

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价

黄应平^{1,2}, 金蕾^{1,2}, 朱灿^{1,2}, 李锐^{1,2}, 谢平^{1,2}, David Johnson^{2,3}, 刘慧刚², 席颖^{1,2*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 3. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

摘要: 为了全面评价三峡库区土壤多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 环境行为, 以香溪河库湾不同淹没类型土壤[消落带上缘 (>175 m)、消落带 (145~175 m) 和沉积物 (<145 m)] 为研究对象, 通过高效液相色谱检测方法, 分析 3 个区域土壤 16 种美国环保署优先控制的 PAHs 含量。结果表明, 香溪河库湾土壤 PAHs 总量表现为消落带上缘 > 消落带 > 沉积物, 沉积物 PAHs 以 3 环和 4 环为主, 而消落带及其上缘土壤 PAHs 以 4 环和 5 环为主, 其中消落带土壤 PAHs 变异系数相对最高, 与其它两个区域 PAHs 组成之间的相关性相对较弱。各区域土壤 PAHs 分布呈现季节差异, 夏季和冬季土壤 PAHs 含量相对较高, 主要与库区各季节居民能源消费类型有关; 空间分布特征表现为, 沉积物 PAHs 空间分布整体较为均匀, 而消落带及其上缘土壤 PAHs 在峡口镇和长江入江口处 PAHs 含量相对较高, 主要与空间水平上各样点频繁的人类活动有关。PAHs 异构体比值法分析表明, 香溪河库湾各区域土壤 PAHs 来源具有季节性差异, 化石燃料和生物质的不完全燃烧是消落带土壤 PAHs 的主要来源; 终身致癌风险评价模型分析表明, 土壤 PAHs 通过误食和皮肤接触暴露途径对人体健康产生潜在致癌风险, 并且消落带上缘土壤 PAHs 致癌风险相对较大。研究结果扩展了对香溪河库湾土壤 PAHs 环境行为的认识, 为三峡库区香溪河库湾土壤 PAHs 污染防治提供有益参考。

关键词: 香溪河库湾; 多环芳烃; 土壤; 时空分布; 来源; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3808-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012149

Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area

HUANG Ying-ping^{1,2}, JIN Lei^{1,2}, ZHU Can^{1,2}, LI Kun^{1,2}, XIE Ping^{1,2}, David Johnson^{2,3}, LIU Hui-gang², XI Ying^{1,2*}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The US Environmental Protection Agency has listed 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for priority control. Soil samples from Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir Area (the water fluctuation zone, WLFZ; upper edge of water fluctuation zone, UEWLFZ; sediments) were analyzed for the concentration of these PAHs, using high performance liquid chromatography (HPLC). The results showed that the soil samples of Xiangxi Bay could be ranked, based on the concentration of PAHs, in the following order: UEWLFZ > WLFZ > sediment. The composition of PAHs varied from the three regions, with 3- and 4-ring PAHs dominating in sediments and 4- and 5-ring PAHs dominating in soil from the WLFZ and UEWLFZ. The composition of PAHs in soil from the WLFZ exhibited a higher coefficient of variation and a weaker correlation with the composition of PAHs in soil from the UEWLFZ and sediment. Soil from the three regions showed varying seasonal distributions of PAHs, which is closely related to the quantity and types of energy consumption in each season. PAHs in sediment from sites at the same altitude showed no evident differences, whereas WLFZ and UEWLFZ soil had higher levels of PAHs at the sites near Xiakou Town and the Yangtze River Estuary. Isomer ratio analysis showed that the sources of PAHs in Xiangxi Bay vary between seasons and regions, with incomplete combustion of fossil fuels and biomass forming the main sources in the soil of Xiangxi Bay. The lifetime carcinogenic risk assessment shows that PAHs in sediment, WLFZ, and UEWLFZ have a potential risk to human through ingestion and dermal contact, with PAHs in the soil of UEWLFZ posing the highest carcinogenic risk. The results provide a theoretical reference for the prevention and control of contamination by PAHs in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir area.

Key words: Xiangxi Bay; polycyclic aromatic hydrocarbons; soil; temporal-spatial distribution; source; risk assessment

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-01-24

基金项目: 同济长江水环境教育部重点实验室开放基金项目(YRWEF202002); 湖北省引智项目(2019BJH004); 111 引智项目(D20015)

作者简介: 黄应平(1964~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境化学, E-mail: chem_ctgu@126.com

* 通信作者, E-mail: hellowx-y@163.com

三峡库区土壤作为水陆生态系统污染物最重要的“汇”,受到广泛的关注^[1].受库区周期性水位调度的影响,香溪河库湾形成了3种不同类型的土壤,即长期处于淹没状态的沉积物、处于周期性淹没-落干的消落带土壤以及长期处于落干状态的消落带上缘土壤^[2].自三峡库区蓄水以来,江面变宽,航运日益发达;库区移民沿河安置,受到航运以及人类活动的频繁影响,三峡库区多地发现不同程度的多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)污染^[3,4].PAHs是一类持久性有机污染物,具有强致畸致癌致突变的效应,较强的疏水性使得其更容易吸附到土壤颗粒上^[5];消落带上缘土壤汇集库岸人类活动释放的大量PAHs,通过干湿沉降的方式迁移到消落带土壤中,而消落带土壤于淹没期在水位消涨的扰动下,可能会向水体释放PAHs;沉积物汇集部分来自消落带及其上缘的土壤颗粒以及水体颗粒物中裹挟的PAHs,在周期性水位消涨扰动下,存在二次释放的风险.3个区域彼此独立却相互联系,在库区周期性水位消涨的作用下,土壤中的PAHs的迁移转化行为更为复杂,其在土壤中的迁移途径将直接影响水体PAHs的浓度,对库区水质安全和人类健康构成潜在的风险.因此,研究库区3种不同淹没类型土壤PAHs环境污染特征对库区生态健康及环境安全具有重要意义.

前期的研究主要集中于库区某一种类型土壤PAHs的迁移转化行为^[6,7],缺乏对库区不同淹水类型土壤的系统研究.土壤在不同淹水时间作用下,土壤微生物群落结构和种类存在显著差异^[8];土壤碳、氮和磷等营养元素也存在不同程度的释放^[9],土壤pH在淹水过程中也趋于中性^[10],而土壤物理化学特

性的改变,使得附着在土壤中的污染物的形态发生改变,从而改变了其在库区土壤中的迁移行^[11,12].三峡库区3个不同区域的土壤PAHs由于长期处于不同的淹没状态,存在3种不同赋存状态的PAHs,因此,系统研究库区3个不同淹没状态的土壤,对比不同淹没区域土壤PAHs环境特征的差异,对全面认识库区土壤PAHs环境行为有重要意义.

因此,本文以三峡库区典型一级支流香溪河为研究对象,研究香溪河库湾消落带上缘土壤(海拔185 m)、消落带土壤(海拔145~175 m)和沉积物(海拔145 m以下)PAHs的时空分布特征,分析各区域PAHs组成之间的联系,采用比值法分析各区域PAHs季节性来源的差异,并对各区域土壤PAHs不同暴露途径下的健康风险进行评价.通过系统研究香溪河不同淹没类型土壤PAHs环境行为,提升对库区土壤PAHs污染特征的认识,以期为三峡库区土壤PAHs的污染防治提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

香溪河位于湖北省西部的宜昌市兴山县,地处东经110°25′~111°05′和北纬30°38′~31°34′之间,全长94 km,流域总面积达3 183 km²,是距三峡大坝坝首最近的一条一级支流.香溪河流域内环境变化特征在三峡库区具有一定的代表性,对该区域进行研究有助于了解整个三峡库区的环境变化.

