

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

京津冀地区典型湖库沉积物 PAHs 污染特征及来源解析

吴鹏^{1,2,3,4}, 鲁逸人¹, 李慧^{2,3,4}, 郑天娇^{2,3,4}, 程云轩^{2,3,4}, 焦立新^{2,3,4*}

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300002; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012; 4. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 采集京津冀地区典型3湖库(于桥水库、衡水湖和大伙房水库)表层沉积物样品共29个,利用GC-MS检测了16种多环芳烃含量. 结果表明,沉积物中 $\sum$ PAHs ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)分别是337.3~1604.1(均值820.0)、461.1~1497.5(均值932.3)和102.3~2240.5(均值564.9). 与国内其他河流湖库相比,3个典型湖库PAHs污染均处于中等水平. 3个湖库在环数占比上有着一致性,均以高环数的高占比为主. 通过特征比值与主成分分析法进行PAHs源解析,结果表明,3湖库污染主要以燃烧源(包括石油类燃烧、煤及生物质燃烧)为主,少部分为石油源. 其中汽油和柴油不完全燃烧污染贡献占比51.4%,煤和薪柴燃烧污染来源贡献为22.3%. 风险评价结果显示,于桥水库、衡水湖和大伙房水库表层沉积物中PAHs总体处于中等偏低水平,但对Flu、InP和DahA这3类物质的监控应当加强,做好对应应急措施.

关键词: 多环芳烃(PAHs); 沉积物; 污染特征; 源解析; 生态风险

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1791-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202008046

PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area

WU Peng^{1,2,3,4}, LU Yi-ren¹, LI Hui^{2,3,4}, ZHENG Tian-jiao^{2,3,4}, CHENG Yun-xuan^{2,3,4}, JIAO Li-xin^{2,3,4*}

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300002, China; 2. National Engineering Laboratory of Lake Water Pollution Control and Ecological Restoration Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Protection for Drinking Water Sources, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. National Key Laboratory of Environmental Protection Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In this research, 29 surface sediments samples of three typical lake reservoirs (in Yuqiao Reservoir, Hengshui Lake, and Dahuofang Reservoir) in the Jin-Ji-Liao area were collected and investigated, and the contents of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons were detected using GC-MS. The results show that the Sigma PAHs ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) in the sediments were 337.3-1604.1 (mean value 820.0), 461.1-1497.5 (mean value 932.3), and 102.3-2240.5 (mean value 564.9), respectively. Compared with other domestic rivers and lakes, the pollution levels of the PAHs in the three typical lakes were all at a medium level. The three lakes and reservoirs had consistency in the ratio of the number of rings, which is primarily high. PAHs source analyses were carried out by the characteristic ratio and primary component analysis method, and the results show that three lakes reservoirs pollution were caused mostly by combustion sources (including petroleum, coal, and biomass combustion), with a few petroleum sources. Additionally, the pollution contribution ratio of incomplete combustion of gasoline and diesel oil was 51.4%, and the pollution contribution ratio of combustion of coal and firewood were 22.3%. The risk evaluation results indicate that PAHs in the surface sediments of Yuqiao Reservoir, Hengshui Lake, and Dahuofang Reservoir are generally at a medium and low level, but the monitoring of three types of substances, Flu, InP, and DahA, should be strengthened, and corresponding emergency measures should be taken.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); sediment; pollution characteristics; source apportionment; ecological risk

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 是一类天然、人工合成的有毒有机污染物,因为高毒性、半挥发性、生物累积性和持久残留性等特性,能通过环境介质如大气、水和生物等进行远距离迁移,对人类健康具有严重的危害. 含有两个或两个以上稠环的多环芳烃作为这一类典型的 POPs,其中已有16种PAHs被美国环保署(EPA)列为优先控制污染物^[1]. 一般来源于煤、石油和天然气或烟草及碳化肉类等有机质所不完全燃烧的产物^[2]. 通常情况下,除了燃烧源外,多环芳烃另一常

见人为来源是化石燃料泄漏,这包括原油及成品油(如汽油、柴油),以及工厂废水排放和炼焦等^[1,3,4]. 在自然环境中,多环芳烃广泛分布于大气、土壤、水体、生物体等环境介质中. 多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 由于其具有低溶解性和疏水性^[5],因此在水体中容易吸附到微粒上并自

收稿日期: 2020-08-06; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2015FY110900-005)

作者简介: 吴鹏(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: wu_peng@tju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jiaolx@craes.org.cn

然沉降而后富集^[6,7]. 沉积物是环境中 PAHs 潜在的污染源,富集的 PAHs 能够缓慢释放到水体环境中,从而引起“二次污染”^[8,9]. 富集后的 PAHs 可通过食物链传递出去,由于其具有的“三致”作用而最终对人类及其他生物体生存与发展构成威胁. 因而对水环境中的沉积物 PAHs 研究目前已成为热点,这将会帮助人们更全面地了解 PAHs 在湖泊环境中的污染状况及潜在的负面生态效应,并能了解到人类经济发展对 PAHs 污染机制的生态影响,从而可以采取相应措施消除 PAHs 对湖泊环境的影响,这对水环境预防与保护有着重要意义.

衡水湖、于桥水库和大伙房水库是津冀辽地区重要的水源地. 本文选取这 3 个湖库作为津冀辽地区代表性调查研究对象. 衡水湖坐落于河北省衡水市境内,作为华北平原唯一的国家级湿地和鸟类自然保护区,也是华北唯一保存下来的内陆淡水湿地生态系统,衡水湖对维持物种多样性和生态平衡具有重要作用,对调节周边及京津地区气候环境有着重要意义. 于桥水库位于天津市蓟州区城东,是国家重点大型水库之一,已被水利部列为全国重要饮用水水源地. 水库周边及与水环境密切相关的村庄有 111 个,人口约为 9 万人. 作为天津市饮用水水源地,其水环境质量安全关系着天津市饮用水安全. 大伙房水库位于辽宁省东北部,是辽宁省的重要饮用

水水源地,其水质健康状况关系到沈阳、抚顺、鞍山和大连等 7 座城市的居民的饮用水安全,地位极其重要^[10].

近年来国内外对各地主要水域(如河流、湖泊和海湾)等沉积物中有机污染物的分布特点及污染来源的研究不断增多^[11~14]. 然而,针对衡水湖、于桥水库和大伙房水库沉积物多环芳烃的分析研究鲜见报道,因此开展多环芳烃污染物的系统调查与生态风险评估,解析其来源对水环境治理及环境保护具有重要指导作用. 本文以衡水湖、于桥水库和大伙房水库表层沉积物中 PAHs 为研究对象,通过采集的沉积物样品对 PAHs 进行检测,探讨 3 个湖库中典型 POPs 的污染特征及来源解析.

