

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯砷酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₂O 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价

蓝家程^{1,2}, 孙玉川^{1,3*}, 田萍⁴, 卢丙清⁵, 师阳¹, 徐昕¹, 梁作兵¹, 杨平恒^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 4. 四川省地质环境监测总站, 成都 610081; 5. 重庆市地质勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121)

摘要: 利用气相色谱-质谱联用仪 (GC/MS) 测定了老龙洞地下河流域水中 16 种优控多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 含量, 研究了流域内 PAHs 组成、污染水平, 并对其进行了生态风险评价。结果表明, 老龙洞地下河水中 \sum PAHs 含量变化范围为 81.5 ~ 8 019 ng·L⁻¹, 表层岩溶泉 \sum PAHs 含量为 288.7 ~ 15 200 ng·L⁻¹, 地表水 \sum PAHs 含量为 128.4 ~ 2 442 ng·L⁻¹; 受黄桷埡镇污水的影响, 地下水相对于地下水补给来源的落水洞和地表水含量较高。流域内水中 PAHs 均以低环为主, 尤其是 3 环占主导。受污水、季节的影响及 PAHs 物理化学性质的差异, 水中 PAHs 月变化呈现不同的变化特征。地表水、落水洞污水排放对地下河 PAHs 来源起重要作用。流域内水中 PAHs 以低环污染为特征, 所有检测到的 PAH 化合物处于中等污染和重污染风险。

关键词: 多环芳烃; 岩溶地下河; 变化特征; 生态风险评价

中图分类号: X143; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3722-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.012

Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment

LAN Jia-cheng^{1,2}, SUN Yu-chuan^{1,3}, TIAN Ping⁴, LU Bing-qing⁵, SHI Yang¹, XU Xin¹, LIANG Zuo-bing¹, YANG Ping-heng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources of China, Chongqing 408435, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi; Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 4. Geological and Environmental Monitor Station of Sichuan Province, Chengdu 610081, China; 5. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China)

Abstract: Water samples in Laolongdong underground river catchment were collected to determine the concentration, compositional profiles, and evaluate ecological risk of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). PAHs were measured by GC/MS. The total concentrations of 16 PAH ranged from 81.5-8 019 ng·L⁻¹ in underground river, 288.7-15 200 ng·L⁻¹ in karst springs, and 128.4-2 442 ng·L⁻¹ in surface water. Affected by waste water from Huangjueya town, concentrations of PAHs in underground river were higher than those in surface water and waste water from sinkhole. The PAHs profiles were dominated by 3 ring PAHs. There were differences of monthly variations of PAHs contents in the water, due to waste water, season and different characteristics of PAH. Surface water and waste water from sinkhole played an important role on contamination in the river. The levels of ecological risk were generally moderately polluted and heavily polluted according to all detected PAH compounds in the water.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; karst underground river; characteristics of variation; ecological risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是持久性有机污染物 (POPs) 中的一类, 由于具有持久性、长距离迁移能力, 普遍存在于区域和全球多种环境介质 (大气、土壤、水体、沉积物) 中。并且 PAHs 具有毒性 (致癌性、致畸性和致突变性), 是环境中最大的一类化学物质^[1], 1979 年美国环保署 USEPA 将 16 种多环芳烃列入优先控制污染物名单。PAHs 主要来源于煤、石油等化石燃料及木材等生物质和其他有机材料的不完全燃烧^[2~4]。水体中的 PAHs 主要来自于工业

废水排放、城市生活污水、地表径流、土壤淋溶、石油的泄漏及大气颗粒物的干湿沉降及水气交换。

收稿日期: 2014-03-03; 修订日期: 2014-04-23

基金项目: 重庆市院士专项 (cstc2013jcyj20001); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2013D012, XDJK2013B021, XDJK2014A016); 国家自然科学基金项目 (41072192, 41103068); 西南大学博士基金项目 (SWU110258); 应对全球气候变化地质调查综合研究项目 (12120113006700); 2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目

