHs 的主要来源.

通常，BaA/(BaA + CHR)小于 0.20、IDP/(IDP + BPY)小于 0.20 时，PAHs 主要源自造岩源；BaA/(BaA + CHR)在 0.20 ~ 0.35 范围内、IDP/(IDP + BPY)在 0.20 ~ 0.50 范围内时，PAHs 主要来源于液体化石燃料的燃烧；BaA/(BaA + CHR)大于 0.35、IDP/(IDP + BPY)大于 0.50 时，PAHs 的来源以生物质或煤的燃烧为主[29, 30]. 滇池表层沉积物采样点中 BaA/(BaA + CHR)的比值范围为 0.34 ~ 0.61(均值 0.55)，IDP/(IDP + BPY)的比值范围为 0.51 ~ 0.61(均值 0.55)，见图 5，PAHs 的主要来源是生物质或煤的燃烧过程. 同时，有个别采样点(10 号和 11 号采样点)的 BaA/(BaA + CHR)比值显示出液体化石燃料燃烧的影响，滇池中船只的燃油燃烧可能是造成比值异常的主要原因. 10 号采样点位于外海南部湖心，距离岸边较远，生物质、燃煤影响较小；11 号采样点位于海口镇附近，临近滇池唯一的出水河道，往来船只密集，燃油燃烧影响集中. 滇池表层沉积物 PAHs 的来源自 2012 年起无明显改变[13]，生物质或煤的燃烧依旧处于污染源中的主要地位.

2.3 表层沉积物 PAHs 生态风险评估

应用 Long 等[31]提出的潜在生态风险标志对比法评估滇池表层沉积物中 PAHs 的生态风险. 表层沉积物中 PAHs 含量若低于生物影响范围低值(ER-L)，则生态风险较低，对生物的毒副作用不明显，极少产生负面生态效应；若高于生物影响范围中值(ER-M)会导致严重的生态风险，对生物会产生明显的毒副作用，负面生态效应常见；若介于二者之间，则偶尔发生负面生态效应，具有潜在的生态风险. 关于 BbF、BkF、IDP 和 BPY 这 4 种 PAHs 的生态风险尚无明确结论，本研究暂不考虑.

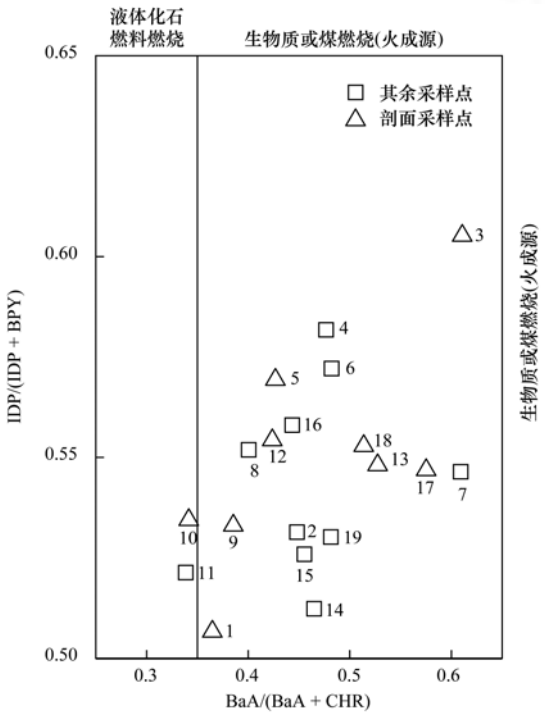


图 5 滇池表层沉积物 PAHs 的特征分子比值分布

Fig. 5 PAHs cross plots for the ratios of IDP/(IDP + BPY) and BaA/(BaA + CHR) in the surface sediments of Dianchi Lake

生态风险评价结果表明(表 4)，12 种 PAHs 中除 FLU、DBA 外，最大含量均低于 ER-L，而部分采样点中的 FLU 和 DBA 含量超过 ER-L，说明滇池表层沉积物中 FLU、DBA 对生物具有潜在的毒性作用，但不会导致急性毒性效应，整体生态风险较低. FLU 含量的平均值已经超过 ER-L，其中超标点位有 6 个(草海 1、2、3 和 4 号采样点，外海 12 号和 13 号采样点)，草海全部点位均出现 FLU 超标问题，最大值出现在 2 号采样点(91.4 $ng \cdot g^{-1}$). DBA 均值未超过 ER-L，但依旧存在 2 个点位超标(1 号

和 2 号采样点)，均分布在草海. 草海表层沉积物中 PAHs 的生态风险较外海高，主要是曾长期受纳昆明生产生活污水的历史原因所致.