1 材料与方法

1.1 样品采集

分别在 2016 年 10 月、2016 年 11 月和 2017 年 7 月在津冀辽地区(衡水湖、于桥水库及大伙房水库)进行了表层沉积物样品的采集,以基本覆盖水面的原则选取流域有代表性的区域进行采样,采样点坐标由 GPS 系统定位,采样点分布见图 1,选用抓斗式采样器采集表层沉积物,深度范围约为 0~10 cm. 在采样现场将采集到的沉积物样品封存于密封的金属盒子中,随后运回实验室放入冰柜低温冷冻,

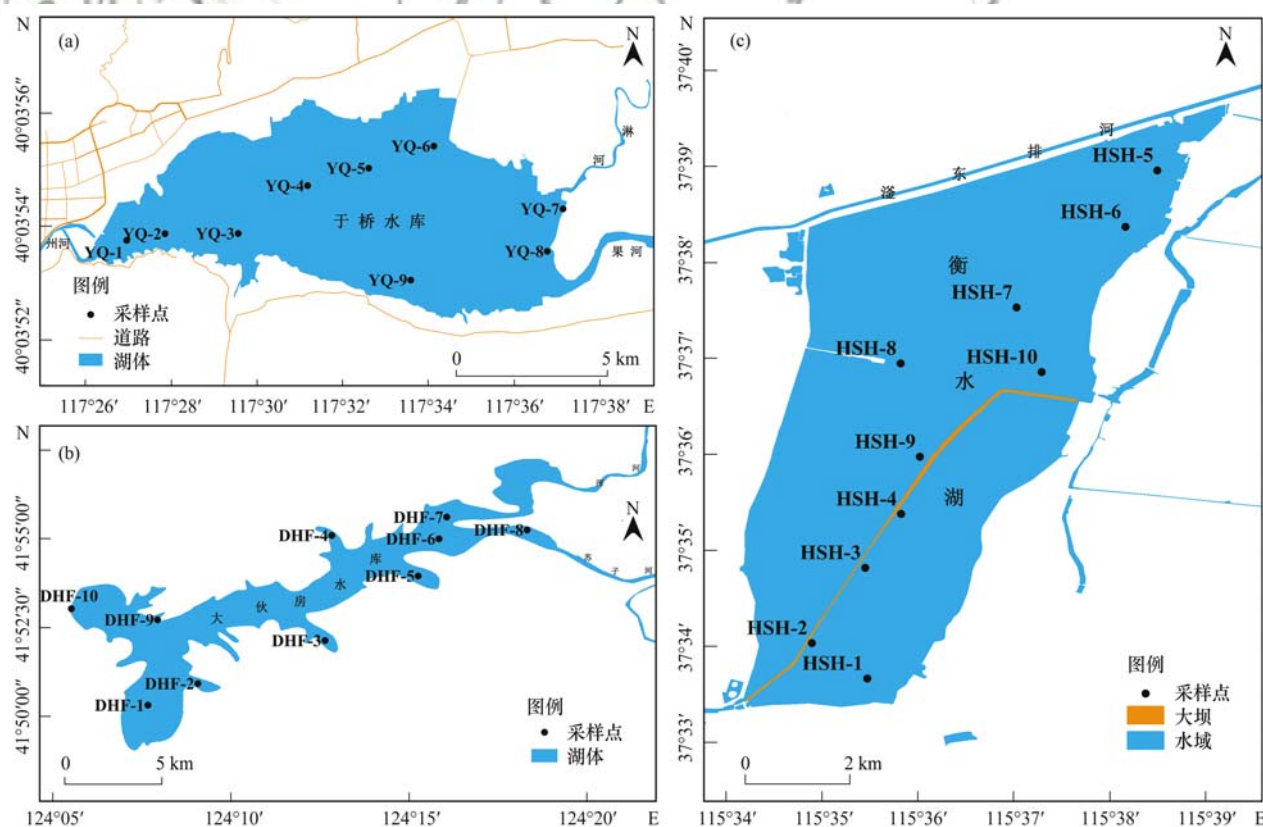


图 1 于桥水库、大伙房水库和衡水湖采样点位置示意

Fig. 1 Sketch of locations of the sampling sites in Yuqiao Reservoir, Dahuofang Reservoir, and Hengshui Lake

以待进行后续的检验处理工作。

1.2 样品处理及分析

将采集到的各沉积物样品进行冷冻干燥 48 h, 彻底去除残留水分后用玛瑙研钵研磨过 100 目筛子, 放置于暗处密封避光保存, 以待分析使用. PAHs 采用活化硅胶柱和凝胶色谱柱联合进样, 所用试剂、仪器及分析方法均与李慧等^[15]的研究报道一致.

沉积物中的 PAHs 主要检测美国环保署所列的 16 种 PAHs 优先控制污染物, 详细情况如表 1 所示.

表 1 于桥水库、大伙房水库和衡水湖表层沉积物中 PAHs 检测同系物

Table 1 Detection homolog of PAHs in surface sediments of Yuqiao Reservoir, Dahuofang Reservoir, and Hengshui Lake	
检测化合物	所测同系物
PAHs	萘(Nap)、蒽(An)、二氢蒽(Ace)、芘(Flu)、菲(Phe)、葱(Ant)、荧蒽(Fla)、苊(Pyr)、苯并[a]葱(BaA)、䓛(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]苊(BaP)、茚并[1,2,3-cd]苊(InP)、苯并[g,h,i]苊(BghiP)和二苯并[a,h]葱(DahA)

1.3 质量与保证(QA/QC)

在采样过程中, 为避免前后点位沉积物样品交叉污染, 每采集一次样品后均对设备进行清洗. 在样品前处理过程中, 所用容器(萃取池和鸡心瓶等)分别经过超纯水、甲醇、丙酮和二氯甲烷的 3 次洗涤烘

干后使用. 分析过程中, 以 5 个样品为一组, 每组在测定完成后做一次平行样与方法空白, 以尽可能避免不必要的误差. 沉积物样品的 PAHs 加标回收率为 69.3% ~ 95.6%, 方法检出限为 0.12 ~ 0.4 ng·g⁻¹.

1.4 数据分析

采用 ArcGIS 10.2 绘制沉积物采样点分布及 PAHs 总量空间分布, 利用 IBM SPSS Statistics 26 进行主成分分析, 并用 Origin 2017 进行数据统计.

