

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM _{2.5})成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良A ² /O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征:以神农架大九湖为例

胡天鹏^{1,2}, 邢新丽^{1*}, 柯艳萍¹, 毛瑶¹, 黎熒¹, 郑煌¹, 喻月¹, 张家泉², 祁士华¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 矿区污染控制与修复湖北省重点实验室, 黄石 435003)

摘要: 于 2012 年 4 月沿大九湖湿地平均分布 10 个采样点, 各采集 0~10、10~20 以及 20~30 cm 浅层土壤, 采用 GC-MS 对大九湖湿地浅层土壤中 USEPA 16 种优控多环芳烃(PAHs)进行分析, 对其分布、组成、来源进行了详细的讨论, 并对高山湿地 PAHs 污染标志物进行了浅析. 结果表明, 研究区 0~10、10~20、20~30cm 浅层土壤中 $\sum_{16}$ PAHs 含量分别为 48.55~984.73、14.36~806.47、12.84~1191.53 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值分别为 302.94、142.98、208.68 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 7 种致癌单体多环芳烃含量范围分别为 21.20~844.29、2.96~592.06、0.66~964.70 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值分别为 197.25、93.16、147.16 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别占总 PAHs 的 65.12%、65.13%、69.08%; 泥炭区 PAHs 含量明显高于非泥炭区, 且已达到重度污染程度; PAHs 组成以 4、5、6 环为主; 结合 IcdP/(IcdP+BghiP) 及 Pyr/BaP 比值分析, 推测大九湖湿地浅层土壤中 PAHs 主要来源于化石燃料及木材的燃烧, 近年来旅游车辆的进入对 PAHs 的贡献较大; 对浅层土壤中各单体 PAH 与 PAHs 总含量进行回归分析表明蒽、苯并(b)蒽、茚(1,2,3cd)并芘、苯并(a)蒽作为泥炭地 PAHs 标志性化合物, 用来评价 PAHs 的污染程度.

关键词: 多环芳烃; 大九湖; 高山湿地; 组成特征; 来源解析

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1872-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707218

Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiuhu Lake, Shengnongjia

HU Tian-peng^{1,2}, XING Xin-li^{1*}, KE Yan-ping¹, MAO Yao¹, LI Ying¹, ZHENG Huang¹, YU Yue¹, ZHANG Jia-quan², QI Shi-hua¹

(1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-restoration, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control and Remediation, School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China)

Abstract: Ten sampling points were distributed approximately equidistantly in the Dajiuhu lake wetland, and soils from the depths 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm were collected in April 2012. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the remote mountain wetland shallow soils, and 16 kinds of USEPA priority controlled polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollutants were identified. The $\sum_{16}$ PAHs content ranges of the shallow soils of this region were 48.55-984.73 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 14.36-806.47 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and 12.84-1191.53 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in the 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm layers, with a mean of 302.94 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 142.98 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and 208.68 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in the three layers, respectively. The concentrations of seven carcinogenic PAHs ranged from 21.20-844.29 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 2.96-592.06 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and 0.66-964.70 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in the three soil layers, with means of 197.25 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 93.16 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and 147.16 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ that accounted for 65.12%, 65.13%, and 69.08% of the total PAHs in the three soil layers, respectively. The concentrations of PAHs in the areas with peat were significantly higher than that in the soil. PAHs having 4-6 rings were the dominant ones. The ratios IcdP/(IcdP+BghiP) and Pyr/BaP showed that the PAHs in the shallow soil from the Dajiuhu lake wetland mainly came from burning fossil fuels and wood. In recent years, the entry of tourist vehicles has contributed significantly to the increase in PAHs. The regression analysis on peat surface layer single body PAH and total PAHs showed that Chr, BbF, IcdP, and BaA could be used as a signaling property of mountain wetland PAH pollution.

Key words: PAHs; Dajiuhu Lake; mountain wetland; composition characteristics; source apportionment

收稿日期: 2017-07-25; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41773124); 盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地开放课题项目(BHWR201503A); 中央高校优秀基金项目

作者简介: 胡天鹏(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: tianphu2016@cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xingxinli5300225@163.com

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),持久性有机污染物(POPs)具有高毒性、持久性、生物累积性和半挥发性,在环境中持久存在,且能在大气中长距离迁移并返回地表,会对人类健康和环境造成严重危害^[1~3]. POPs 的半挥发性导致它们以蒸气或者大气颗粒物吸附的形式通过大气环流进行远距离迁移. 在热带和亚热带,高温导致 POPs 趋于从地球表面蒸发;而在高纬度地区,低温使 POPs 从大气中向土壤和水体中沉降;在寒冷的生态系统中 POPs 趋于冷凝、沉降和聚集^[4, 5]. 因此,在远离 POPs 使用或者释放源区的中高海拔及中高纬度地区,由于气温低、降水也相对较多,成为 POPs 重要的接收器和存储库. 已有报道证实在南北极^[6]和青藏高原地区^[7]已有 PAHs 的较高残留.