1.2 样品采集与处理

以香溪河库湾回水区为研究对象,分别设置5个沉积物采样点和7个消落带及消落带上缘土壤采样带,样点分布见图1,沉积物和消落带各样带具体

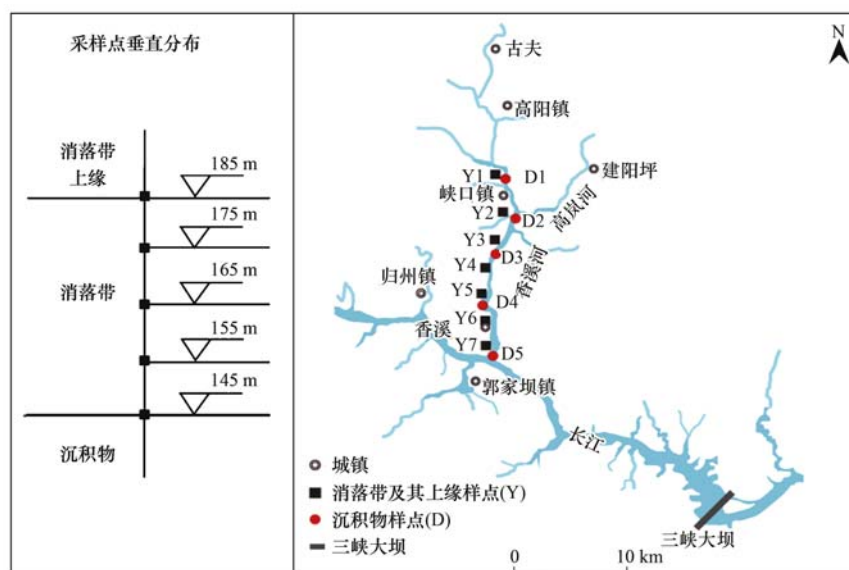


图1 香溪河库湾各区域样点布设

Fig. 1 Sample sites of soil in Xingxi Bay

位置及监测断面情况如图 1 所示. 分别于 2018 年 6 月(夏季)、2018 年 9 月(秋季)、2018 年 12 月(冬季)和 2019 年 3 月(春季)对沉积物、消落带及其上缘土壤 PAHs 进行监测分析.

消落带上缘土壤取自海拔 185 m 处,消落带土壤分别取自海拔 145、155、165 和 175 m 处,沉积物样品取自海拔 145 m 以下的淹没区;在消落带及其上缘各样点随机设置 3 个 5 m×5 m 样方,采用蛇形法采集土样,将各点所取土样混合均匀.在沉积物区域采集各样点 0~18 cm 的土壤样品,每隔 3 cm 分层,将每个断面的 3 个沉积物子样均匀地混合.收集的土壤样品在除去大块的杂物后,进行冷冻干燥,干燥后的土壤研磨并过 100 目筛,将处理完毕的土壤收集于密封袋中,于 -20℃ 下进行避光保存.

1.3 样品测试

称取 5.0 g(干重)处理好的土壤样品置于 50 mL 玻璃离心管中,加入 50 μL 十氟联苯使用液作为回收率指示物,加入适量无水硫酸钠(400℃ 条件下活化 5 h)和 10 mL 二氯甲烷(分析纯, 99.5%),进行超声萃取 20 min,离心并收集上清液于棕色 100 mL 圆底烧瓶中.重复上述过程两遍,合并所得上清液.将上清液通过旋转蒸发仪(RE-2000A 2L,河南)旋转蒸发至近干,加入 5 mL 正己烷置换溶剂,再次旋蒸浓缩至 1 mL.用固相萃取仪(LC-CQ-12Y,上海)搭配硅胶固相萃取小柱进行净化浓缩液,用 10 mL 体积比为 1:1 的二氯甲烷和正己烷进行洗脱,用 K-D 浓缩管接收洗脱液.将洗脱液浓缩至近干,再加入乙腈(分析纯,纯度 99.5%),并定容至 1 mL.使用 Waters e-2695 高效液相色谱(Waters 公司,美国)配紫外和荧光检测器对美国环保署优先控制的 16 种 PAHs 单体(表 1)进行检测分析.土壤样品 PAHs 加标回收率的范围是 78.1%~96.7%($n=7$),空白加标回收率是 81.4%~108.2%($n=7$),十氟联苯的回收率 71.1%~103.3%($n=7$),以 5.0 g 土壤样品计算的方法检出下限范围为 0.2~3.4 ng·g⁻¹.

1.4 数据处理

1.4.1 空间变异特征分析

变异系数(coefficient of variation, CV)可以用来表征 PAHs 在土壤的空间变异特征^[13].当 $CV \leq 0.1$,表明 PAHs 为弱变异;当 $0.1 < CV < 1$,表明 PAHs 为中等变异;当 $CV \geq 1$ 时,表明 PAHs 为强变异.

1.4.2 同分异构体比值法

同分异构体比值法是一种评估 PAHs 来源的经典方法,被广泛应用于环境 PAHs 的来源分析^[14],

PAHs 同分异构体在环境中具有相似的物理和化学性质,并且在环境中的分配行为也相似,因此同一来源的 PAHs 同分异构体比值从排放源到环境介质中也能保持一致.应用得较多的有 Ant/(Ant + Phe)、Fla/(Fla + Pyr)和 BaA/(BaA + Chry)等比值.其中 Ant/(Ant + Phe)比值可以用来区分石油源和燃烧源,Fla/(Fla + Pyr)比值可以判别石油源、燃烧源和生物质燃烧源,BaA/(BaA + Chry)的比值可以区别成石油源、石油燃烧源和生物质燃烧源^[15],具体的判别标准如表 2 所示.

表 1 美国环保署优先控制的 16 种 PAHs 单体

Table 1 Priority control of 16 PAHs monomer by EPA

序号	英文全称	中文全称	英文简称
1	Naphthalene	萘	Nap
2	Acenaphthylene	苊烯	Acy
3	Acenaphthene	二氢苊	Ace
4	Fluorene	苊	Flu
5	Phenanthrene	菲	Phe
6	Anthracene	蒽	Ant
7	Fluoranthene	荧蒽	Fla
8	Pyrene	芘	Pyr
9	Benzo(a)anthracene	苯并[a]蒽	BaA
10	Chrysene	苊	Chry
11	Benzo(b)fluoranthene	苯并[b]荧蒽	BbF
12	Benzo(k)fluoranthene	苯并[k]荧蒽	BkF
13	Benzo(a)pyrene	苯并[a]芘	BaP
14	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	茚并[1,2,3-cd]芘	InP
15	Dibenzo(a,h)anthracene	二苯并[a,h]蒽	DahA
16	Benzo(ghi)perylene	苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]蒽)	BghiP

表 2 PAHs 同分异构体比值法

Table 2 Method of PAHs isomer ratio

来源	Ant/(Ant + Phe)	Fla/(Fla + Pyr)	BaA/(BaA + Chry)
石油源	<0.10	<0.40	<0.20
燃烧源	>0.10		
石油燃烧源		0.40~0.50	0.20~0.35
生物质燃烧源		>0.50	>0.35