2 结果与讨论

2.1 津冀辽地区典型湖库沉积物 ∑PAHs 浓度分布

于桥水库、衡水湖和伙房水库表层沉积物中 PAHs 的浓度空间分布如图 2 所示, 与国内不同湖库河流 PAHs 浓度对比见表 2. 其中于桥水库表层沉积物中 ∑PAHs 含量范围在 337.3 ~ 1 604.1 ng·g⁻¹ 之间, 平均值为 820.6 ng·g⁻¹. 在京津冀地区的河流湖库中相比较属于中度污染水平, 与其他地区河流湖库对比仍属于中度污染水平. 库区 YQ-3 和 YQ-2 点位的 ∑PAHs 含量较高, YQ-7 和 YQ-8 点位的 ∑PAHs 较低. 其中 YQ-3 点位所测 PAHs 含量为 1 604.08 ng·g⁻¹; YQ-8 号点位 PAHs 总量为 337.27

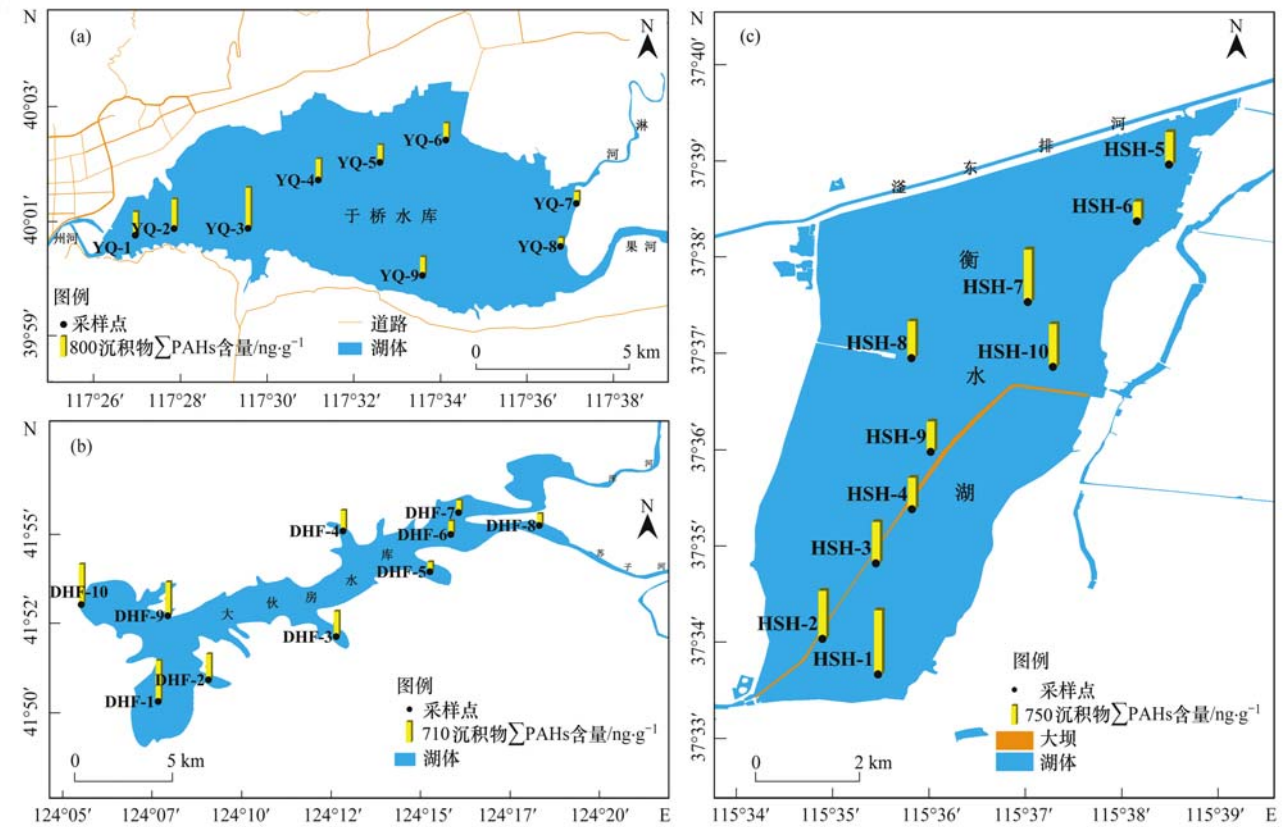


图 2 于桥水库、大伙房水库和衡水湖 PAHs 污染物空间总量分布
Fig. 2 Spatial distribution of the total PAHs pollutants in Yuqiao Reservoir, Dahuofang Reservoir, and Hengshui Lake

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,这分别为9处采样点的最高值与最低值.根据葛宁等^[16]的研究,水库水流整体呈东北向西南走向.分析认为,于桥水库沉积物 PAHs 浓度水平分布取决于其周边污染源分布、水域流态走向.临近水库南岸的 YQ-3 点, $\sum$ PAHs 含量最高,其 PAHs 浓度可能受临近岸边仅为1 000 m的东十百户村和清池一村及附近旅游产业区排污影响较大.对于水库最

东边的 YQ-8 点位, $\sum$ PAHs 最低,经过排查,该点周边无村庄,且没有其它工业外源,该处主要可能来源于水体中吸附的 PAHs 颗粒物自然沉降.其余采样点按总量排序为 YQ-2 > YQ-1 > YQ-4 > YQ-9 > YQ-5 > YQ-6 > YQ-7.于桥水库沉积物 PAH 含量整体上由东北向西南呈现持续升高趋势,这可能跟于桥水库水域流向有关.

表 2 国内河流和湖泊沉积物中 PAHs 污染水平比较/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Comparing PAHs pollution level in domestic river and lake sediments/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

地区	年份	湖库	PAH 种类	$\sum$ PAHs 含量	均值	文献
京津冀地区	2016	于桥水库(天津)	16	337.3 ~ 1 604.1	820.6	本研究
	2016	衡水湖	16	461.1 ~ 1 497.5	93.3	本研究
	2009	营水库(天津)	16	1 139.4	1 139.4	[20]
	2009	永定新河(天津)	16	274.06	274.1	[20]
	2010	大沽排水河	16	370 ~ 5 607	2 041	[21]
	2006	密云水库(北京)	16	608.5 ~ 1 087.9	841.5	[22]
	2007	玉渊潭(北京)	16	475.3 ~ 954.7	682.3	[23]
	2002	通惠河(北京)	16	127.1 ~ 927.7	540.4	[24]
	2016	白洋淀(雄安)	16	163.2 ~ 861.4	—	[25]
	2007	西大洋水库(河北)	15	422.4 ~ 1 052.9	—	[26]
	2007	王快水库(河北)	16	332.0 ~ 1 039.8	696.5	[27]
	2008	滦河(河北)	16	0 ~ 478	84	[28]
	2018	衡水湖(河北)	16	394.9 ~ 1 785.4	875.5	[17]
东北地区	2017	大伙房水库(辽宁)	16	102.3 ~ 2 240.5	564.9	本研究
	2017	松花湖(吉林)	16	23.1 ~ 554.8	172.9	[29]
	2017	查干湖(吉林)	16	305.9 ~ 1 214.4	586.5	[30]
	2017	呼伦湖(内蒙古)	16	282.9 ~ 1 056.9	507.7	[30]
	2014	药泉湖(黑龙江)	16	239.9 ~ 710.7	507.6	[31]
	2007	辽河(辽宁)	16	184.0 ~ 2 260.0	514	[32]
长江流域地区	2018	洞庭湖(湖南)	16	572.7 ~ 936.8	738.3	[33]
	2018	南湖(浙江)	16	1 066.4 ~ 1 638.6	1 352.5	[33]
	2018	洪湖(湖北)	16	587.2 ~ 1 302.4	1 020.5	[33]
	2018	鄱阳湖(江西)	16	806.1 ~ 924.1	865.1	[33]
	2011	太湖(安徽)	16	262.0 ~ 1 087.0	492	[34]
	2010	巢湖(安徽)	14	327.9 ~ 445.1	394.7	[3]
	2015	大冶湖(湖北)	16	35.9 ~ 2 032.7	940.6	[35]
东南沿海地区	2012	骆马湖(江苏)	16	189.1 ~ 725.9	443.0	[36]
	2015	齐溪水库(浙江)	16	26.1 ~ 2 013.2	—	[37]
	2015	淀山湖(上海)	16	54.6 ~ 1 331.2	373.4	[38]
	2012	千岛湖(浙江)	15	258.0 ~ 906.0	558.0	[39]
	2012	滴水湖(上海)	16	74.0 ~ 579.2	272.5	[40]