大九湖湿地位于湖北省神农架林区的西北端,湿地保护区总面积 93.20 km²,中央盆地面积约 16.45 km²,盆地底部海拔约 1 700 ~ 1 800 m,周围群山环绕,是神农架西部的一个山间盆地,具有与高纬度地区相似的冷凝作用,是 PAHs 的主要汇区之一. 大九湖具有相对封闭的地理位置和较为原始的湿地自然环境,人为活动干扰较少,而泥炭有机质含量高,是 POPs 储存的重要介质. 到目前为止,关于大九湖 PAHs 污染尚未见报道. 因此,查明大九湖湿地

PAHs 污染水平,组成及分布特征,对于大九湖国家湿地公园生态文明建设具有科学的指导意义,可为评价区域环境质量提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 样品采集及土壤岩性

于 2012 年 4 月沿大九湖湿地平均分布 10 个采样点如图 1 所示(S1 ~ S10),分别采集 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 浅层土壤样品. 样品采集时选取 5 m × 5 m 的样方,分别采取 4 个角落及样方中心 5 个样品组成一个代表性混合样,避免偶然误差. 样品采集后用铝箔包裹于聚乙烯密实袋保存,并尽快运回实验室,在 -20℃ 条件下冷冻保存.

10 个采样点浅层土壤岩性分别为: S1,灰色黏土; S2,表层为黑色黏土,向下颜色逐渐变浅; S3,黏土,表层颜色偏黑,0 ~ 20 cm 有少许石子,20 ~ 30 cm 为砂质黏土; S4,黏土,表层颜色偏深; S5,淡黑色泥炭,正在发育,表面长有大量泥炭藓,表层含有大量未完全分解的植物碎屑物,向下植物碎屑物逐渐减少; S6,黑色发育成熟的泥炭,含丰富的未分解的植物碎屑物; S7,黏土,表层含草根较多,有很多石子; S8,表层黏土颜色较深,向下颜色逐渐变浅; S9,黑色黏土,20 ~ 30 cm 颜色急剧变深,植物碎屑物含量丰富; S10,表层为黑色砂质土,颜色较深.

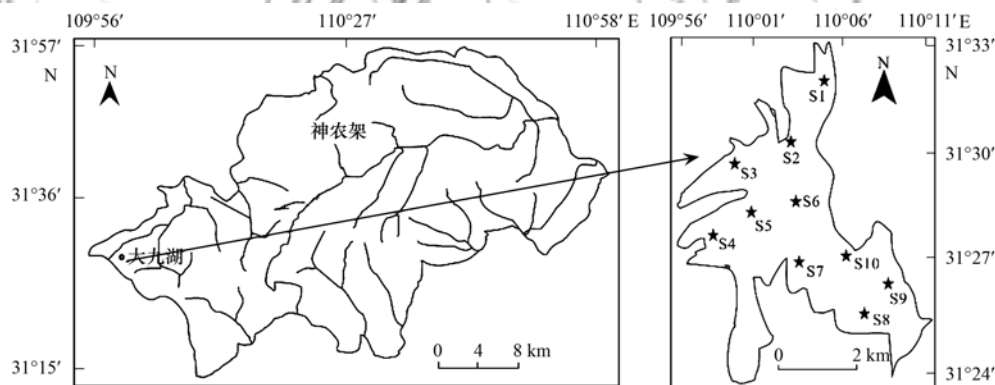


图 1 大九湖湿地采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Dajiuhu Lake

1.2 样品预处理

土壤样品经自然风干,并去除动植物残体及杂质后,研磨过 100 目筛,称取 10 g 样品及加入 5.0 μL 回收率指示物 Nap-D₈、Acy-D₁₀、Phe-D₁₀、Chr-D₁₂ 和 Pyr-D₁₂,用 CH₂Cl₂ 120 ~ 140 mL 水浴温度 45℃ 下,索氏抽提 24 h,并用铜片脱硫.

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 > 99.999%)吹至 0.2 mL,加入内标标准物(六甲基苯),低温保存至上机分析. 其中,硅胶置于烘箱 180℃ 烘 12 h,氧化铝置于马弗炉 270℃ 烘 12 h 以活化. 冷却后,分别加 3% (质量分数)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) 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℃, 载气为氦气 (纯度 > 99.99%), 流速为 1 mL·min⁻¹, 不分流进样, 进样量为 1.0 μL. PAHs 回收率指示物购自美国 Supelco, 所使用有机试剂二氯甲烷、正己烷均为农残级购自美国 Tedia 公司.