1.4.3 土壤 PAHs 健康风险评价

本文通过 EPA 推荐的终身致癌风险评价模型(ILCR)来评估香溪河库湾土壤中的 PAHs 的健康风险.ILCR 模型常用于评估不同年龄段人群(成人和儿童),在不同土壤 PAHs 暴露途径(误食、接触和呼吸)下的健康风险^[16,17].3 种暴露途径根据公式(1)~(3)计算,当 ILCR 值小于 10⁻⁶时,认为健康无风险;当 ILCR 值介于 10⁻⁶~10⁻⁴之间,认为存在潜在风险;当 ILCR 值大于 10⁻⁴,说明存在高风险.

$$ILCR_{\text{误食}} = \frac{CS \times (CSF_{\text{误食}} \times \sqrt[3]{BW/70})}{BW \times AT \times 10^6} \times IR_{\text{误食}} \times EF \times ED \quad (1)$$

$$ILCR_{接触} = \frac{CS \times (CSF_{接触} \times \sqrt[3]{BW/70})}{BW \times AT \times 10^6} \times$$
$$SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \quad (2)$$
$$ILCR_{呼吸} = \frac{CS \times (CSF_{呼吸} \times \sqrt[3]{BW/70})}{BW \times AT \times PEF} \times$$
$$IR_{呼吸} \times EF \times ED \quad (3)$$

式中, CS 为 7 种致癌 PAHs 单体的 BaP 毒性当量值,其它的参数参考文献[16].

1.4.4 分析方法

利用 SPSS 17.0 对各项土壤 PAHs 组成及其与土壤理化性质相关性进行统计分析,用 Origin 8.0 绘制图形.

2 结果与讨论

2.1 香溪河库湾土壤 PAHs 空间变异特征及区域相关性

三峡库区香溪河库湾 3 个不同区域 PAHs 总量如表 3 所示,沉积物 PAHs 单体主要以 3 环和 4 环为主,16 种 PAHs 总量为 $(364.2 \pm 24.3) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 0.3,为中等程度的空间变异;消落带土壤 PAHs 单体主要以 3~5 环为主,16 种 PAHs 总量为 $(842.3 \pm 94.9) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 0.6,在空间分

布上属于中等变异,相对于沉积物 PAHs 总量变异系数更大,说明消落带土壤环境相对于沉积物受环境扰动相对更大,使其分布更为不均匀;消落带上缘土壤 PAHs 单体主要也以 3~5 环为主,16 种 PAHs 总量为 $(992.7 \pm 113.8) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 0.3,也属于中等强度的变异,相对于长期受水位消涨影响的消落带区域较低,说明消落带水位消涨对土壤 PAHs 分布的干扰相对于消落带上缘库岸人为活动的干扰更强,消落带土壤 PAHs 在水位消涨下的环境行为值得更为深入地研究.

对 3 个区域香溪河库湾土壤在春季、夏季和秋季 3 个季节相近样点的 PAHs 进行 Pearson 相关性分析(表 4),分析结果显示,沉积物、消落带及消落带上缘土壤 PAHs 组成之间存在一定的相关性,沉积物 3 环和 5 环 PAHs 单体与消落带上缘 3 环和 4 环 PAHs 单体之间存在显著正相关性 ($P < 0.05$),说明沉积物与消落带上缘土壤中高环 PAHs 具有同源性^[18],消落带上缘土壤 PAHs 可能通过大气的干湿沉降途径向沉积物迁移^[19];与消落带土壤 PAHs 组成之间无显著相关性,指示消落带土壤在水位消涨扰动下土壤 PAHs 来源较为复杂;而消落带土壤 3 环、4 环 PAHs 与消落带上缘 2 环 PAHs 之间存在

表 3 香溪河库湾各区域土壤 PAHs 总量比较¹⁾/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 3 Comparison of the PAHs in soil from each area of Xiangxi Bay/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

多环芳烃	沉积物			消落带			消落带上缘		
	Mean	SE	CV	Mean	SE	CV	Mean	SE	CV
Nap	33.7	4.2	0.6	65.2	8.7	1.4	93.7	12.0	0.7
Acy	8.8	1.0	0.5	23.3	1.9	0.9	23.4	2.4	0.6
Ace	45.5	5.2	0.5	22.0	10.6	5.1	5.5	0.6	0.6
Flu	4.5	2.0	2.1	1.9	1.2	7.0	4.1	0.7	0.9
Phe	34.8	4.2	0.6	59.2	6.8	1.2	80.8	9.8	0.7
Ant	29.1	2.4	0.4	69.6	5.1	0.8	83.2	6.3	0.4
Fla	36.8	3.2	0.4	110.3	11.5	1.1	137.7	20.3	0.8
Pyr	58.5	6.7	0.5	117.2	7.4	0.7	176.2	15.6	0.5
Chry	8.0	1.4	0.8	13.3	2.0	1.6	14.3	2.5	1.0
BaA	17.1	1.3	0.4	62.3	5.8	1.0	61.2	4.4	0.4
BbF	15.0	1.5	0.5	56.7	6.9	1.3	65.3	8.4	0.7
BkF	18.6	2.3	0.6	87.7	9.4	1.2	81.3	10.7	0.7
BaP	12.1	3.8	1.5	30.5	3.7	1.3	30.3	4.4	0.8
DahA	9.4	1.0	0.5	21.0	1.4	0.7	26.0	2.5	0.5
BghiP	4.0	0.9	1.1	7.1	2.6	4.0	4.5	1.3	1.5
InP	28.3	2.0	0.3	95.1	10.0	1.1	105.2	12.2	0.6
∑ 2 环	33.7	4.2	0.6	65.6	8.7	1.4	93.7	12.0	0.7
∑ 3 环	122.7	14.8	4.0	176.6	25.6	14.7	197.2	19.8	3.1
∑ 4 环	120.4	12.7	2.1	303.8	26.7	4.3	389.4	42.8	2.6
∑ 5 环	55.1	8.6	2.9	195.5	21.3	4.4	202.8	25.9	2.7
∑ 6 环	32.3	2.9	1.4	102.1	12.7	5.1	109.7	13.5	2.1
∑ PAHs	364.2	24.3	0.3	842.3	94.9	0.6	992.7	113.8	0.3

1) Mean 表示均值; SE 表示标准误; CV 表示变异系数

表 4 香溪河库湾各区域土壤 PAHs 组成的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient of PAHs composition in different soils of Xiangxi Bay

	C-2 环	C-3 环	C-4 环	C-5 环	C-6 环	X-2 环	X-3 环	X-4 环	X-5 环	X-6 环	S-2 环	S-3 环	S-4 环	S-5 环	S-6 环
C-2 环	1.0														
C-3 环	0.8**	1.0													
C-4 环	0.5	0.5	1.0												
C-5 环	0.1	0.5	0.5*	1.0											
C-6 环	0.6*	0.7**	0.6*	0.7**	1.0										
X-2 环	-0.4	-0.5	0.1	0.1	0.1	1.0									
X-3 环	-0.3	-0.2	0.2	0.3	0.4	0.9**	1.0								
X-4 环	-0.2	-0.0	0.2	0.4	0.4	0.6**	0.9**	1.0							
X-5 环	-0.2	-0.1	0.1	0.3	0.2	0.7**	0.8**	0.7**	1.0						
X-6 环	-0.2	-0.0	0.2	0.3	0.3	0.7**	0.9**	0.8**	0.9**	1.0					
S-2 环	-0.2	-0.2	-0.2	-0.0	0.1	0.3	0.5*	0.6*	0.3	0.3	1.0				
S-3 环	-0.1	0.3	0.2	0.6*	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	-0.2	1.0			
S-4 环	0.4	0.6*	0.2	0.2	0.4	-0.2	0.1	-0.2	0.3	0.2	-0.5	0.6*	1.0		
S-5 环	0.3	0.5	0.1	0.3	0.3	-0.1	-0.0	-0.1	0.4	0.3	-0.5	0.6*	0.9**	1.0	
S-6 环	0.3	0.6*	0.1	0.4	0.4	-0.3	-0.0	-0.1	0.3	0.3	-0.3	0.5*	0.9**	0.9**	1.0

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$; C 表示沉积物, X 表示消落带, S 表示消落带上缘

显著正相关性 ($P < 0.05$), 说明两个区域中低环 PAHs 同源, 指示存在消落带上缘土壤 PAHs 有向消落带土壤迁移的途径. 香溪河库湾 3 个区域土壤中, 消落带土壤 PAHs 与其它区域相关性相对较弱, 主要是由于水位消涨活动改变了 PAHs 的自上而下的垂直迁移行为, 使其与相邻区域土壤 PAHs 的相关性减弱.