衡水湖表层沉积物中 PAHs 含量范围介于 $461.12 \sim 1 497.53 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $932.26 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 张嘉雯等^[17]测得衡水湖 2018 年 8 月和 2019 年 3 月 $\sum$ PAHs 均值分别为 875.5 和 1 010.2 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,这说明在历史污染水平上,衡水湖表层沉积物污染程度变化并不大,在京津冀地区、国内其他河流湖库对比均处于中度污染水平.其中湖内 PAHs 浓度最高值出现在靠近碧水湾大酒店的 HSH-1 ($1 497.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$).近些年来,由于周边旅游产业的蓬勃发展导致周边大量未经处理的生活污水排入湖内,这极有可能是造成该处 PAHs 含量明显高于其

他点位的原因.其次为 HSH-10 点 ($1 231.0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$).最低值出现在 HSH-6 点 ($461.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),经过调研,这可能与当时周边环境尚无外来污染源有关.HSH-4 与 HSH-5 两个位点虽然距离甚远,但是其 PAHs 污染浓度却相差不大(相差 $24 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),这可能与两处相似的水文条件有关.

在辽宁省重要水源地-大伙房水库表层沉积物中检测到 PAHs 含量在不同点位差异较大,浓度范围介于 $102.29 \sim 2 240.49 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $564.88 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.Lin 等^[18]在 2010 年 1 月对大伙房水库表层沉积物测定其 PAHs 含量平均值为 $592 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.本

次研究测定 PAHs 浓度与先前报道的污染水平相差不大. 与京津冀地区、国内其他河流湖库对比均处于中度污染水平. 其中水库表层沉积物 PAHs 浓度最大值出现在 DSH-1 点, 然而附近并没有村庄及相应旅游产业, 可能是因为库区水域流态、大气降水吸附及 PAHs 本身疏水、低溶解特性等导致沉积物浓度自然累积. 最小值在 DSH-9 点, 处于浑河入库口附近, 可能是因为浑河入库的水力冲刷作用, 导致大量的沉积物随着水流转移到别处, 其 PAHs 浓度自然也较低.

Baumard 等^[19]利用 PAHs 含量不同对其污染程度进行了分级, 以 100、1 100 和 5 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 为中度、重度和严重这 3 种污染程度等级分界线. 当沉积物中 PAHs 含量少于 100 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 时为轻度污染; 处于 100 ~ 1 100 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间为中度污染; 若是 1 100 ~ 5 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 即为重度污染; 超过 5 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 则认为是严重污染. 分析认为, 于桥水库、衡水湖和大伙房水库表层沉积物样品整体 PAHs 污染水平属于中度污染, 个别点位属于重度污染.

2.2 津冀辽地区典型湖库沉积物 PAHs 组成特征

分析津冀辽地区典型湖库沉积物 PAHs 检测结果可知, 各湖库 16 种美国环保署优先控制的 PAHs 均有不同程度地检出. 所测位点 PAHs 各组分分布情况见图 3. 不同地区 PAHs 检出低浓度组分具有相似性, 3 个湖库 PAHs 的检出组分 Acy 均为最低值, 其均值分别为 2.8、3.7 和 1.0 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 而高浓度组分检出情况却各有差异, 其中于桥水库 BaP 最高 (均值为 156.1 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 衡水湖 DahA 最高 (均值为 116.2 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 大伙房水库 PAHs 单体检出 BaP 最高 (均值为 122.8 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$).

以不同环数对检出的 PAHs 结果进行分类, 把

16 种 PAHs 分成 2 ~ 3、4 和 5 ~ 6 环 PAHs. 图 4 为 3 个湖库 16 种 PAHs 各环数相对含量. 3 个湖库在各环数相对含量上表现出一致性, 均以高环数的 PAHs 为主, 这初步说明 3 个湖库有着相似的污染来源. 其中 3 个湖库 4 ~ 6 环 PAHs 占比分别为于桥水库 86%、衡水湖 83% 和大伙房水库 91%, 3 个湖库低分子量 (2 ~ 3 环) 与高分子量 (4 ~ 6 环) PAHs 两者差别较大. 一般认为, 低分子量的 PAHs 比高分子量的 PAHs 在自然条件下由于其不稳定性更容易发生降解, 而高环数的 PAHs 由于其疏水性、亲脂性等特性难以降解^[41], 因而容易被沉积物吸附所累积^[42].

2.3 津冀辽地区 3 个湖库沉积物 PAHs 来源解析

环境中 PAHs 的来源比较复杂, 不同成因的多环芳烃具有结构和组分上的差异, 因此可利用 PAHs 某些同分异构体的质量浓度比值来判断 PAHs 的来源. 拟采用 $[\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})]$ 、 $[\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})]$ 、 $[\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})]$ 和 $[\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})]$ 的比值来指示 PAHs 在环境介质的来源^[43,44], 从而辨析出沉积物 PAHs 中污染贡献. 当 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) < 0.1$ 时, 说明其主要来源于石油污染, 否则为燃烧源. 当 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr}) < 0.4$, 说明为石油燃烧源污染; 若 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr}) > 0.5$, 说明来源于煤、木材和草等生物物质的燃烧; 否则来源于油类燃烧. 当 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) < 0.2$, 说明来源是石油污染; 若 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) > 0.35$, 说明来源是燃烧源, 否则为油污染与燃烧污染混合源. 当 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) < 0.2$ 说明其来源是石油源污染, 若 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) > 0.5$ 说明其来源是煤、木材和草等燃烧; 否则为石油类燃烧源^[44].