2012 年，滇池表层沉积物的部分采样点中有多种 PAHs 含量介于 ER-L 与 ER-M 之间，其中 FLU、CHR 含量超标点位最多；PYR 及 CHR 含量最高值已超过 ER-M，属于严重生态风险情况[13]. 滇池整体生态风险较 2012 年显著降低，目前处于相对安全的范围内，但是草海问题存在已久，需继续关注，建议有针对性地加强草海的疏浚工作.

表 4　滇池表层沉积物中 PAHs 的含量与 ER-L、ER-M 比较[1)]/ng·g^{-1}

Table 4　Concentrations of PAHs in the surface sediments of Dianchi Lake compared with ER-L and ER-M/ng·g^{-1}

物质	ER-L	ER-M	本研究	
			平均值	最大值
NAP	160.0	2 100.0	19.7	73.9
ACY	44.0	640.0	6.4	12.6
ACE	16.0	500.0	4.9	12.1
FLU	19.0	540.0	26.8	91.4
PHE	240.0	1 500.0	47.5	152.9
ANT	85.3	1 100.0	10.8	42.4
FLT	600.0	5 100.0	80.6	264.2
PYR	665.0	2 600.0	59.1	214.5
BaA	261.0	1 600.0	27.6	88.1
CHR	384.0	2 800.0	34.4	153.5
BaP	430.0	1 600.0	19.3	64.1
DBA	63.4	2 600.0	43.0	127.9
BbF	—	—	32.8	103.9
BkF	—	—	10.3	39.1
IDP	—	—	47.7	100.7
BPY	—	—	40.7	124.6

1)“—”表示尚无明确定论

3　结论

(1)滇池表层沉积物中 TPAHs 含量范围介于 92.31 ~ 1 546.78 ng·g^{-1} 之间，平均值为 496.30 ng·g^{-1}，在我国重点水域中处于较低水平. 草海表层沉积物的 TPAHs 含量高于外海，海埂大坝附近出现最低值，主要污染物为 FLT(80.65 ng·g^{-1}). 与 2012 年相比，滇池表层沉积物的 TPAHs 含量显著下降.

(2)滇池表层沉积物中 TPAHs 毒性当量含量为 14.12 ~215.36 ng·g^{-1}，平均值为 77.88 ng·g^{-1}，对毒性当量含量影响最大的物质为 DBA(42.97 ng·g^{-1}). PAHs 组成以中高环 PAHs 为主，5 ~6 环 PAHs 在总毒性当量含量中占比最高，较 2012 年滇池表层沉积物 PAHs 组成情况大体一致.

(3)滇池表层沉积物中 PAHs 的主要来源是生物质或煤的燃烧过程. 通过潜在生态风险标志对比法评估生态风险，滇池表层沉积物中 PAHs 的生态风险整体较低，但草海仍存在生态风险问题，值得继续关注与治理.

参考文献：

[1] 代艳芳，吴琨，胡清顺. 调水工程管理适应水资源区域配置实践与探索——以牛栏江—滇池补水工程为例[J]. 中国水利，2018，(14)：41-44.
Dai Y F，Wu K，Hu Q S. Practices of water diversion scheme management adapts to regional allocation：taking the Niulanjiang River-the Dian Lake water diversion scheme as an example[J]. China Water Resources，2018，(14)：41-44.

[2] Readman J W，Fillmann G，Tolosa I，*et al*. Petroleum and PAH contamination of the Black Sea[J]. Marine Pollution Bulletin，2002，**44**(1)：48-62.