作者简介: 蓝家程 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶环境学与土壤环境, E-mail: lanjc@swu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

研究表明,我国的许多河流均不同程度地受到 PAHs 的污染^[5-10]. 相比地表河流,地下水的报道较少. 岩溶地下水作为一种重要的水资源,全世界大约有 25% 人口将其作为主要饮用水源^[11],而中国岩溶地下水资源达 2 039.67 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,约占全国地下水资源量的 1/4 强^[12]. 但近年来的研究发现,岩溶区地下水普遍受到 PAHs 的污染^[13-15]. 与非岩溶区相比,岩溶区由于特殊的二元结构,基岩大片裸露,土被不连续,土层浅薄,土壤层的天然保护和过滤作用基本丧失;加上大量落水洞、漏斗、竖井和裂隙等岩溶形态发育,使得污染物很容易通过这些形态进入到地下河系统. 孔祥胜等^[16,17]研究了大石围天坑群顶部和底部土壤以及大气 PAHs,表明大型岩溶漏斗具有“冷陷阱效应”导致岩溶底部土壤以及与其相连的地下河均受到 PAHs 的污染. Alam 等^[18,19]认为农田是 PAHs 迁移的主要来源,岩溶形态更易于 PAHs 的迁移. 本文以老龙洞地下河流域水体为研究对象,探讨流域内水体 PAHs 的污染变化特征及污染水平,揭示岩溶形态对地下河污染的影响,并进行生态风险性评价.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区处于川东平行岭谷区——南温泉背斜, $\text{N}29^{\circ}32'30''$, $\text{E}106^{\circ}36'30''$,为亚热带湿润气候,年均降雨量 1 081.7 mm,降雨主要集中在 4~9 月. 整体地貌类型为背斜低山,地势总体为北高南低,第四纪以来,由于受到强烈侵蚀,在流域南北分别呈现“一山三岭两槽”和“一山二岭一槽”式的岩溶景观. 研究区主要地层为三叠系下统嘉陵江组 (T_{1j}) 碳酸盐岩,背斜两翼为中三叠统雷口坡组 (T_{2l}) 碳酸盐岩和上三叠统须家河组 (T_{3xj}) 地层(图 1). 老龙洞地下河主要发育于槽谷中,从上游的黄桷埡至下游出口的老龙洞,沿背斜轴部大致为 N-S 向,长度近 6 km. 在槽谷底部岩溶洼地、落水洞等岩溶形态沿构造线成串珠状分布,在洼地边缘常有表层岩溶裂隙泉出露. 流域面积大约为 12.6 km^2 ,其中,居民建设用地约 4.5 km^2 ,厂矿用地约 2.5 km^2 ,农业用地约 2 km^2 ,主要种植蔬菜,其余为林地及在建地. 随着城镇化发展,农地被占用,建设用地有扩大趋势.