津冀辽地区典型 3 个湖库表层沉积物中的上述指标见图 5. 可以看出, 不同湖库污染来源差异

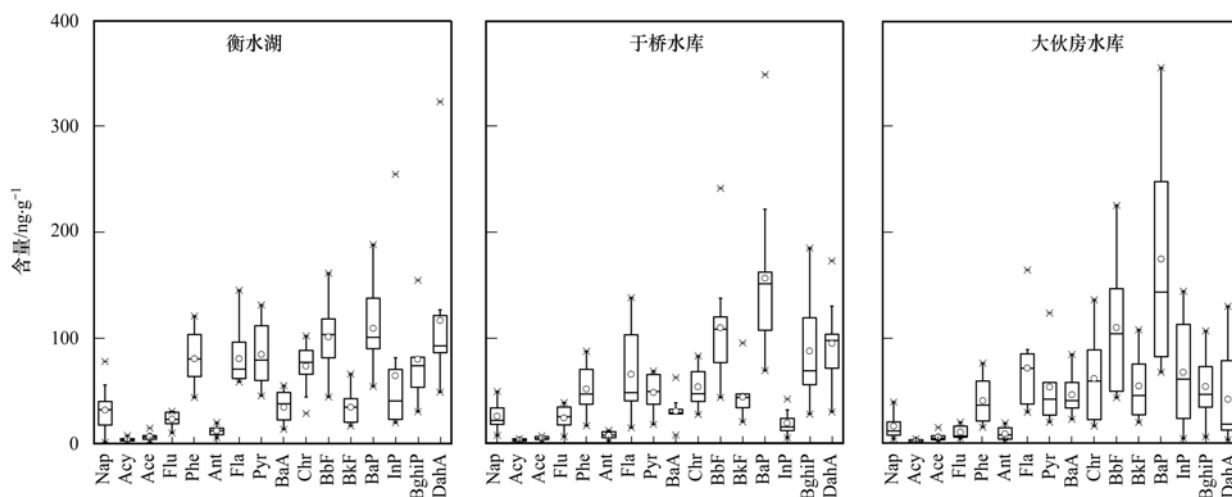


图 3 于桥水库、衡水湖和大伙房水库 PAHs 组分分布情况

Fig. 3 Distribution of PAHs in Yuqiao Reservoir, Hengshui Lake, and Dahuofang Reservoir

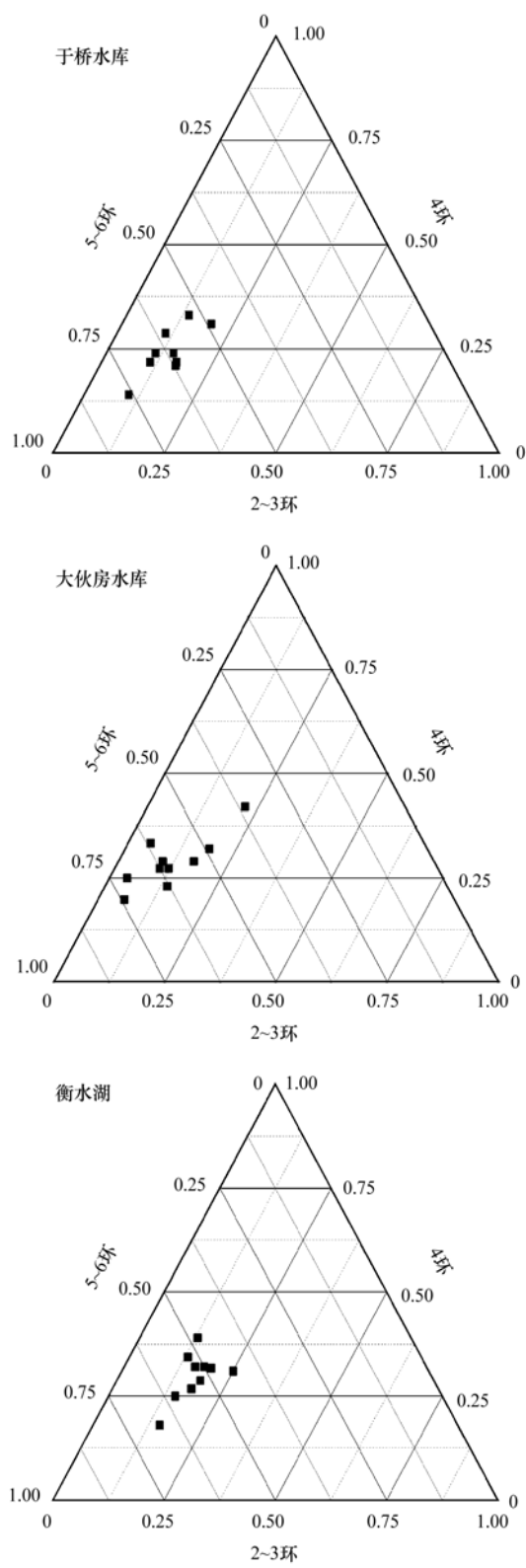


图4 于桥水库、衡水湖和大伙房水库 16 种 PAHs 各环数相对含量

Fig. 4 Relative contents of ring numbers of 16 PAHs in Yuqiao Reservoir, Hengshui Lake, and Dahuofang Reservoir

比较明显. 于桥水库、衡水湖的 $BaA/(BaA + Chr)$ 数值多数处于 0.2 ~ 0.35 范围内, $lnP/(lnP + BghiP)$ 也多数处于 0.2 ~ 0.5 之间, 表明两者污染主要以石油燃烧源为主; 而大伙房水库的 $BaA/$

($BaA + Chr$) 多数大于 0.35, 且 $lnP/(lnP + BghiP)$ 绝大多数大于 0.5, 这说明其主要来源于煤及生物质燃烧. $Fla/(Fla + Pyr)$ 值在各湖库分布较为广泛, 在各个区间都有, 这说明石油污染、石油燃烧污染和煤及生物质燃烧在各湖库均有涉及; 然而 94% 点位的 $Ant/(Ant + Phe)$ 值均大于 0.1, 这说明 3 个湖库受石油类燃烧污染较为明显. 综合分析来看, 衡水湖、于桥水库和大伙房水库沉积物中 PAHs 污染主要以石油燃烧源、煤及生物质燃烧源为主, 部分为石油源.

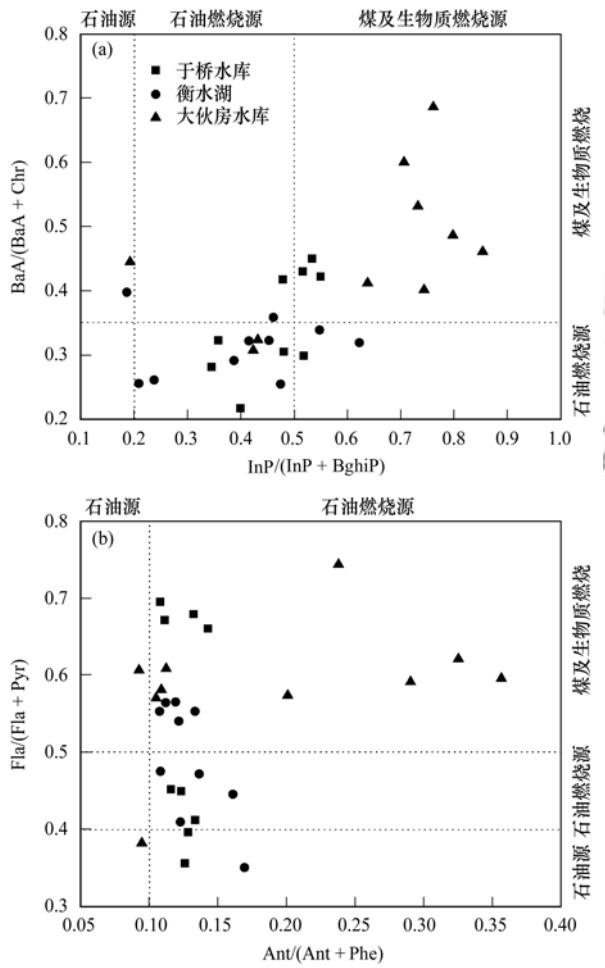


图5 衡水湖、于桥水库和大伙房水库沉积物 PAHs 污染源判别指数分布

Fig. 5 Distribution of pollution source discrimination index of PAHs in sediments of Hengshui Lake, Yuqiao Reservoir, and Dahuofang Reservoir