1.4 质量控制/质量保证 (QA/QC)

样品处理过程中使用平行样、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 15%, 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 60% ± 12%、76% ± 10%、98% ± 10%、108% ± 13% 及 118% ± 11%. 最终结果经回收率校正.

2 结果与讨论

2.1 高山湿地浅层土壤中 PAHs 含量

大九湖湿地浅层土壤中 PAHs 含量见表 1. 在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 浅层土壤中 PAHs 总含量分别为 48.55 ~ 984.73、14.36 ~ 806.47、12.84 ~

1 191.53 ng·g⁻¹, 均值分别为 302.94、142.98、208.68 ng·g⁻¹; 7 种致癌单体多环芳烃含量范围分别为 21.20 ~ 844.29、2.96 ~ 592.06、0.66 ~ 964.70 ng·g⁻¹, 均值分别为 197.25、93.16、147.16 ng·g⁻¹, 分别占总 PAHs 的 65.12%、65.13%、69.08%. 表层 0 ~ 10 cm 的 PAHs 含量普遍高于 10 ~ 20 cm 及 20 ~ 30 cm 层面 PAHs 的含量. 对于 0 ~ 10、10 ~ 20 以及 20 ~ 30 cm 浅层土壤来说 PAHs 含量标准差都偏高, 最高值与最低值之间都相差 20 倍以上, 说明大九湖湿地浅层土壤中 PAHs 含量差异较大, 这与大九湖湿地土壤岩性有关, 大九湖湿地土壤主要为砂土、沙壤以及泥炭, 泥炭有机质含量高, 相对于其他岩性的土壤对于有机物的吸附作用更强^[8]. 2 环的 Nap 检出率最高为 100%, 检出率最低为 3 环的 Ace 为 40%, 而且 7 种致癌单体多环芳烃检出率普遍偏高 BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DBA、IcdP 检出率分别为 86.67%、83.33%、96.67%、93.33%、96.67%、83.33% 以及 90%. 我国尚无评判 PAHs 污染水平的标准, 根据 Long^[9] 建立的生态风险评价原则, 没有最低安全阈值的高分子量致癌性多环芳烃单体 BaP 和 BkF 只要存在于环境中, 就会对生物体健康产生威胁, 在整个大九湖盆地采样区这两种 PAH 单体检出率都高于 90%, 表明大九湖盆地浅层土壤中 PAHs 对生物体健康存在一定的潜在威胁.

表 1 大九湖浅层土壤中 PAHs 的含量¹⁾/ng·g⁻¹

Table 1 Data of 16 PAHs in the shallow soil from Dajiu Lake/ng·g⁻¹

成分	环数	最小值			最大值			均值			标准差		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Nap	2	2.54	1.60	1.94	21.32	20.95	26.42	6.81	6.66	10.44	5.46	6.50	10.16
Acy	3	N. D. ^b	N. D.	N. D.	0.38	0.34	0.36	0.12	0.17	0.11	0.13	0.12	0.15
Ace	3	N. D.	N. D.	N. D.	0.17	0.46	0.43	0.04	0.14	0.11	0.06	0.17	0.16
Flu	3	N. D.	N. D.	N. D.	7.81	4.23	3.50	1.44	1.23	0.93	2.21	1.26	1.11
Phe	3	0.18	0.02	0.35	55.98	30.82	8.92	13.92	7.81	5.45	15.08	9.12	2.78
Ant	3	1.30	0.04	0.46	54.61	22.52	46.24	12.93	7.39	11.80	15.43	7.69	14.26
Fla	4	N. D.	N. D.	0.22	37.50	14.21	15.16	11.64	4.04	4.30	12.36	3.79	4.18
Pyr	4	N. D.	1.03	0.47	196.53	20.31	61.96	36.44	7.12	11.81	60.42	6.68	17.49
BaA ^a	4	N. D.	N. D.	N. D.	476.62	196.74	513.63	53.03	21.27	54.06	141.53	58.52	153.28
Chr ^a	4	N. D.	N. D.	N. D.	53.13	62.20	69.66	17.51	9.57	10.82	19.88	17.86	20.36
BbF ^a	5	3.58	0.16	N. D.	55.89	44.90	69.19	20.95	8.63	12.28	18.68	13.61	21.32
BkF ^a	5	2.36	N. D.	N. D.	27.35	10.74	34.96	9.01	2.49	8.98	7.40	3.23	12.54
BaP ^a	5	4.10	0.49	N. D.	214.51	153.29	185.51	72.56	29.34	42.87	72.62	44.74	66.79
DBA ^a	5	N. D.	N. D.	N. D.	19.31	62.69	38.18	4.19	7.80	6.86	5.93	18.38	13.02
IcdP ^a	6	N. D.	N. D.	N. D.	63.92	71.09	81.80	20.00	14.07	11.31	19.73	23.16	23.74
BghiP	6	1.97	N. D.	N. D.	87.89	118.43	142.55	22.35	15.27	16.57	26.52	35.01	42.21
Σ ₇ PAHs ^c		21.2	2.96	0.66	844.29	597.07	964.7	197.25	93.16	147.16	232.58	173.58	287.98
Σ ₁₆ PAHs ^d		48.55	14.36	12.84	984.73	806.47	1191.53	302.94	142.98	208.68	275.40	227.11	349.62