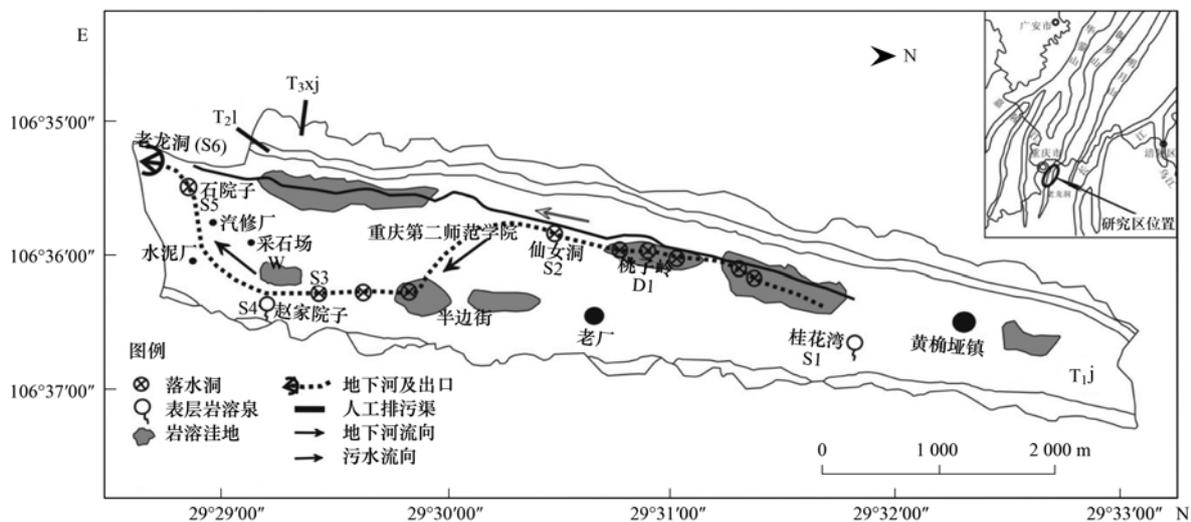


图 1 研究区位置及采样点示意

Fig. 1 Location map of study area and sampling sites

2012 年 10 月~2013 年 11 月对地下河污水重要进出口进行为期 1 a 的每月采样监测,其中每年的 4~9 月为雨季,11~3 月为旱季. 根据落水洞取样的可行性,选取了流域内赵家院子落水洞(S3)、石院子落水洞(S5)、仙女洞(S2)、及地表水(W);桂花湾(S1)和赵家院子(S4)表层岩溶泉及老龙洞地下河出口(S6)为研究对象(图 1). 其中桂花湾泉域位于地下河上游,上覆主要为林地和重庆邮电大学;仙女洞为地下河天窗,以前为旅游景点,洞内有火锅店,现已

废弃,目前周边正在进行别墅区的建设;赵家院子落水洞和石院子落水洞均有污水汇入,其汇入的污水主要为周围的居民点和小企业排放,其中石院子落水洞污水经过简易的处理后汇入;赵家院子泉域上覆为企业、居民点和菜地;老龙洞地下河出口为旅游景点,可以乘船进入洞中约 1 km.

1.2 样品采集

采集水样时直接用 1 L 带聚四氟乙烯衬垫的螺旋盖棕色玻璃瓶采集,采样过程中不能引入气泡,水

样装满至瓶口上有一弯月面时旋紧瓶盖,然后翻转瓶子检查,如发现气泡,则重新取样,水样置于便携式冰箱中避光冷藏运输,尽快送至实验室,水样则立即处理,若未能立即处理则放入冰箱于 4℃ 冷藏保存,并在 7 d 内完成前处理。

1.3 实验分析

水样多环芳烃的提取采用美国 EPA525.2 的方法进行。取经过 0.7 μm 玻璃纤维滤膜过滤的水样 1 L,加入回收率指示物,摇匀,用铝箔封口,使用全自动固相萃取仪处理,用 50 mL 鸡心瓶收集提取液。固相萃取后的液体浓缩至 5 mL,过无水硫酸钠柱脱水,并用 50 mL 鸡心瓶收集滤液,待液体降至与无水硫酸钠上方平行时,用少量正己烷冲洗柱壁。脱水后浓缩至 5 mL 的液体过硅胶柱,收集的提取液用旋转蒸发仪浓缩至约 2 mL,加入 5 mL 正己烷置换溶剂。再浓缩至 0.8 mL,转移至细胞瓶中。用氮气吹至 0.2 mL 后加入内标物(六甲基苯)冷冻待测。

使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Agilent, 7890A/5975C),进行 PAHs 检测。检测条件:色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm);载气为高纯氮气,流速为 1 mL·min⁻¹,进样口温度 280℃,升温程序为初始温度 50℃,保持 1 min 后以 20℃·min⁻¹升温至 200℃,然后再以 10℃·min⁻¹的速度升温至 290℃,保持 15 min。采用无分流方式进样,进样量 1 μL。EI 电离源 70 eV,离子源温度 300℃,同时采集全扫描数据和选择离子扫描数据,以全扫描数据定性,选择离子扫描数据定量。使用内标法和多点校正曲线对多环芳烃进行定量分析。