不同的 PAHs 单体由于其结构组成有许多类似之处, 因此利用分子比值法判断来源其结论尚不完全正确, 有时候甚至会得出截然相反的结论^[45]. 本研究利用主成分分析 (PCA) 和多元线性逐步分析法进一步解析了 16 种 PAHs 化合物的主要来源贡献^[45]. 由图 6 和图 7 可见, 16 种 PAHs 化合物最大方差旋转后得到 3 个主成分因子 (PC1、PC2 和 PC3), 其对总方差解释累计达到 76.7%. 其中 PC1

中 16 种 PAHs 化合物以 BbF、BkF 和 BaP 具有最高的载荷 (>0.9), 这些化合物主要来源于汽油和柴油不完全燃烧污染^[46~49], 贡献达到了 51.40%。PC2 中 16 种 PAHs 化合物以 Nap 和 Acy 具有最高的载荷 (>0.9), 二者通常代表石油化工和油类泄漏污染来源^[29], 贡献为 26.29%。PC3 中 16 种 PAHs 化合物以 Phe、Ant 和 Pyr 具有较高的载荷 (>0.75), 主要反映了煤和薪柴燃烧污染来源^[29], 贡献为 22.31%。主成分分析表明, 3 个湖库的 PAHs 污染主要是燃烧源。其中有 51.4% 的污染贡献来源于交通源 (汽油和柴油不完全燃烧污染), 22.31% 的贡献来源煤和薪柴燃烧。

在京津冀地区, 于桥水库、衡水湖 PAHs 来源与其他湖库河流有着基本相当的结论, 均主要以燃烧源 (包括化石燃料燃烧、煤及生物质燃烧) 为主。这与京津冀地区的能源结构有相当大的关系, 京津冀地区属于北方地区, 城郊居民冬天均依靠散煤及燃煤锅炉取暖, 由于燃烧设备陈旧等原因导致大量未经处理的 PAHs 等污染物直排大气。随着人们生活水平不断提高, 汽车保有量不断攀升。据 2015 年 6 月 5 日的北京日报报道, 京津冀及周边地区机动车保有量为 6 000 万辆左右, 机动车燃油不完全燃烧的排放也逐渐成为京津冀地区环境中 PAHs 的重要来源。

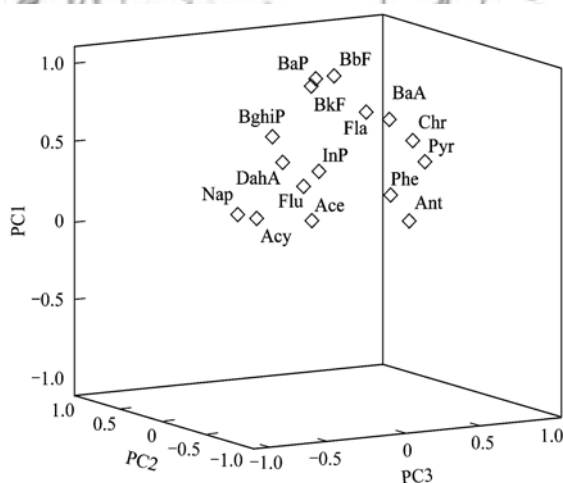


图 6 衡水湖、于桥水库和大伙房水库沉积物 16 种 PAHs 化合物主成分载荷

Fig. 6 Principal component loadings of 16 PAHs compounds in sediments of Hengshui Lake, Yuqiao Reservoir, and Dahuofang Reservoir

2.4 津冀辽地区 3 个湖库沉积物 PAHs 风险评估

本研究采用沉积物质量基准法 (SQGs) 进行风险评估。SQGs 是评价淡水、港湾和海洋沉积物质量的有力工具^[39]。Long 等^[50]在进行大量实验后, 提出了效应区间低值 (effects range low, ERL) 和效

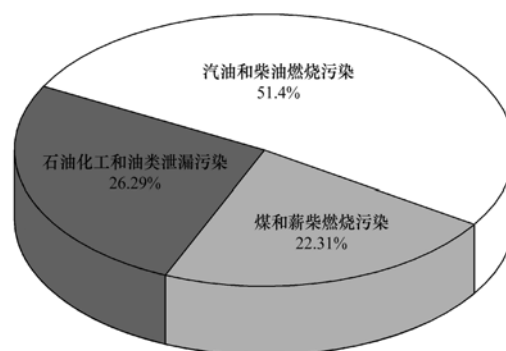


图 7 衡水湖、于桥水库和大伙房水库沉积物 PAHs 污染来源贡献
Fig. 7 Source Contribution of PAHs in sediments of Hengshui Lake, Yuqiao Reservoir, and Dahuofang Reservoir

应区间中值 (effects range median, ERM) 用于确定河口、海洋沉积物中有机污染物的潜在生态风险。进而反映沉积物生态风险水平。当污染物含量小于 ERL 时, 对生物毒副作用不显著 (风险概率 $<10\%$); 当污染物含量大于 ERM 时, 对生物会产生毒副作用 (风险概率 $>50\%$), 可能会产生一定的负面生态效应; 当污染物含量在 ERL 与 ERM 之间时 (风险几率介于 $10\% \sim 50\%$), 偶尔会产生负面生态效应^[25]。

3 个湖库表层沉积物中 PAHs 的生态风险评价结果如表 3 所示。值得注意的是 InP 无最低安全值, 存在于环境中便会对生物产生毒副作用。本研究表明, 于桥水库沉积物中 PAHs 除 Flu、InP 物质在以外, 其他采样点发生负面生态效应均处于低风险水平, 但 Flu 物质有超过一半的位点检出, 说明该物质在于桥水库中存在轻度污染。于桥水库的 InP 在各个位点均有不用程度检出, 应当引起注意。综上判定于桥水库沉积物中 PAHs 污染总体上呈现出中低等生态风险水平态势, 建议后续应加强对 Flu 与 InP 物质的监测、防控, 做好相应应急预案。