[3] Kang M J，Yang F，Ren H，*et al*. Influence of continental organic aerosols to the marine atmosphere over the East China Sea：insights from lipids，PAHs and phthalates[J]. Science of the Total Environment，2017，**607-608**：339-350.

[4] Zhang Y X，Tao S，Shen H Z，*et al*. Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2009，**106**(50)：21063-21067.

[5] Wang Z C，Liu M，Yang Y. Characterization and sources analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments in the Yangtze River Estuary[J]. Environmental Earth Sciences，2015，**73**(5)：2453-2462.

[6] Wang M，Wang C Y，Li Y W. Petroleum hydrocarbons in a water-sediment system from Yellow River estuary and adjacent coastal area，China：distribution pattern，risk assessment and sources[J]. Marine Pollution Bulletin，2017，**122**(1-2)：139-148.

[7] Zhao Z H，Zhang L，Wu J L. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from lakes along the middle-lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe River of China [J]. Limnology and Oceanography，2016，**61**(1)：47-60.

[8] He Y，Meng W，Xu J，*et al*. Spatial distribution and potential toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Liaohe River Basin，China[J]. Environmental Monitoring and Assessment，2016，**188**(3)：193.

[9] Qian X，Liang B C，Liu X，*et al*. Distribution，sources，and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the Haihe River，a typical polluted urban river in Northern China[J]. Environmental Science and Pollution Research，2017，**24**(20)：17153-17165.

[10] Zhao Z H，Jiang Y，Li Q Y，*et al*. Spatial correlation analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in sediments between Taihu Lake and its tributary rivers[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2017，**142**：117-128.

[11] Liu C，Zhang L，Fan C X，*et al*. Temporal occurrence and sources of persistent organic pollutants in suspended particulate matter from the most heavily polluted river mouth of Lake Chaohu，China[J]. Chemosphere，2017，**174**：39-45.

[12] Weng J，Li S，Wang T C，*et al*. Distribution of petroleum hydrocarbons in sediments from Dianchi Lake，China [J]. Environmental Earth Sciences，2016，**75**(6)：456.

[13] Zhao S M，Wang B，Wang D W，*et al*. Environmental behavior of PAHs in Dianchi Lake distributions，sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface

sediments from Dianchi Lake, China[J]. International Journal of Environmental Research, 2014, **8**(2): 317-328.

[14] Guo J Y, Wu F C, Liao H Q, *et al*. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons and DDTs in Dianchi Lake, an urban lake in Southwest China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(8): 5471-5480.

[15] Ma X H, Han X X, Jiang Q L, *et al*. Historical records and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons over the past 100 years in Dianchi Lake, a plateau lake in Southwest China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, **75**(2): 187-198.

[16] Sun P P, Xie B, Song Y M, *et al*. Historical trends of polycyclic aromatic hydrocarbons in the reservoir sediment of the Dianchi Watershed, Southwest China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, **99**(1): 117-124.

[17] Dai C, Tan Q, Lu W T, *et al*. Identification of optimal water transfer schemes for restoration of a eutrophic lake: an integrated simulation-optimization method[J]. Ecological Engineering, 2016, **95**: 409-421.

[18] 董磊, 汤显强, 林莉, 等. 长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2588-2599.
Dong L, Tang X Q, Lin L, *et al*. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters during high water level periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2588-2599.

[19] 刘少鹏, 李先国, 张大海, 等. 墨水河表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的分布特征、来源解析及生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, **37**(4): 843-850.
Liu S P, Li X G, Zhang D H, *et al*. Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Moshui River[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(4): 843-850.

[20] Li Q, Xu X, Fang Y Y, *et al*. The temporal changes of the concentration level of typical toxic organics in the river sediments around Beijing[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, **12**(6): 8.

[21] Yang J, Yang Y, Chen R S, *et al*. Modeling and evaluating spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban lake surface sediments in Shanghai[J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 1-10.

[22] 吴义国, 方冰芯, 李玉成, 等. 杭埠-丰乐河表层沉积物中多环芳烃的污染特征、来源分析及生态风险评价[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 420-429.
Wu Y G, Fang B X, Li Y C, *et al*. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Hangbu-Fengle River: pollution characteristics, potential source and risk assessment[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 420-429.