2.2 香溪河库湾土壤 PAHs 时空分布特征

2.2.1 香溪河库湾沉积物 PAHs 时空分布特征

沉积物 PAHs 在时间和水平空间都存在一定的差异(图 2). 水平空间上 PAHs 总量分布较为均匀, 主要由于香溪河库湾干流倒灌异重流改变了水体水动力变化趋势^[20], 使得各水平样带 PAHs 分布差异不大, D3 样带 PAHs 总量相对较高, 主要由于 D3 样

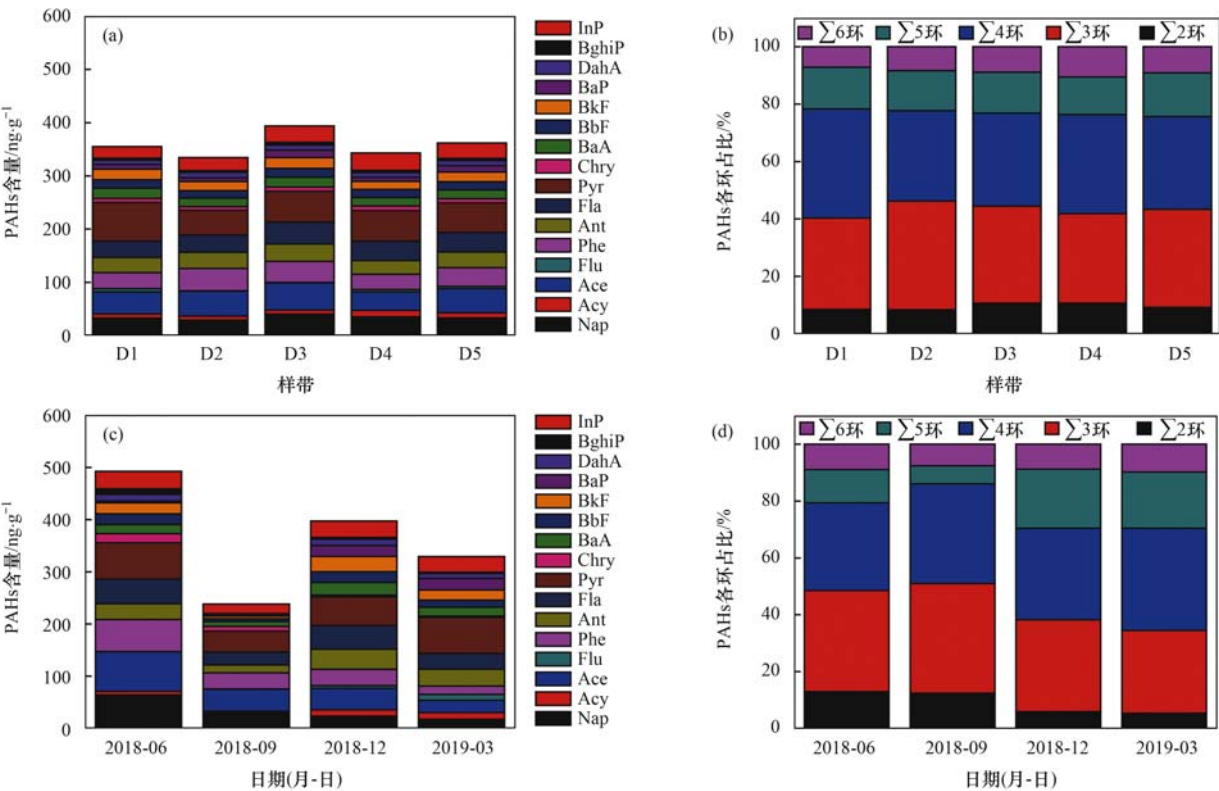


图 2 沉积物 PAHs 时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of PAHs in sediments

带存在磷矿排污口,并接壤密集居民区;水平各样点 PAHs 主要以 3 环和 4 环 PAHs 为主.时间水平上 PAHs 总量顺序表现为夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季.夏季雨量充沛,来自大气和上缘土壤的 PAHs 通过干湿沉降,最终在沉积物上积累.冬季气温较低,大量木柴、煤炭等生物质和石油类化石燃料,导致沉积物中 PAHs 含量上升.随着时间的推移,沉积物 2 环和 3 环 PAHs 比例降低,4 环和 6 环比例升高,主要由于低环 PAHs 单体如萘、苊等在环境中容易被生物降解^[21],但高分子量 PAHs 的生物利用度较低,难以通过生物利用形式进行转化分解,表现为持久性累积的过程^[22].

2.2.2 消落带土壤 PAHs 时空分布特征

消落带土壤 PAHs 由于周期性水位消涨的作用,时空分布特征也存在显著差异(图 3).水平方向消落带土壤 PAHs 表现为靠近峡口镇的 Y1 样带和 Y6 样带的消落带 PAHs 较高,说明附近区域人类活

动是 PAHs 的主要来源,峡口镇人口密集,工农业发达,PAHs 排放密度高,而 Y6 样带处有小型渡口和公路主干,PAHs 含量受到船舶、汽车等燃油排放的影响较大;水平样带 PAHs 组成比例具有明显差异,指示香溪河消落带各样带 PAHs 污染来源差异较大^[23].时间水平上,由于冬季消落带土壤处于完全淹没状态,不能进行采样监测,因此,消落带 PAHs 在其它 3 个季节的变化主要表现为夏季 > 春季 > 秋季.季节性 PAHs 分布的差异主要与各季节降雨温度以及季节性的生活生产活动有关^[24,25],香溪河夏季降水量丰沛,是造成夏季消落带 PAHs 含量偏高的原因,PAHs 的组成比例沿时间变化趋势与沉积物相似,表现为 2 环和 3 环 PAHs 比例小幅度地降低,而 4~6 环 PAHs 的比例则逐渐增加.但是 PAHs 组成比例变化的幅度较沉积物小,主要是由于消落带土壤受到人为干扰的扰动较大^[26],使得各季节 PAHs 分布的差异性较大,自然降解和累积的过程不明显.