衡水湖、大伙房水库的生态风险评价结果具有一致性, 表层沉积物除 Flu、InP 和 DahA 外其他 PAHs 单体的浓度均在相应的 ERL 值内, 表明其他物质对流域内生态环境几乎没有副作用, 产生负面生态效应可能性较低。衡水湖、大伙房水库内各个位点对 InP 也都有检出, 应当对 InP 物质重点监测。其中衡水湖 HSH-1 点检出 DahA 浓度高于其 ERM 值, 说明该处出现负面生态效应可能性较大, 风险概率超过 50% 。另外衡水湖也有一半以上的位点 Flu 值介入 ERL ~ ERM 内, 这说明衡水湖将可能出现由 Flu 引起的生态风险, 应该注意其潜在影响。大伙房水库有一半位点的 DahA 检出浓度介入其 ERL ~ ERM 内, 表明大伙房水库一半位点可能存在 DahA 的负面生态效应, 该物质在大伙房水库存在轻度污

表 3 表层沉积物中 PAHs 的生态风险评价结果展示/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Ecological risk assessment of PAHs in sediments/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

化合物	评价标准		京津冀地区典型湖库沉积物含量		
	ERL	ERM	于桥水库	衡水湖	大伙房水库
Nap	160	2 100	7.41 ~ 48.75	1.12 ~ 77.51	4.45 ~ 39.02
Acy	44	640	0.91 ~ 4.07	0.51 ~ 7.51	0.38 ~ 4.01
Ace	16	500	1.92 ~ 6.81	1.01 ~ 14.55	2.14 ~ 14.85
Flu	19	540	6.35 ~ 38.32	10.03 ~ 30.42	4.65 ~ 19.90
Phe	240	1 500	16.50 ~ 86.95	43.64 ~ 120.34	14.97 ~ 75.69
Ant	85	1 100	2.17 ~ 12.13	5.51 ~ 19.78	2.67 ~ 19.11
Fla	600	5 100	14.59 ~ 137.77	58.38 ~ 144.86	29.31 ~ 163.90
Pyr	670	2 600	17.67 ~ 68.25	45.01 ~ 130.82	19.86 ~ 123.24
BaA	261	1 600	7.54 ~ 62.11	13.54 ~ 54.83	22.57 ~ 84.10
Chr	384	2 800	27.15 ~ 82.30	28.52 ~ 101.57	16.20 ~ 135.85
BbF	320	1 880	43.15 ~ 241.25	44.18 ~ 160.90	43.03 ~ 224.98
BkF	280	1 620	20.11 ~ 94.77	16.80 ~ 65.90	19.58 ~ 107.21
BaP	430	1 600	68.69 ~ 348.61	53.96 ~ 188.10	67.21 ~ 355.42
InP	NA	NA	27.34 ~ 184.46	19.59 ~ 254.61	5.90 ~ 106.36
BghiP	430	1 600	29.53 ~ 172.51	30.12 ~ 154.25	3.35 ~ 129.54
DahA	63.4	260	5.11 ~ 41.58	48.60 ~ 322.83	4.74 ~ 143.79

染. 总的来说,衡水湖、大伙房水库表层沉积物中 PAHs 总体生态风险处于中等偏低水平,后续应加强对 Flu、InP 和 DahA 这 3 类物质的监控.

3 结论

(1)京津冀典型 3 个湖库(于桥水库、衡水湖和大伙房水库)沉积物中 $\sum$ PAHs 分别是 $337.3 \sim 1\,604.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (均值 $820.0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、 $461.1 \sim 1\,497.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (均值 $932.3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 $102.3 \sim 2\,240.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (均值 $564.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). 从空间分布看,于桥水库 PAHs 呈现出东北向西南持续升高的特征. 与国内其他河流湖库相比,于桥水库、衡水湖、大伙房水库均处于中度污染水平.

(2)特征比值法与主成分分析均表明,京津冀典型 3 个湖库污染主要以燃烧源(包括石油类燃烧、煤及生物质燃烧)为主,少部分为石油源. 其中汽油和柴油不完全燃烧污染贡献占比 51.4%,煤和薪柴燃烧污染来源贡献为 22.3%. 湖库捕鱼船只及周边道路汽车尾气排放或为污染主要贡献者,其次为周边村庄生活起居所用煤炭及薪柴.

(3)沉积物质量基准法风险评价结果显示,于桥水库、衡水湖和大伙房水库表层沉积物中 PAHs 总体处于中等偏低水平,但后续应加强对 Flu、InP 和 DahA 这 3 类物质的监控.

参考文献:

[1] Engraff M, Solere C, Smith K E C, *et al.* Aquatic toxicity of PAHs and PAH mixtures at saturation to benthic amphipods: linking toxic effects to chemical activity[J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, **102**(3-4): 142-149.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and suspended sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(17): 17158-17170.

[5] 刘贝贝,陈丽,张勇. 典型多环芳烃在红树林沉积物上的吸附特性及影响因素[J]. *环境化学*, 2011, **30**(12): 2032-2040.

Liu B B, Chen L, Zhang Y. Sorption of typical PAHs on mangrove sediment and their influencing factors [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(12): 2032-2040.

[6] Kimbrough K L, Commey S, Apeti D A, *et al.* Chemical contamination assessment of the Hudson-Raritan Estuary as a result of the attacks on the World Trade Center: analysis of trace elements[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(12): 2289-2296.

[7] Yang Z F, Feng J L, Niu J F, *et al.* Release of polycyclic aromatic hydrocarbons from Yangtze River sediment cores during periods of simulated resuspension[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **155**(2): 366-374.

[8] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(7): 1278-1284.

[9] Yuan D X, Yang D N, Wade T L, *et al.* Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(1): 101-111.

[10] 史玉强,刘建东,金永民,等. 辽宁大伙房水库水质健康风险评估[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(3): 60-64.

Shi Y Q, Liu J D, Jin Y M, *et al.* Water quality assessment of health risks of Dahuofang reservoir [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(3): 60-64.