[23] 江敏, Tuan L H, 梅卫平, 等. 舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2672-2679.
Jiang M, Tuan L H, Mei W P, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment from Zhoushan Coastal Area, China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2672-2679.

[24] 张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 170-179.
Zhang J Q, Hu T P, Xing X L, *et al*. Distribution, sources and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 170-179.

[25] 高秋生, 焦立新, 杨柳, 等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1616-1627.
Gao Q S, Jiao L X, Yang L, *et al*. Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1616-1627.

[26] 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 等. 滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4194-4211.
Wang Y Z, Zhang S L, Kong F Q, *et al*. Seasonal distribution, composition, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in the main stream of the Luanhe River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4194-4211.

[27] Zeng E Y, Vista C L. Organic pollutants in the coastal environment off San Diego, California. 1. Source identification and assessment by compositional indices of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1997, **16**(2): 179-188.

[28] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, *et al*. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2002, **117**(3): 457-474.

[29] Yunker M B, Macdonald R W, Goyette D, *et al*. Natural and anthropogenic inputs of hydrocarbons to the Strait of Georgia[J]. Science of the Total Environment, 1999, **225**(3): 181-209.

[30] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al*. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.

[31] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 8

Aug. 15, 2019

CONTENTS

Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 ····· ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, *et al.* (3397)

Concentration Characteristics of $PM_{2.5}$ and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter ····· XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, *et al.* (3405)

Elemental Composition Characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, and Heavy Pollution Analysis in Hefei ····· LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China ····· CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, *et al.* (3421)

Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in $PM_{2.5}$ in the Guanzhong Area ····· KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, *et al.* (3431)

Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun ····· WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, *et al.* (3438)

Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on $PM_{2.5}$ Pollution in China ····· WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)

Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of $PM_{2.5}$ from Coal-Fired Power Plants ····· DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, *et al.* (3457)

Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province ····· XU Jia-qi, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, *et al.* (3463)

Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site ····· MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, *et al.* (3470)

Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao ····· GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)

Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou ····· SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, *et al.* (3489)

Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project ····· HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, *et al.* (3501)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta ····· QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, *et al.* (3509)

Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China ····· YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, *et al.* (3519)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir ····· WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, *et al.* (3530)

Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging ····· LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, *et al.* (3539)

Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang ····· WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, *et al.* (3550)

Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands ····· LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, *et al.* (3559)

Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing ····· WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, *et al.* (3568)

Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors ····· LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, *et al.* (3577)

Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin ····· WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, *et al.* (3588)

Community Composition of *nirS*-type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen ····· WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)

Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water ····· HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, *et al.* (3604)

Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling ····· PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, *et al.* (3612)

Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, *et al.* (3618)

Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process ····· FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, *et al.* (3626)

Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials ····· JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, *et al.* (3633)

Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains ····· CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, *et al.* (3642)

Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials ····· LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, *et al.* (3650)

Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid ····· HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, *et al.* (3660)

Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR ····· YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, *et al.* (3668)

Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System ····· XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, *et al.* (3675)

Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX ····· MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, *et al.* (3683)

Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems ····· DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, *et al.* (3691)

Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China ····· ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)

Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations ····· LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, *et al.* (3706)

Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Acinetobacter junii* NP1 ····· YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, *et al.* (3713)

Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification ····· GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, *et al.* (3722)

Nitrification, Denitrification, and N_2O Production Under Saline and Alkaline Conditions ····· DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, *et al.* (3730)

Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil ····· WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)

Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields ····· ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, *et al.* (3746)

Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde ····· SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, *et al.* (3753)

Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City ····· ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, *et al.* (3764)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Arban Soils ····· ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, *et al.* (3774)

Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(Ⅴ) and P ····· LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)

Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions ····· ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, *et al.* (3792)

Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils ····· LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, *et al.* (3799)

Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils ····· WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)

Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates ····· LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, *et al.* (3816)

Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia ····· GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, *et al.* (3825)

Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents ····· HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, *et al.* (3833)

Toxicity of $PM_{2.5}$ Based on a Battery of Bioassays ····· JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, *et al.* (3840)