1) C1 为 0 ~ 10 cm, C2 为 10 ~ 20 cm, C3 为 20 ~ 30 cm; 上标中 a 表示 7 种致癌多环芳烃单体, b 表示低于检测限或未检出, c 表示 7 种致癌多环芳烃总和, d 表示 16 种多环芳烃总和

与国内外其他泥炭地及中高海拔研究区相比(表 2),大九湖泥炭表层 PAHs 含量远低于大兴安岭、英国及瑞士泥炭区表层 PAHs 含量,可能与研究区紫外线较强对 PAHs 降解程度较高,略低于长白山雨养泥炭表层 PAHs 含量,与三江平原泥炭区表层 PAHs 含量相当,远高于加拿大及波兰泥炭表层 PAHs 含量,约是加拿大泥炭区表层 PAHs 含量的 10 倍;研究区浅层土壤中 PAHs 含量远低于青藏高

原中北部湖泊流域区土壤、藏东南色季拉山、四川阿坝、重庆金佛山表层土壤 PAHs 含量,但远高于青藏高原东部,约是青藏高原东部表层土壤中 PAHs 的 100 倍.表明研究区泥炭及表层土壤中 PAHs 处于中等污染水平.

2.2 高山湿地浅层土壤中 PAHs 分布特征
有研究表明土壤有机质含量、矿物质组成及颗粒大小是土壤对疏水性有机物吸附的决定性因

表 2 国内外相关研究对比/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

泥炭			中高海拔区土壤		
研究区	含量	文献	研究区	含量	文献
大兴安岭	1 874. 4 ~ 5 040	[10]	青藏高原中北部	60. 6 ~ 6 144	[11]
三江平原	365. 4 ~ 975. 4	[12]	重庆金佛山	240 ~ 2121	[13]
长白山	1 404 ~ 1 936	[14]	色季拉山	99. 3 ~ 1984	[15]
波兰	70 ~ 439	[16]	青藏高原东部	0. 83 ~ 4. 41	[17]
UK	203 ~ 11 112	[18]	四川阿坝	32. 78 ~ 1131. 57	[19]
Canada	68 ~ 363	[20]	神农架大九湖	12. 84 ~ 501. 66	本研究
Switzerland	4517	[21]			
神农架大九湖	112. 66 ~ 1 191. 53	本研究			

素^[22,23]. 大九湖湿地浅层土壤中多环芳烃分布规律如图 2 所示. 总体呈现泥炭区含量高于非泥炭区且 PAHs 时空分布差异较大. 0 ~ 10、10 ~ 20 以及 20 ~ 30 cm 这 3 个层次的浅层土壤中 PAHs 总含量由高到低分别为 $S6 > S2 > S10 > S5 > S9 > S7 > S8 > S3 > S1 > S4$ 、 $S6 > S8 > S9 > S5 > S2 > S4 > S10 > S3 > S1 > S7$ 以及 $S6 > S9 > S5 > S1 > S2 > S4 > S8 > S3 >$

$S10 > S7$. $S6$ 与 $S5$ 浅层土壤中 PAHs 都偏高,这两个点位都位于泥炭区,含量偏高可能与泥炭有机质含量高有关,高含量的有机质对于有机物的吸附更加有利^[8];而 $S2$ 处表层 PAHs 含量高可能与表层土壤腐殖质含量高有关, $S2$ 处表层土壤为黑色; $S8$ 、 $S9$ 及 $S10$ 表层 PAHs 含量偏高,一方面可能是因为土壤腐殖质含量高,另一方面可能与这 3 处靠