[11] Grice B A, Nelson R G, Williams D E, *et al.* Associations

- between persistent organic pollutants, type 2 diabetes, diabetic nephropathy and mortality[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2017, **74**(7): 521-527.
- [12] Herzig R, Lohmann N, Meier R. Temporal change of the accumulation of persistent organic pollutants (POPs) and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in lichens in Switzerland between 1995 and 2014[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(11): 10562-10575.
- [13] 李霞, 王东红, 王金生, 等. 北京市枯水季和丰水季水源水中持久性有机污染物的水平分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 437-442.
- Li X, Wang D H, Wang J S, *et al.* Analysis of Persistent Organic Pollutants (POPs) levels in dry and wet seasons in source water of municipal waterworks in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 437-442.
- [14] 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.
- Chen Z M, Gao X J, Song Z G, *et al.* Distribution and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in the tide-beach surface sediments of Hangzhou Bay [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(2): 233-237.
- [15] 李慧, 李捷, 宋鹏, 等. 东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 147-158.
- Li H, Li J, Song P, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of pops pollution in sediments of xiaoxingkai lake in northeast china [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 147-158.
- [16] 葛宁, 冯平, 孙冬梅, 等. 库区面源氮、磷污染对于桥水库水质的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, **13**(3): 427-433.
- Ge N, Feng P, Sun D M, *et al.* Effects of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus on water quality of the Yuqiao Reservoir [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, **13**(3): 427-433.
- [17] 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 等. 衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1357-1367.
- Zhang J W, Wei J, Lü Y F, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Hengshui Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1357-1367.
- [18] Lin T, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Dahuofang Reservoir, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 945-953.
- [19] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and mussels of the western Mediterranean Sea [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(5): 765-776.
- [20] 卢晓霞, 张妹, 陈超琪, 等. 天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3426-3433.
- Lu X X, Zhang S, Chen C Q, *et al.* Concentration characteristics and ecological risk of persistent organic pollutants in the surface sediments of Tianjin coastal area [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3426-3433.
- [21] 郝智能, 胡鹏, 于泳, 等. 天津大沽排水河沉积物典型持久性有机污染物的分布特征与来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(10): 2106-2112.
- Hao Z N, Hu P, Yu Y, *et al.* Distribution and source analysis of classic persistent organic pollutants in sediments from Dagou drainage canal, Tianjin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(10): 2106-2112.
- [22] 郭建阳, 廖海清, 韩梅, 等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 626-631.
- Guo J Y, Liao H Q, Han M, *et al.* Temporal distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment core from Miyun Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(3): 626-631.
- [23] 童宝锋, 刘玲花, 刘晓茹, 等. 北京玉渊潭水相、悬浮物和沉积物中的多环芳烃[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(4): 450-455.
- Tong B F, Liu L H, Liu X R, *et al.* Studies on PAHs in water, suspended particular matter and sediment of Yuyuantan Lake, Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(4): 450-455.
- [24] Zhang Z L, Huang J, Yu G, *et al.* Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 249-261.
- [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] 赵健, 周怀东, 富国, 等. 河北西大洋水库沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评估[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(5): 701-707.
- Zhao J, Zhou H D, Fu G, *et al.* Distributions, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Xidayang Reservoir, Hebei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(5): 701-707.
- [27] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 河北王快水库沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评估[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 647-653.
- Zhao J, Zhou H D, Lu J, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Wangkuai Reservoir, Hebei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 647-653.
- [28] 曹治国, 刘静玲, 栾芸, 等. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评估与来源辨析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(2): 246-253.
- Cao Z G, Liu J L, Luan Y, *et al.* Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in sediments and water of the Luan River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(2): 246-253.
- [29] 崔志丹, 冯建国, 焦立新, 等. 松花湖表层沉积物中 PAHs 及 PAEs 污染特征[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1531-1539.
- Cui Z D, Feng J G, Jiao L X, *et al.* Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters in surface sediments of in Songhua Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1531-1539.
- [30] 张科. 呼伦湖和查干湖沉积物多环芳烃污染历史与来源分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019.
- Zhang K. Pollution history and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Hulun Lake and Chagan Lake [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019.

- [31] 杨臣, 曾颖, 李月兴, 等. 五大连池药泉湖表层沉积物有机污染状况及分布特征[J]. 环境与可持续发展, 2015, **40**(1): 155-156.
Yang C, Zeng Y, Li Y X, *et al.* Organic pollutants in surface sediment of Wudalianchi drug spring lake and its distribution characteristics[J]. Environment and Sustainable Development, 2015, **40**(1): 155-156.
- [32] 韩菲, 郭宝东, 王英艺. 辽河表层沉积物多环芳烃分布、来源及生态风险评价[J]. 环境保护与循环经济, 2010, **30**(12): 62-66.
- [33] 万宏滨, 周娟, 罗端, 等. 长江中游湖泊表层沉积物多环芳烃的分布、来源特征及其生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1632-1645.
Wan H B, Zhou J, Luo D, *et al.* Distribution source characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lakes along the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(6): 1632-1645.
- [34] 余云龙, 李圆圆, 林田, 等. 太湖表层沉积物中多环芳烃的污染现状及来源分析[J]. 环境化学, 2013, **32**(12): 2336-2341.
Yu Y L, Li Y Y, Lin T, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Taihu Lake[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(12): 2336-2341.
- [35] 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.
- [36] 刘抗, 郑曦, 韩宝平. 骆马湖表层沉积物中多环芳烃的源解析[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2012, **30**(2): 65-68.
Liu K, Zheng X, Han B P. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment of Luoma Lake[J]. Journal of Xuzhou Normal University (Natural Science Edition), 2012, **30**(2): 65-68.
- [37] 王军良, 梅益柔, 潘军, 等. 钱塘江齐溪水库表层沉积物中多环芳烃的分布研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, **43**(5): 547-551.
Wang J L, Mei Y R, Pan J, *et al.* Distribution of PAHs in sediments in Qixi Reservoir of Qiantang River [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, **43**(5): 547-551.
- [38] 杜威宁, 刘敏, 朱俊敏, 等. 淀山湖沉积物 PAHs 季节分布与风险度指数评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3999-4006.
Du W N, Liu M, Zhu J M, *et al.* Season distribution characteristics and the risk index assessment of PAHs in surface sediments of Dianshan Lake[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3999-4006.
- [39] 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.
- [40] 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊, 等. 滴水湖水系沉积物中多环芳烃的分布及风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2069-2074.
Mei W P, Ruan H H, Wu H, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Dishui Lake water system [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(11): 2069-2074.
- [41] 林峥, 麦碧娴, 张干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 115-121.
Lin Z, Mai B X, Zhang G, *et al.* Quality assurance/quality control in quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons & organochlorine pesticides in sediments [J]. Environmental Chemistry, 1999, **18**(2): 115-121.
- [42] 任亚军. 扬州城区水体和表层底泥中 3 类持久性有机污染物时空分布及风险评价[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
Ren Y J. Temporal and spatial distribution and risk assessment of three pollutants in water and surface sediments of Yangzhou urban area[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [43] Chen C F, Chen C W, Dong C D, *et al.* Assessment of toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2013, **463-464**: 1174-1181.
- [44] 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.
- [45] Chen H Y, Teng Y G, Wang J S. Source apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of the Rizhao coastal area (China) using diagnostic ratios and factor analysis with nonnegative constraints [J]. Science of the Total Environment, 2012, **414**: 293-300.
- [46] 刘颖. 上海市土壤和水体沉积物中多环芳烃的测定方法、分布特征和源解析[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [47] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3789-3797.
Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: Based on PMF model [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3789-3797.
- [48] Kwon H O, Choi S D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in soils from a multi-industrial city, South Korea[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 1494-1501.
- [49] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. Science of the Total Environment, 2015, **527-528**: 375-383.
- [50] Long E R, MacDonald D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 1998, **4**(5): 1019-1039.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)