1.4 质量控制与质量保证

每分析 10 个样品同时做空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样。每个样品在萃取前加入回收率指示物,用于检测实验过程中的损失情况,空白样品用于确认实验结果的再现性。该方法除 Nap 回收率较低外(平均值为 53%),其它 PAHs 的回收率介于 78% ~ 110% 之间,且平行样品的相对标准偏差均小于 12%。以 1 L 水样计算的方法检出下限范围为 0.2 ~ 1.5 ng·L⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 地下河流域水体 PAHs 污染及水平

2.1.1 地下河流域水体 PAHs 含量变化特征

图 2 为老龙洞地下河流域水中 PAHs 含量月变化。从中可知,老龙洞地下河水中 PAHs 含量变化

范围为 81.5 ~ 8 019 ng·L⁻¹,平均值为 1 438 ng·L⁻¹,最高值和最低值分别出现在 2012 年 9 月和 2013 年 9 月。2012 年 9 月和 10 月 PAHs 含量最高,主要与上游黄桷埡镇排放的污水输入有关。PAHs 含量随采样时间呈下降趋势,据野外调查发现,由于“南山郡”和“山与城”别墅区的修建,2013 年年初,污水流量相对减少,相应的污水管道大约于 2013 年 4 月开始运行,使得上游黄桷埡镇排放污水对地下河的输入大大减少。

整体上赵家院子泉水 PAHs 含量呈先升高后下降的趋势。观测期间 PAHs 总量变化范围为 288.7 ~ 2 252 ng·L⁻¹,平均值为 755.9 ng·L⁻¹,2013 年 5 月泉水中 PAHs 含量最高,为 2 252 ng·L⁻¹,可能的原因与排污有关,野外采样发现,泉水浑浊泛白并发臭,2013 年 4 月含量次之,为 1 281 ng·L⁻¹,2012 年 12 月和 2013 年 1 月含量也较高,其余月份变化不是很明显。总体来说,泉水中 PAHs 雨季大于旱季,雨季变化较大。

桂花湾泉 PAHs 含量变化呈两个波峰,最高值出现在 2013 年 4 月,为 15 200 ng·L⁻¹,第二个波峰值为 2012 年 12 月,为 4 615 ng·L⁻¹。2012 年 11 月含量也相对较高,其余月份波动相对较小,最低值为 271.9 ng·L⁻¹,出现在 2013 年 9 月。与赵家院子泉相似,雨季波动范围较大,且雨季平均值大于旱季。以上表明表层岩溶泉受大气降水及上覆土壤影响呈现不同的变化趋势。

地表水 PAHs 含量有 3 个峰值,分别出现在 2012 年 9 月、2012 年 12 月、2013 年 6 月,其浓度分别为:2 003、1 992、2 442 ng·L⁻¹。最低值为 128.4 ng·L⁻¹,出现于 2012 年 10 月,其余月份变化不大。

2.1.2 不同水中 PAHs 含量比较

从表 1 可以看出除了仙女洞外, BaA、BbF、InP、BgP 在其余水体中均未检测出。以平均值来看,落水洞、地表水、仙女洞的 PAHs 含量相对地下河出口较低,主要的原因是 2013 年 4 月以前,老龙洞地下河出口主要受黄桷埡污水的排入影响较大,导致其 PAHs 含量也较高,若与 2013 年 4 月之后的数据比较,老龙洞 PAHs 平均含量为 422.2 ng·L⁻¹,低于其它水点的含量;赵家院子泉与桂花湾泉变化范围分别为 288.7 ~ 2 252 ng·L⁻¹、271.9 ~ 15 200 ng·L⁻¹,平均值分别为 755.9 ng·L⁻¹、2 636 ng·L⁻¹。水中 ∑ PAHs 含量为上游的桂花湾泉最高,最低值为下游石院子落水洞污水,可能与经过污水处理池处理有关。