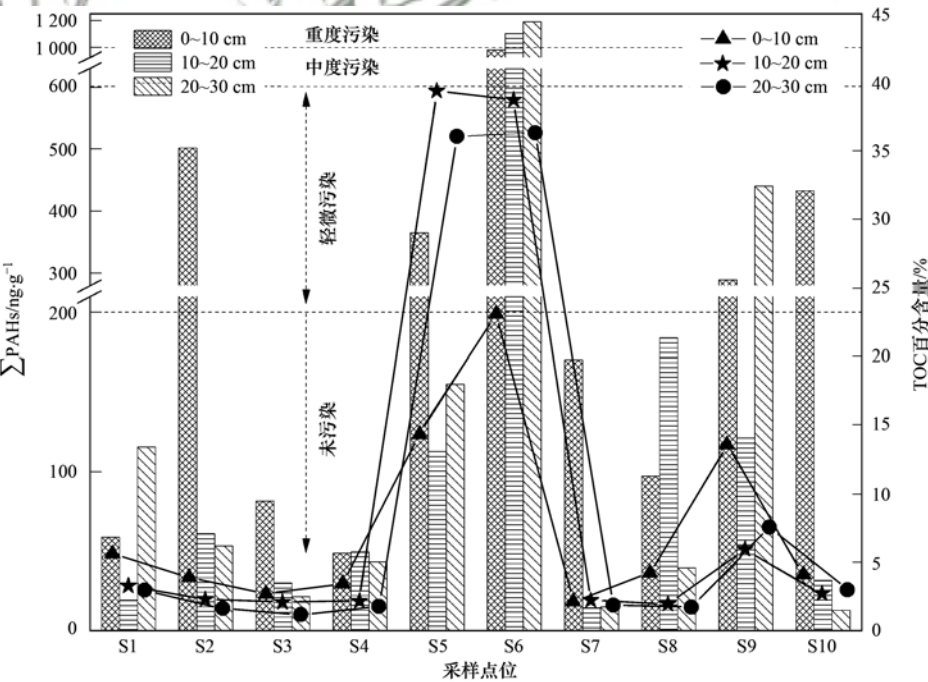


图 2 大九湖浅层土壤中 PAHs 及 TOC 的含量分布

Fig. 2 Concentrations of PAHs and TOC in the shallow soil from Dajiuhu Lake

近大九湖湿地管理局及湿地内居民居住区,受生活及交通影响.近年来由于大九湖景区的逐渐开放,旅游人员越来越多,因此靠近道路附近的点位表层0~10 cm的PAHs含量普遍高于10~20 cm及20~30 cm层面PAHs的含量;结合图2及研究区土壤岩性可以看出,大九湖湿地浅层土壤中PAHs的纵向分布可能与土壤岩性有关,土壤岩性为黏土的点位,PAHs纵向含量都逐渐减少,而泥炭区PAHs的纵向含量在一定范围内则逐渐增加,S5处出现反常,可能是因为S5处表层泥炭含有大量未腐解完全的植物残体而向下则逐渐减少.根据Malawska等^[16]建立的PAHs土壤含量分类标准:未污染($< 200 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、轻微污染($200 \sim 600 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、中度污染($600 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)、重度污染($> 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$).从图2可知S6处于重度污染,S2、S5、S9及S10都处于轻微污染,其他点位为未污染.

2.3 高山湿地浅层土壤中PAHs组成

按照环数进行划分,其中低环(2、3环)PAHs易挥发,中环(4环)PAHs属于半挥发性有机物,高环(5、6

环)PAHs挥发性差,主要吸附于颗粒物表面^[24].

由图3可见,研究区浅层土壤中PAHs组成差异性较大,Nap及BaP的含量较高,其次是荧蒽、芘、苯并(a)蒽等4环PAHs.研究区表层0~10 cm土壤中低环(2、3环)PAHs含量明显低于10~20 cm及20~30 cm土壤,低分子量PAHs含量随土壤深度有明显增加的趋势;而0~10 cm土壤中高环(4、5、6环)PAHs含量高于低环(2、3环)PAHs,占PAHs总含量的67.69%,明显不同于其他研究区低环PAHs占据绝对优势的趋势^[3,10,13].可能原因如下:受到大气干湿沉降进入研究区土壤的PAHs构成影响;受泥炭沼泽发育厌氧环境的影响,据Thiele等^[25]的报道,在缺氧条件下植物中的芳香烃和腐殖质前体可形成3环以上的高环芳烃,而萘也更容易在厌氧条件下由生物合成;研究区独特的气候条件(气温偏低但紫外线照射较强)有利于低环PAH单体挥发及转化,独特的地理位置(研究区是高山环绕的山间盆地)影响PAHs的环境行为;也可能与近年来大九湖景区接待的游客增多受到人为活动影响有关.