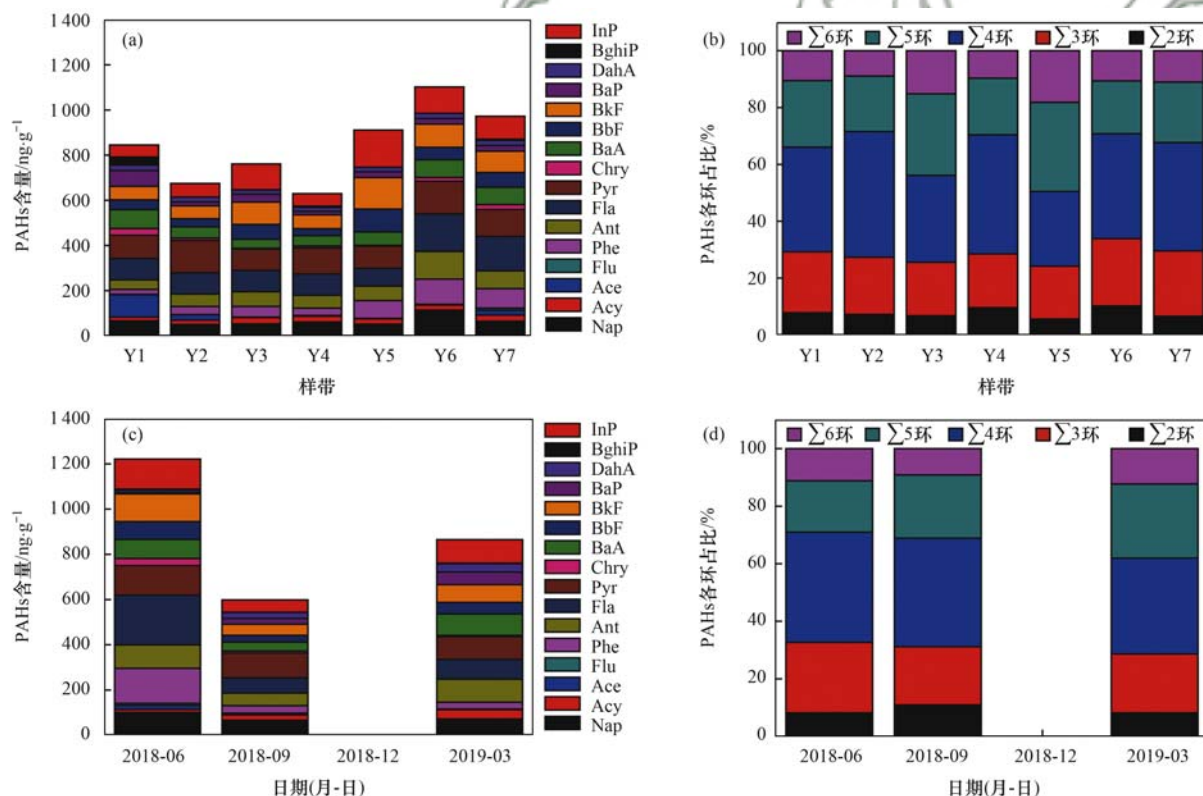


图 3 消落带土壤 PAHs 时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of PAHs in soils from WLFZ

2.2.3 消落带上缘 PAHs 时空分布特征

消落带上缘土壤 PAHs 的分布特征如图 4 所示.水平方向消落带上缘土壤 PAHs 空间分布没有明显规律,在工矿企业、码头和居民区分布密集的区域 PAHs 的总量相对较高,说明消落带上缘 PAHs 主要来自源于人类活动. Y2 样带以及靠近入江口的样带 3 个样带 PAHs 的含量相对较高,主要是因为 Y2 样带上缘有大型采石场,有大量运石车辆聚集活动,

车辆尾气排放会产生集中 PAHs 排放.除此之外,靠近入江口,正在修建香溪河大桥,河面架桥的船只以及河面运输材料的车辆都增加了该样带附近 PAHs 的排放.消落带上缘土壤 PAHs 组成主要以 3~6 环 PAHs 为主,各样带 PAHs 各环比例不同,指示消落带上缘 PAHs 由于居住区以及工业区分布的差异,在水平方向上 PAHs 来源组成有较大的差异.消落带上缘土壤 PAHs 随着四季时间的变化,PAHs 总量

在冬季最高,其次为夏季,春秋两季含量相对较低.冬季燃烧取暖导致 PAHs 释放量增加.此外,低温会抑制微生物的降解速率和 PAHs 的挥发速度^[27],从而导致土壤中的 PAHs 含量高.夏季则因气温升高,大气分子运动加剧,大气循环速率增大,促进了 PAHs 的扩散与传输^[28],造成夏季 PAHs 含量较高.

而土壤 PAHs 组成随时间变化规律与沉积物和消落带土壤不同,低环 PAHs 的比例升高,中环 PAHs 比例降低.主要是由于消落带上缘 PAHs 来源更为复杂,人为干扰对 PAHs 的迁移转化更大,PAHs 的组成比例在更多外来 PAHs 源的干扰下呈现不同的变化趋势.