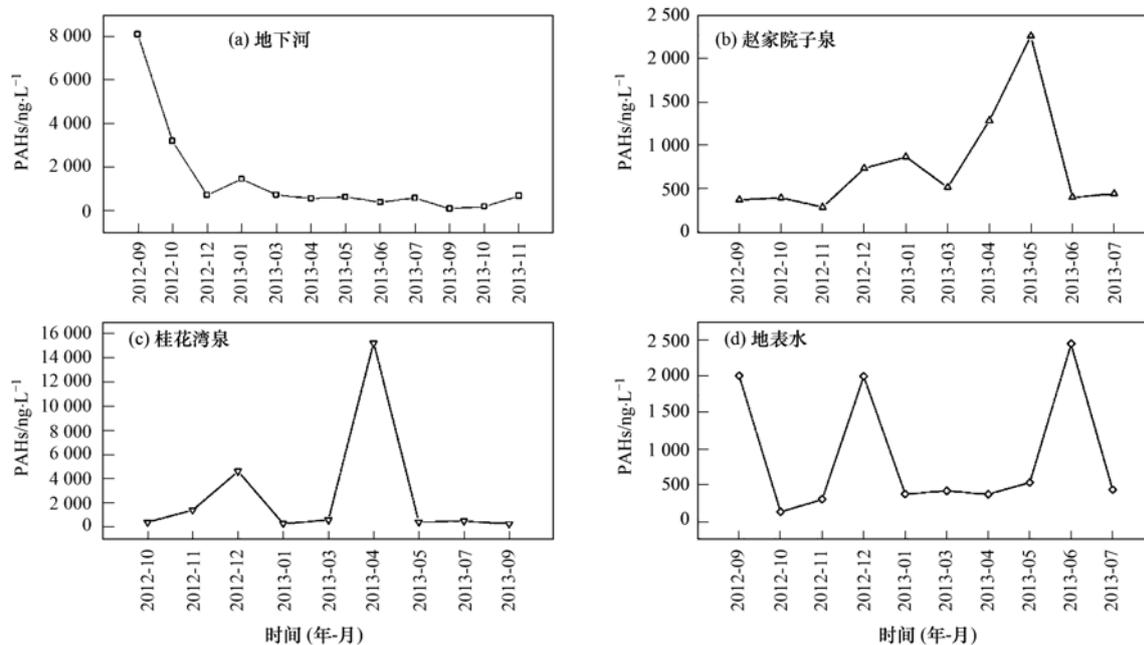


图2 老龙洞流域水体 PAHs 含量月变化

Fig. 2 Monthly variations of PAHs contents in the water of Laolongdong catchment

2.1.3 地下河流域水体 PAHs 组成变化特征

从 PAHs 组成特征来看(图 3), 地下河流域水中 PAHs 主要以 3 环为主, 高环含量很少, 6 环均未检测到, 这主要与低环 PAH 化合物溶解度较高, 高环溶解度低有关^[5]. 2013 年 7 月之前, 地下河水中 PAHs 均以 3 环为主, 并且从 2012 年 9 月开始, 2 环的比重有增加的趋势, 2013 年 9 月则以 2~3 环为主. 一方面, 不仅与上游黄桷埡镇排放的污水影响越来越小有关, 而且沿途落水洞污水输入对地下河的贡献相对增大, 其中的 2 环 PAH 含量相对较高有关; 另一方面, 与 PAH 的迁移性有关, 2 环相对较容易迁移, 受降雨影响较大, 2013 年 4~9 月为雨季, 为降雨后一星期采样, 而 10~11 月则在降雨期间采样, 因此 2~3 环 PAHs 比重明显较高. 赵家院子泉水中 PAHs 组成以 3 环为主, 其中 2012 年 12 月和 2013 年 5 月含量最高, 分别占到 86.1%、94.7%; 其次为 2 环, 4 环比重非常小, 与 3 环相对应, 2013 年 5 月 4 环 PAHs 未检出, 2012 年 12 月 4 环比重也仅为 0.27%, 2013 年 3 月 4 环比重达到最高为 15.8%; 5 环只有在 2012 年 11 月检测到, 6 环均未检测到. 整体来看, 除了 2012 年 12 月、2013 年 5 月和 2013 年 3 月外, 泉水中 PAHs 组成变化不大, 旱季(11 月~次年 3 月)其变化幅度相对较大, 雨季变化幅度相对稳定. 桂花湾泉水中 PAHs 也是以 3 环为主(除了 2013 年 1 月外), 3 环平均占到