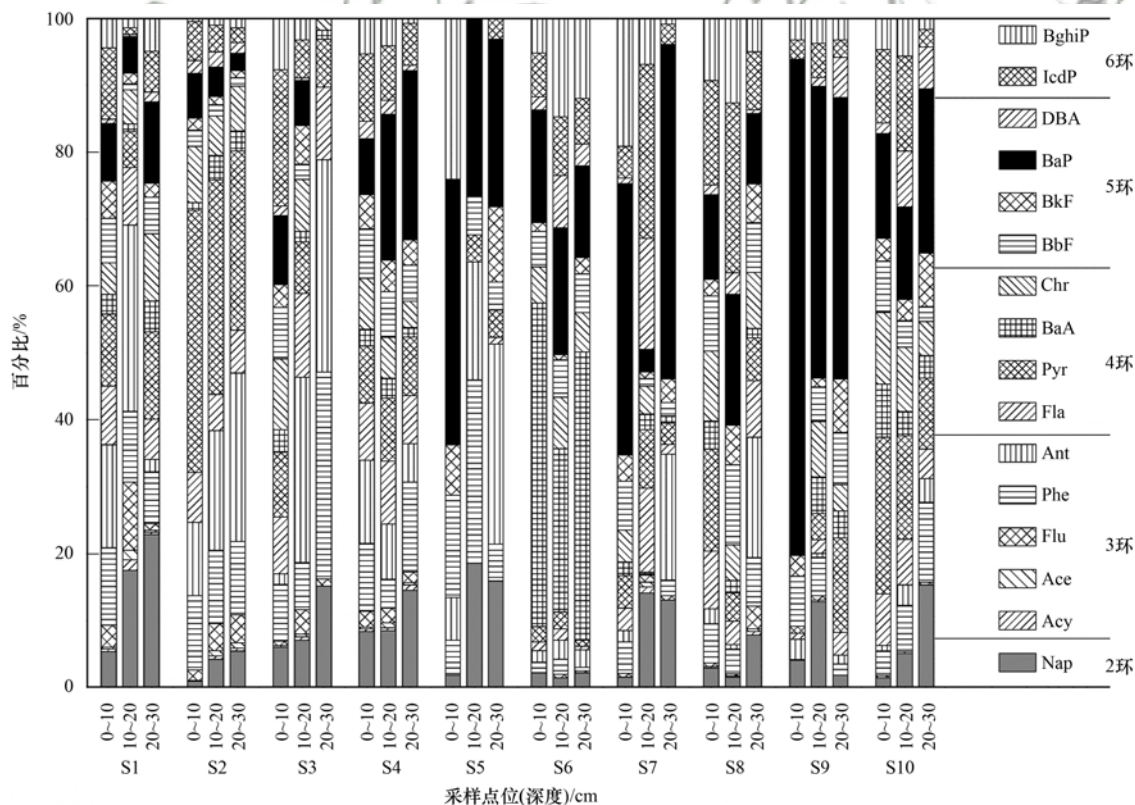


图3 大九湖浅层土壤中PAHs各组分的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of individual PAHs in the shallow soil from Dajiuhu Lake

2.4 高山湿地浅层PAHs来源解析

PAHs的来源分为自然源和人为源两种,4环及

以上中高环PAHs主要来源于煤等化石燃料的高温燃烧,2~3环低环PAHs主要来源于有机物的低温

转化和石油产品的泄漏^[26, 27]. 在实际运用中, 往往选择具有一定稳定性的母体多环芳烃作为源解析的分子标志物, 当 $IcdP/(IcdP + BghiP) < 0.2$ 时, 主要是石油泄漏, > 0.5 时主要为生物质及煤炭燃烧来源, 介于两者之间主要受石油及其精炼品燃烧的影响^[2-4, 19, 26, 27], 而 Pyr/BaP 比值可以进一步作为分析 PAHs 来源的信息, 当 $Pyr/BaP < 1$ 时, 表示燃煤排放, 介于 1~6 之间表示机动车尾气排放^[28].

由图 4 可知, 0~10 cm 表层土壤 $IcdP/(IcdP + BghiP)$ 比值介于 0.2~0.94 之间, 表明表层土壤中 PAHs 都来源于燃烧源, 且除 S7 及 S9 外其余点位比值都大于 0.5, 说明大九湖高山湿地木材、煤等生物质燃烧对表层土壤中 PAHs 来源贡献较大; 10~20 cm 的浅层土壤 $IcdP/(IcdP + BghiP)$ 除 S1、S6 介于 0.2~0.5 之间 (S5、S7 未检出) 其余 6 个点位都大于 0.5; 20~30 cm 的较深层的土壤 $IcdP/(IcdP + BghiP)$ 的比值除 S6、S9 介于 0.2~0.5 之间, 其余点位比值都大于 0.5 指示木材及煤的燃烧. $IcdP/(IcdP + BghiP)$ 比值表明大九湖湿地土壤中 PAHs 主要来源于燃烧, 且木材及煤的燃烧对 PAHs 贡献较大, 由于大九湖地处高山盆地且地理位置较偏远, 研究区内居民较少, 因此大气干湿沉降对土壤中 PAHs 贡献较大, 湿地内居民日常生活燃烧对于 PAHs 也有一定的影响, 而 S1、S7 及 S9 这 3 个点位靠近路边因此受石油及其精炼品燃烧的影响较大.