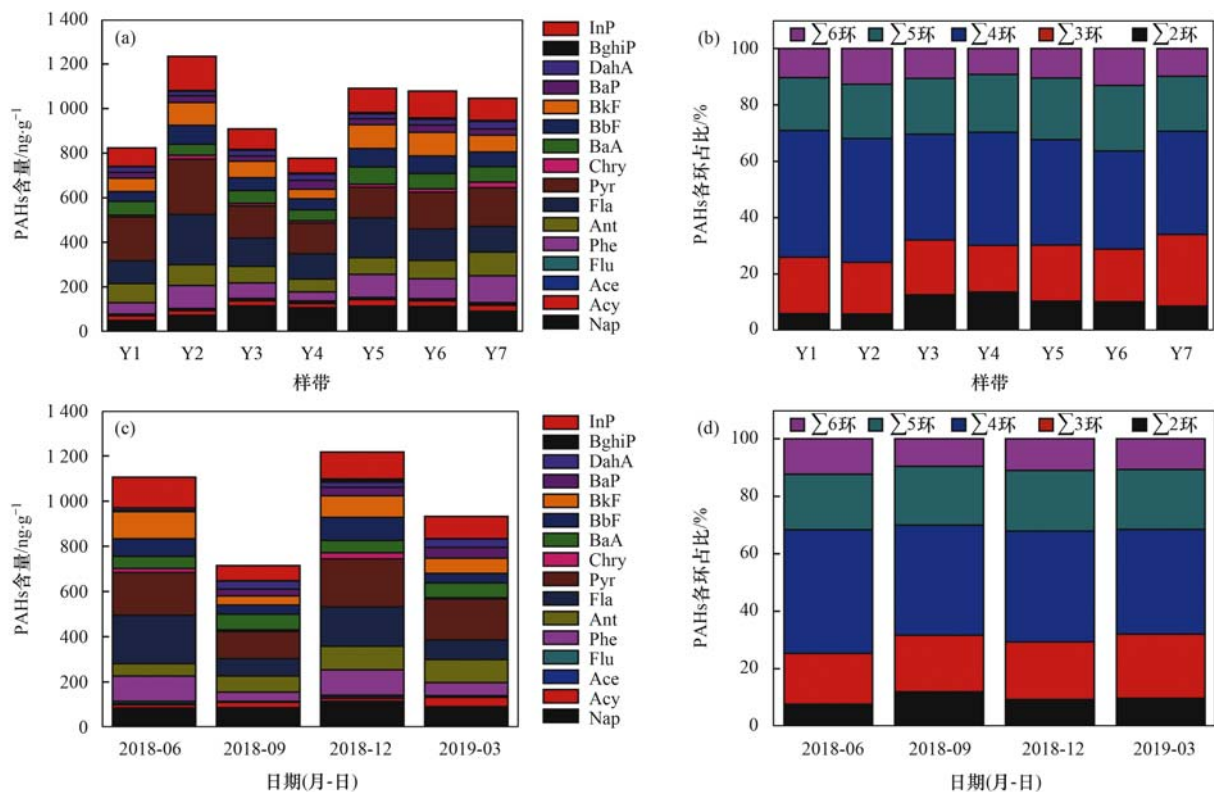


图4 消落带上缘土壤 PAHs 时空分布

Fig. 4 Temporal-spatial distribution of PAHs in soil from UEWLFZ

综上,三峡库区香溪河库湾3个区域土壤 PAHs 总量变化顺序为:消落带上缘土壤($367.1 \sim 2\,232.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值 $992.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 消落带($120.4 \sim 2\,909.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值 $842.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 沉积物($229.7 \sim 569.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值 $364.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$).本研究结果与其它研究结果有一定的差异,刘世亮^[29]的研究认为,PAHs 因疏水性,辛醇水分配系数高,而易于从水生态系统向沉积层迁移,沉积物扮演“汇”的角色.而在三峡库区周期性水位消涨作用下,PAHs 的迁移行为发生改变.在水位消涨扰动下,沉积物 PAHs 的释放大于沉降,使得 PAHs 通过悬浮颗粒水位回落时在消落带土壤富集,而消落带由于衔接库岸,接收来自库岸以干湿沉降汇集的 PAHs,并在其表面的植物截留作用下,在消落带土壤中积聚.与三峡库区其它区域土壤 $\sum$ PAHs 进行对比发现,香溪河库湾沉积物 $\sum$ PAHs 的含量小于三峡库区干支流 $\sum$ PAHs $267.9 \sim 1\,018.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$

(均值为 $490.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[30]和三峡库区重庆段沉积物中 $\sum$ PAHs $68.6 \sim 4\,226.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值为 $685.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[31];说明三峡库区香溪河库湾沉积物 PAHs 相对于三峡库区干流和其它靠近工业发达城市的区域土壤 PAHs 含量较低.而三峡库区干流消落带及其上缘土壤 $\sum$ PAHs 含量大于三峡库区干流 PAHs $54.0 \sim 463.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值为 $133.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[6].消落带上缘由于频繁的人类活动,PAHs 排放源密集,不同区域由于库岸工业企业及居民分布的不同,其 PAHs 排放量存在差异.消落带上缘 PAHs 的排放密度直接影响消落带土壤 PAHs 的浓度.研究时间段内,正在修建香溪河大桥,施工过程中人类活动及车辆运输中燃料的不完全燃烧增加了 PAHs 的排放,使得香溪河库湾消落带及其上缘土壤 PAHs 含量监测浓度相对较高.

2.3 PAHs 来源解析

香溪河库湾沉积物、消落带及上缘土壤 PAHs $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$, $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{BaA}/(\text{BaA} +$

Chry)的比值如图5所示.各区域季节性PAHs同分异构体比值具有明显差异,指示不同季节不同区域土壤PAHs来源的不同.4个季节的各区域土壤PAHs的 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值均大于0.1, $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 比值均大于0.35,表明热解来源(石油燃烧和生物质燃烧)是沉积物、消落带及上缘PAHs的重要来源.而4个季节各区域土壤 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的比值分布有显著差异,具体表现为,夏季,沉积物有60%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的比值小于0.4,指示沉积物中石油源PAHs占多数,香溪河磷矿运输货运轮船的燃油泄漏是沉积物PAHs石油源的主要来源;消落带有71.2%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值在0.4~0.5之间,指示石油燃烧源是消落带土壤PAHs主要来源,消落带土壤石油燃烧主要来自库岸车辆废气和河面轮船燃油废气的排放;消落带上缘则有42.8%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的比值大于0.5,表明消落带上缘PAHs主要来源于生物质燃烧,香溪河居民沿河而居,密集的居民区生活取暖的能源主要来自于生物质燃烧,生物质能在世界能源消费总量中约占15%,仅次于煤炭、石油和天然气,是我国农村主要能源之一^[32].秋季,沉积物有60%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值大于0.5,40%的样带比值小于0.4,指示沉积物PAHs以生物质燃烧为主,石油源为辅,主要是秋季库区雨水增多,并且秋收季节及温度的降低使得人类生产生活对生物质燃烧需求增加,库岸生物质燃烧产生的PAHs通过降雨沉降至沉积物;消落带土壤有85.7%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值小于0.4,指示秋季消落带土壤PAHs以石油泄露源为主,因为秋季水位开始上涨至165 m,船舶航行中的原油泄漏会吸附到消落带土壤中;而消落带上缘土壤有57%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值在0.4~0.5,43%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值小于0.4,指示消落带上缘土壤PAHs以石油燃烧源为主,以石油源为辅,交通源的比例增大,主要是由于秋季库区典型农作物柑橘的交通运输活动增加.冬季,消落带被完全淹没,不做分析;沉积物 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值有75%在0.4~0.5,指示沉积物PAHs以石油燃烧源为主,与冬季库区水位达到最高,通航能力最大有关;消落带上缘土壤各有43%的样带 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值大于0.5,指示生物质燃烧源是消落带上缘PAHs主要来源,这与库区冬季气温低,生物质取暖需求增加有关.春季,沉积物PAHs的 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值绝大部分在0.4以下,沉积物、消落带及上缘均以石油泄漏源为土壤中PAHs的重要来源,主要是由于春季航运

复苏,农事以及工业活动繁忙,交通源增多导致原油泄漏源所占比例升高,成为库区3个区域土壤PAHs的主要来源.

综合以上,香溪河库湾不同淹没区域土壤PAHs主要来源为生物质和化石燃料的不完全燃烧,其次是石油泄漏.3种淹没类型土壤PAHs季节性来源有明显差异,主要与各季节农业生产活动类型、能源使用种类以及水面航运能力与航运状态有关系^[33],秋季由于库区柑橘丰收,柑橘水陆运输使得各季节石油源来源增加,冬季生物质燃烧源地位凸显,是由于冬季取暖对生物质燃烧的需求增加,而春季水位上升,航运复苏,使得石油源比例更多.消落带各区域土壤由于所处地理地形位置不同,人类活动的类型和影响方式不同,土壤PAHs来源存在一定的差异.沉积物受航运过程影响,PAHs主要来自石油泄漏及燃烧;消落带上缘土壤受库岸人类活动影响较大,PAHs主要来自生物质及石油燃烧;而消落带则随着水位消涨状态的不同,土壤PAHs来源也不同,在水位较低时,受库岸人类活动影响较大,PAHs主要来源于生物质及石油燃烧,在水位较高时主要来源于石油源.因此,在对香溪河库湾土壤PAHs进行污染防控时,应重点控制库岸带各种燃烧源,并对原油释放源和交通排放源进行持续监测关注.

2.4 香溪河库湾土壤PAHs健康风险评价

终身致癌风险模型(ILCR)广泛应用于评价土壤PAHs通过不同暴露途径对各类人群产生的致癌风险^[34].香溪河库湾4个季度不同区域土壤PAHs的ILCR值如表5所示.消落带3个区域PAHs通过3种暴露途径对儿童和成人产生的致癌风险存在显著差异,致癌风险整体表现为:消落带上缘>消落带>沉积物,消落带及其上缘土壤PAHs的ILCR值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,存在潜在致癌风险;沉积物PAHs的ILCR值小于 10^{-6} ,致癌风险可忽略不计.区域PAHs致癌风险的差异主要与各区域人类活动的频率有关系,消落带上缘聚集较多的人群,PAHs暴露产生的致癌风险相对较大.各区域通过3种暴露途径产生致癌风险存在季节性差异,夏季和冬季PAHs通过不同暴露途径产生的致癌风险相对较高,特别是在误食和皮肤接触暴露途径下,除了沉积物部分季节PAHs的ILCR值均小于 10^{-6} ,致癌风险可忽略外,消落带及其上缘土壤PAHs的ILCR值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,存在潜在致癌风险,主要与季节性暴露途径发生的概率以及生活方式有关,夏季气温高,皮肤经常裸露在外面,而冬季空气扬尘较大,均增加了土壤误食和皮肤接触的致癌风险.呼吸暴露和皮肤接触