利用 Pyr/BaP 比值进一步判断 PAHs 来源于燃煤排放还是尾气排放. 在 0~10 cm 表层土壤中除 S3、S6、S7 及 S9 小于 1 表示燃煤排放外, 其它点位都介于 1~6 之间表示机动车尾气排放; 而在 10~20 cm 浅层土壤中 S1、S2、S3、S7 及 S10 比值介于 1~6 之间, 其他 5 个点位比值则小于 1; 20~30 cm 较深层土壤中除 S1 及 S2 比值介于 1~6 之间其他点位比值都小于 1. 由此推断研究区土壤中 PAHs 主

要是化石燃料及木材等燃烧排放. 且随着深度增加 PAHs 更多来自于燃煤排放. 表明旅游车辆对大九湖土壤中 PAHs 污染有一定的贡献, 且越来越明显. 由于该地区远离工业园区以及交通繁忙地段, 因此 PAHs 主要来源于旅游车辆排放、大气干湿沉降及研究区内少量原著民的日常生活.

2.5 高山湿地浅层 PAHs 标志物浅析

高山湿地由于其独特的自然环境及气候条件, 且大九湖高山湿地土壤由泥炭转化而来, 高有机质含量的泥炭及高山冷凝效应使其成为 PAHs 等 POPs 的特殊受体. 同时大九湖湿地 PAHs 来源比较单一, 因此将大九湖高山湿地土壤中 16 种单体 PAH 分别和 $\sum_{16} PAHs$ 进行回归分析, 相关性较强的单体 PAH 可作为标志单体. 结果表明蒽 (Chr)、苯并 (b) 荧蒹 (BbF)、茚 (1,2,3cd) 并芘 (IcdP) 以及苯并 (a) 蒹 (BaA) 与 $\sum_{16} PAHs$ 的相关性较显著, 相关系数 R^2 分别高达 0.84、0.83、0.79、0.78. 同时 BaP、DBA、BghiP 与 $\sum_{16} PAHs$ 也存在一定的相关性, 但相关系数 R^2 并不高仅为 0.6 左右, 其他单体 PAH 与 $\sum_{16} PAHs$ 的相关性均低于 0.5. 因此可以将蒽、苯并 (b) 荧蒹、茚 (1,2,3cd) 并芘、苯并 (a) 蒹作为高山湿地 PAHs 标志性单体化合物, 用来评价 PAHs 的污染程度.

3 结论

(1) 大九湖湿地浅层土壤中 PAHs 含量在 0~10、10~20、20~30 cm 浅层土壤中 PAHs 总含量分别为 48.55~984.73、14.36~806.47、12.84~1191.53 $ng \cdot g^{-1}$, 均值分别为 302.94、142.98、208.68 $ng \cdot g^{-1}$. 表层 0~10 cm 的 PAHs 含量普遍高于 10~20 cm 及 20~30 cm 层面 PAHs 的含量, 4、5、6 环 PAHs 占主要地位.

(2) 研究区地理位置相对封闭, PAHs 主要来源于化石燃料及木材的燃烧排放, 近年来旅游车辆的进入对研究区 PAHs 有一定的贡献.

(3) 将 16 种单体 PAH 与总 PAHs 回归分析得出蒽、苯并 (b) 荧蒹、茚 (1,2,3cd) 并芘、苯并 (a) 蒹可以作为该区高山湿地土壤中代表性 PAHs 污染物.

参考文献:

- [1] 顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 等. 常州市大气 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3110-3119.

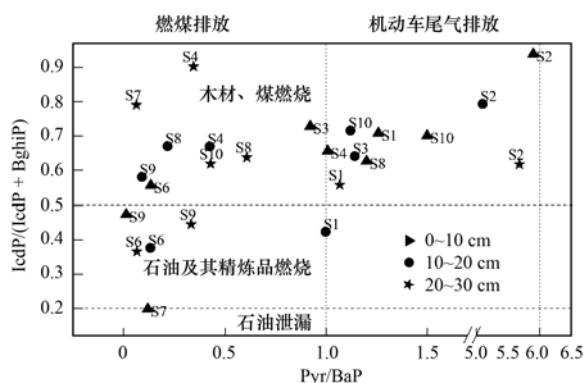


图 4 大九湖浅层土壤中 PAHs 来源解析

Fig. 4 Source of PAHs in the shallow soil from from Dajiuhu Lake

- Gu A J, Liu J S, Luo S P, *et al.* Pollution characteristics and source identification of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Changzhou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3110-3119.
- [2] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1587-1596.
- Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1587-1596.
- [3] 苗迎, 孔祥胜. 南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4333-4340.
- Miao Y, Kong X S. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental media in Nanning City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4333-4340.
- [4] Hu T P, Zhang J Q, Ye C, *et al.* Status, source and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil from the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **172**: 20-28.
- [5] Wania F, Mackay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(9): 390A-396A.
- [6] Kallenborn R, Oehme M, Wynn-Williams D D, *et al.* Ambient air levels and atmospheric long-range transport of persistent organochlorines to Signy Island, Antarctica[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **220**(2-3): 167-180.
- [7] Han Y M, Wei C, Bandowe B A M, *et al.* Elemental carbon and polycyclic aromatic compounds in a 150-year sediment core from lake Qinghai, Tibetan Plateau, China: influence of regional and local sources and transport pathways[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4176-4183.
- [8] González-Gaya B, Fernández-Pinos M C, Morales L, *et al.* High atmosphere-ocean exchange of semivolatile aromatic hydrocarbons [J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(6): 438-442.
- [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] 史彩奎, 贾益群, 王国平. 大兴安岭摩天岭雨养泥炭沼泽多环芳烃分布特征与来源分析[J]. *湿地科学*, 2007, **5**(3): 260-265.
- Shi C K, Jia Y Q, Wang G P. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon in Motianling Ombrotrophic bog in Greater Hinggan mountains[J]. *Wetland Science*, 2007, **5**(3): 260-265.
- [11] 谢婷, 张淑娟, 杨瑞强. 青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2680-2690.
- Xie T, Zhang S J, Yang R Q. Contamination levels and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in soils and grasses from lake catchments in the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2680-2690.
- [12] 赵红梅, 王健, 于晓菲, 等. 三江平原沼泽土中多环芳烃分布及火烧的影响[J]. *湿地科学*, 2010, **8**(1): 43-47.
- Zhao H M, Wang J, Yu X F, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in marsh soils from the Sanjiang Plain and fire effect on it[J]. *Wetland Science*, 2010, **8**(1): 43-47.
- [13] 师阳, 孙玉川, 梁作兵, 等. 重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1417-1424.
- Shi Y, Sun Y C, Liang Z B, *et al.* Altitudinal gradient distribution and source analysis of PAHs content of topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1417-1424.
- [14] 史彩奎, 贾益群, 王国平. 长白山雨养泥炭表层多环芳烃组成分布及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(5): 385-388.
- Shi C K, Jia Y Q, Wang G P. The composition distribution and source analysis of Changbai Mountains ombrotrophic peat surface layer of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(5): 385-388.
- [15] 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强. 藏东南色季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2745-2755.
- Luo D X, Zhang S J, Yang R Q. Distribution and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2745-2755.
- [16] Malawska M, Bojakowska I, Wilkomirski B. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in peat and plants from selected peat-bogs in the north-east of Poland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(6): 686-691.
- [17] 孙娜, 陆晨刚, 高翔, 等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 664-668.
- Sun N, Lu C G, Gao X, *et al.* Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil of East Qingzang Plateau [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(3): 664-668.
- [18] Vane C H, Rawlins B G, Kim A W, *et al.* Sedimentary transport and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from managed burning of moorland vegetation on a blanket peat, South Yorkshire, UK [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **449**: 81-94.
- [19] 柯艳萍, 祁士华, 陈静, 等. 四川绵竹-阿坝剖面土壤中多环芳烃含量和来源及其生态风险[J]. *安全与环境工程*, 2013, **20**(4): 79-83.
- Ke Y P, Qi S H, Chen J, *et al.* Contents, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in Mianzhu-A'ba soil profile, Sichuan, China [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, **20**(4): 79-83.
- [20] Dreyer A, Radke M, Turunen J, *et al.* Long-term change of polycyclic aromatic hydrocarbon deposition to peatlands of Eastern Canada [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(11): 3918-3924.
- [21] Berset J D, Kuehne P, Shotyk W. Concentrations and distribution of some polychlorinated biphenyls (PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an ombrotrophic peat bog profile of Switzerland [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **267**(1-3): 67-85.
- [22] Tremblay L, Kohl S D, Rice J A, *et al.* Effects of temperature, salinity, and dissolved humic substances on the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to estuarine particles [J].

- Marine Chemistry, 2005, **96**(1-2): 21-34.
- [23] 黄擎, 肖汝, 李发生, 等. 非在大庆黑钙土有机-矿质复合体上的吸附与解吸[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 83-86.
Huang Q, Xiao R, Li F S, *et al.* Adsorption and desorption of phenanthrene on organo-mineral aggregates isolated from chernozem in Northeast China[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, **19**(1): 83-86.
- [24] Xing X L, Zhang Y, Yang D, *et al.* Spatio-temporal variations and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric bulk deposition along a plain-mountain transect in western China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **139**: 131-138.
- [25] Thiele S, Brümmer G W. Bioformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil under oxygen deficient conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(5): 733-735.
- [26] Zhang J Q, Zhan C L, Liu H X, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), iron and black carbon within street dust from a steel industrial city, Central China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(10): 2452-2461.
- [27] 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.
- [28] 毕丽玫, 郝吉明, 宁平, 等. 昆明城区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 659-667.
Bi L Z, Hao J M, Ning P, *et al.* Characteristics and sources apportionment of PM_{2.5}-bound PAHs in Kunming[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 659-667.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajihu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)