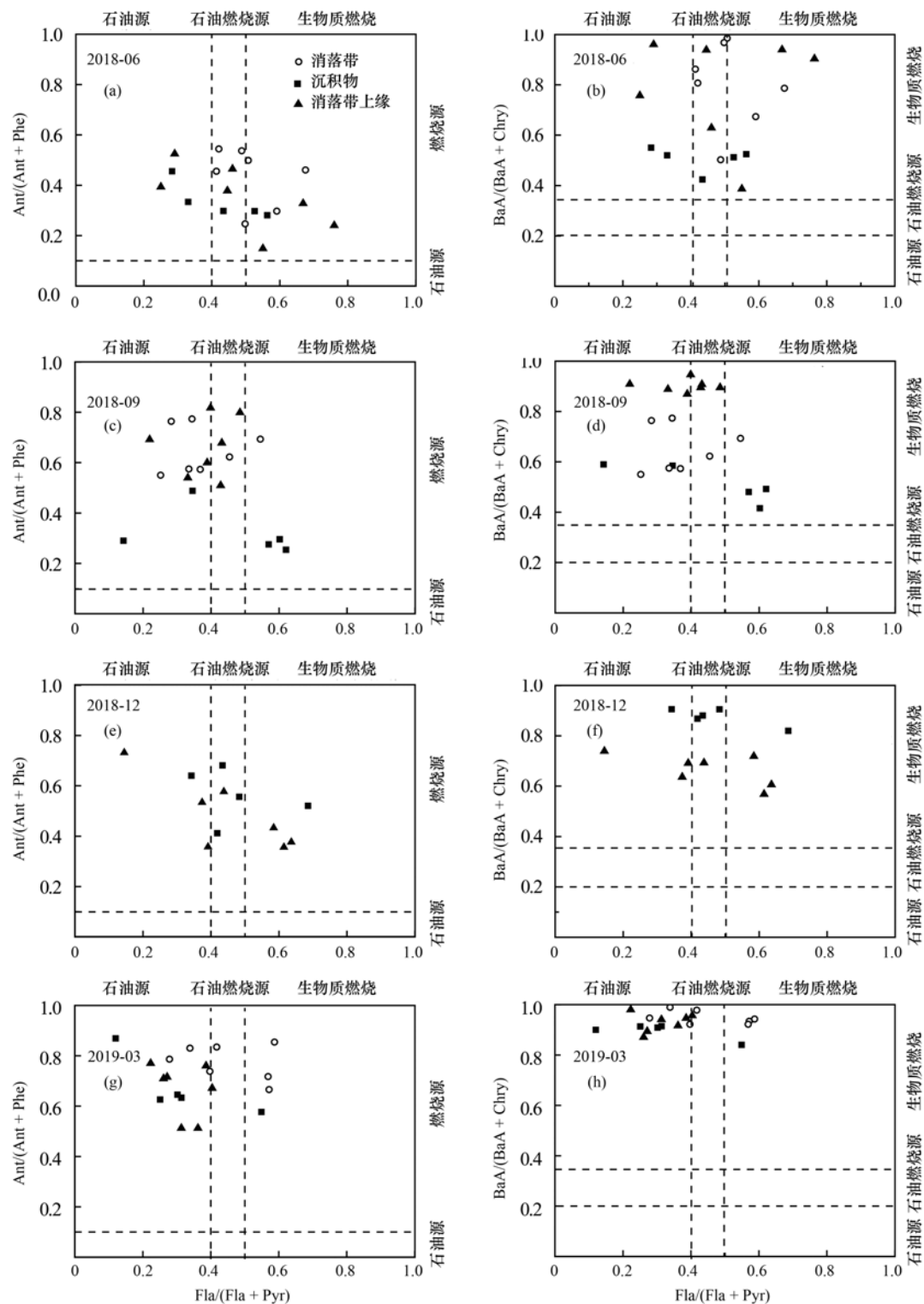


图 5 不同季节各区域土壤 PAHs 同分异构体比值

Fig. 5 Isomer ratios of PAHs in soils during different seasons

暴露两种途径下成人暴露剂量均高于儿童,风险更大,这与成人主要参与生产活动,接触土壤 PAHs 的概率较高有关. 3 种暴露途径对人体致癌风险也存在差异,表现为:皮肤接触 > 土壤误食 > 呼吸暴露,这与人类生产生活方式有关系,香溪河以农业为主,也存在大型露天磷矿,通过农业生产过程中的土壤

皮肤接触概率较大,并且露天磷矿土壤以扬尘形式通过误食途径也会接触到土壤 PAHs. 因此,在进行库区 PAHs 污染防治时,需结合 PAHs 时空分布特征,特别加强风险较高的消落带上缘 PAHs 来源监控管理,优化能源消费结构,降低 PAHs 对人体健康的风险.

表 5 香溪河库湾 PAHs 的 ILCR 值 $\times 10^{-6}$
Table 5 Value of ILCR for the PAHs in Xiangxi Bay $\times 10^{-6}$

区域	季节	误食		呼吸		皮肤接触	
		儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
沉积物	夏季	1.21	0.99	0.03	0.10	1.51	1.75
	秋季	0.59	0.48	0.02	0.05	0.73	0.85
	冬季	0.98	0.80	0.03	0.08	1.22	1.41
	春季	0.76	0.62	0.02	0.06	0.94	1.09
消落带	夏季	2.35	1.91	0.06	0.20	2.93	3.40
	秋季	1.47	1.20	0.04	0.13	1.84	2.13
	春季	2.13	1.73	0.06	0.18	2.65	3.08
消落带上缘	夏季	2.73	2.22	0.07	0.23	3.41	3.95
	秋季	1.76	1.43	0.05	0.15	2.19	2.54
	冬季	3.00	2.44	0.08	0.26	3.74	4.33
	春季	2.29	1.87	0.06	0.20	2.86	3.32

3 结论

(1)香溪河库湾不同淹没区域土壤 PAHs 总量分布表现为消落带上缘 > 消落带 > 沉积物,消落带土壤 PAHs 受水位消涨的扰动,空间异质特征更为明显,与沉积物和消落带上缘的相关性相对较弱。

(2)香溪河库湾各区域土壤 PAHs 分布存在季节差异,表现为夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季;在水平空间表现为消落带及其上缘土壤在靠近峡口镇人口密集处以及受干流影响较大的长江与香溪河交汇处样带 PAHs 总量较高,而沉积物 PAHs 水平空间分布较为均匀。

(3)同分异构体比值法分析表明热解来源(化石燃料、生物质的燃烧)是香溪河库湾土壤 PAHs 的主要来源。各季节 3 种类型土壤 PAHs 来源的种类及比例由于季节性能源消耗的差异有明显差异。

(4)三峡库区香溪河库湾沉积物、消落带及其上缘土壤 PAHs 以误食和皮肤接触对人体具有潜在致癌风险,呼吸暴露对人体无风险。各区域致癌风险值的顺序表现为:消落带上缘 > 消落带 > 沉积物。

致谢:感谢三峡大学水污染控制实验室对本研究提供的实验设备及技术支持,甘龙、王林泉、张栋栋、张常安和徐锰等在采样和实验方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 钟志淋, 邴海健, 吴艳宏, 等. 三峡库区丰都—忠县段消落带不同高程土壤镉及其形态的分布特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1601-1611.
Zhong Z L, Bing H J, Wu Y H, et al. Distribution of cadmium in soils along the altitude of riparian zone (Fengdu-Zhongxian section) in the Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1601-1611.

[2] 胥焘, 王飞, 郭强, 等. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1502-1508.
Xu T, Wang F, Guo Q, et al. Transfer characteristic and source

identification of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1502-1508.

[3] 郭志顺, 罗财红, 张卫东, 等. 三峡重庆库区 PAHs 污染研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(6): 1337-1340.
Guo Z S, Luo C H, Zhang W D, et al. Research on PAHs pollution of the Three Gorges reservoir in Chongqing[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006, 43(6): 1337-1340.

[4] Tang Y M, Junaid M, Niu A P, et al. Diverse toxicological risks of PAHs in surface water with an impounding level of 175 m in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 1085-1096.

[5] Wu Y L, Wang X H, Ya M L, et al. Spatial-temporal distribution and transport flux of polycyclic aromatic hydrocarbons in a large hydropower reservoir of southeast China: implication for impoundment impacts[J]. Environmental Pollution, 2020, 257, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113603.

[6] 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.

[7] Liu R M, Men C, Yu W W, et al. Uncertainty in positive matrix factorization solutions for PAHs in surface sediments of the Yangtze River Estuary in different seasons [J]. Chemosphere, 2018, 191: 922-936.

[8] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1508-1517.
Zhu D M, Liu Y, Zhang L, et al. Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1508-1517.

[9] 王维奇, 全川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 238-242.
Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 238-242.

[10] 张敬智, 马超, 郅建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报,

- 2017, **36**(6): 1160-1166.
- Zhang J Z, Ma C, Gao H J. Investigation of soil organic carbon mineralization and microbial community structure evolution of northeast paddy black soil in waterlogged and aerobic conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(6): 1160-1166.
- [11] 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 等. 典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
- Ran Z X, Chen J Y, Wang Y T, *et al.* Characteristics and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from typical industrial areas of Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
- [12] Schneckenburger T, Thiele-Bruhn S. Sorption of PAHs and PAH derivatives in peat soil is affected by prehydration status; the role of SOM and sorbate properties [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(10): 3644-3655.
- [13] 崔嵩, 付强, 李天霄, 等. 松花江干流 PAHs 的底泥-水交换行为及时空异质性[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(4): 509-515.
- Cui S, Fu Q, Li T X, *et al.* Sediment-water exchange and spatial-temporal heterogeneity of PAHs in Songhua River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 509-515.
- [14] Rajput P, Sarin M M, Rengarajan R, *et al.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from post-harvest biomass burning emissions in the Indo-Gangetic Plain: isomer ratios and temporal trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(37): 6732-6740.
- [15] 陈志强, 赵利容, 刘贝贝, 等. 湛江湾柱状沉积物 n-alkanes 和 PAHs 组合分子特征及其环境指示作用[J]. *海洋学报*, 2016, **38**(8): 115-123.
- Chen Z Q, Zhao L R, Liu B B, *et al.* The molecular characteristic of n-alkanes and PAHs in core sediments of Zhanjiang Bay and its environmental indication significance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **38**(8): 115-123.
- [16] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [17] Shi R G, Li X H, Yang Y Y, *et al.* Contamination and human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Tianjin coastal new region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115938.
- [18] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区农业土壤中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- Wang X T, Jia Y, Sun Y Z, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from a typical contaminated area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- [19] 孔祥胜, 祁士华, 黄保健, 等. 广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 746-753.
- Kong X S, Qi S H, Huang B J, *et al.* Atmospheric deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 746-753.
- [20] 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- Zhang Y, Liu D F, Ji D B, *et al.* Effects of intrusions from Three Gorges Reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [21] 王鸣, 吴海珍, 刘雷, 等. 厌氧条件下不同共基质对焦化污泥降解多环芳烃的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(3): 510-516.
- Wang M, Wu H Z, Liu L, *et al.* Effects of different co-substrates on the biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by coking sewage sludge under anaerobic condition [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, **25**(3): 510-516.
- [22] 张银萍, 王芳, 杨兴伦, 等. 土壤中高环多环芳烃微生物降解的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2010, **37**(2): 280-288.
- Zhang Y P, Wang F, Yang X L, *et al.* Recent advances in biodegradation of high-molecular weight PAHs in soil [J]. *Microbiology China*, 2010, **37**(2): 280-288.
- [23] 车凯, 郁金星, 刘松涛, 等. 河北南部变电站场地土壤中 PAHs 含量、来源及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
- Che K, Yu J X, Liu S T, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PAHs in soil of typical substation sites in south Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
- [24] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 3043-3049.
- Ou D N, Liu M, Xu S Y, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in overlying waters and surface sediments from the Yangtze estuarine and coastal areas [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 3043-3049.
- [25] 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.
- [26] 赵双菊, 齐维晓, 李静, 等. 水位对密云水库消落区土壤磷通量影响的模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2400-2408.
- Zhao S J, Qi W X, Li J, *et al.* Impact of water level on phosphorus flux in water level fluctuating zone at Miyun Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2400-2408.
- [27] 许华夏, 宋玉芳, 井欣, 等. 生物泥浆反应器中微生物数量变化与 PAHs 降解[J]. *应用与环境生物学报*, 2000, **6**(5): 452-456.
- Xu H X, Song Y F, Jin X, *et al.* The variation of amount of microbes and its relations with the degradation of PAHs in the bioslurry reactor [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, **6**(5): 452-456.
- [28] 王英锋, 张姗姗, 李杏茹, 等. 北京大气颗粒物中多环芳烃浓度季节变化及来源分析[J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 369-375.
- Wang Y F, Zhang S S, Li X R, *et al.* Seasonal variation and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in airborne particulates of Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **29**(3): 369-375.
- [29] 刘世亮, 骆永明, 吴龙华, 等. 污染土壤中苯并[a]芘的微生物共代谢修复研究[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(2): 364-369.
- Liu S L, Luo Y M, Wu L H, *et al.* Remediation of benzo[a]pyrene-contaminated soil through its co-metabolism with soil microbes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(2): 364-369.
- [30] 林莉, 董磊, 李青云, 等. 三峡库区水体和底泥中多环芳烃

- 和邻苯二甲酸酯类分布和来源[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 660-667.
- Lin L, Dong L, Li Q Y, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(3): 660-667.
- [31] 邹家素, 孙秀萍, 郑璇, 等. 三峡库区重庆段重点水域沉积物多环芳烃的污染特征及生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(4): 1548-1553.
- Zou J S, Sun X P, Zheng X, *et al.* Analysis of the contamination characteristics and the eco-risk assessment of PAHs in sediments from the Three Gorges section in Chongqing area[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(4): 1548-1553.
- [32] 魏楚, 韩晓. 中国农村家庭能源消费结构: 基于 Meta 方法的研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2018, **18**(6): 23-35.
- Wei C, Han X. Energy consumption structure of Chinese rural household: a meta approach[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2018, **18**(6): 23-35.
- [33] 袁东星, 杨东宁, 陈猛, 等. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(1): 107-112.
- Yuan D X, Yang D N, Chen M, *et al.* Concentrations and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorides in surface sediment of Xiamen Western Harbour and Minjiang Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, **21**(1): 107-112.
- [34] Keshavarzi B, Abbasi S, Moore F, *et al.* Contamination level, source identification and risk assessment of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of an important commercial center in Iran [J]. Environmental Management, 2018, **62**(4): 803-818.



CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)