62.7%; 其次为 2 环和 4 环的比重, 5~6 环均未检测到. 整体来看, 除了 2012 年 12 月、2013 年 1 月和 2013 年 4 月外, 泉水 PAHs 组成变化不明显. 然而旱季(11 月~次年 3 月)其变化幅度相对较大, 雨季变化幅度相对稳定. 以上表明表层岩溶泉受大气降水及上覆土壤影响呈现不同的变化趋势. 同其它水体一样, 地表水以 3 环为主, 占到 53.6%~74.5%; 2 环比重为 18.2%~34.2%, 4 环比例为 0.8%~11.6%, 5 环只有在 2013 年 7 月检测到, 其比例为 0.82%, 6 环则均未检测到. 整体来看, 观测期间, 其组成并无太大的波动. 与表层岩溶泉相比, 地表水 PAHs 组成变化相对稳定, 主要是与缺乏土壤层的影响有关.

2.1.4 流域内水体多环芳烃污染水平

有研究者将溶解 PAHs 污染分为四类: 微污染 ($10 \sim 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 轻污染 ($50 \sim 250 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 中等污染 ($250 \sim 1000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 及重污染 ($1000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)^[20]. 由图 2 和表 1 可知, 老龙洞流域水中 PAHs 污染大部分为中等到重污染水平.

与其他地方的河流相比(表 2), 研究区地下水中 PAHs 污染水平相当于长江口, 与大江大河相比, 高于天津河流、松花江、锦江河、武汉长江段, 但低于九龙江河口; 低于太湖平原地下水, 但高于百朗地下河. 这些差异可能主要是因为不同地区, 具有不同的来源, 同样地球化学环境本身也是重要因素.

表 1 老龙河流域水中 PAHs 含量¹⁾/ng·L⁻¹
 Table 1 Concentration of PAHs in waters of Laolongdong catchment/ng·L⁻¹

位置	PAH	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chry	BbF	BkF	BaP	InP	DaA	BgP	∑ PAHs
老龙洞	Mean	151.2	230.2	68.4	257.2	440.3	28.74	164.7	97.01	ND	0.64	ND	ND	ND	ND	0.27	ND	1 439
	Min	46.45	2.06	4.24	13.24	ND	0.67	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	81.5
	Max	410	883.2	271.2	993.8	3 453	222.8	1 285	748	ND	2.41	ND	ND	ND	ND	1.70	ND	8 089
地表水	Mean	255.5	160.1	47.57	160.8	174.24	10.66	57.07	32.79	ND	0.35	ND	0.36	ND	ND	ND	ND	899.4
	Min	28.90	5.99	7.34	39.73	23.52	0.70	2.51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	128.4
	Max	800.9	592	475.7	533.9	523.1	29.44	176.4	106.2	ND	1.88	ND	3.57	ND	ND	ND	ND	2 443
赵家院子落水洞	Mean	330.8	76.21	47.21	47.82	25.18	104.9	1.57	0.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.10	ND	635.4
	Min	98.06	23.03	22.75	ND	ND	3.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	265.5
	Max	780.7	170.1	91.54	72.52	45.56	306.5	4.72	1.86	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.29	ND	974.6
石院子落水洞	Mean	89.78	69.43	34.85	157.7	26.41	2.47	5.77	2.27	ND	0.09	ND	ND	ND	ND	ND	ND	388.8
	Min	49.22	2.36	4.15	12.04	7.63	0.42	0.15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	77.26
	Max	138.9	137.4	99.69	345.7	49.92	6.50	11.56	7.39	ND	0.34	ND	ND	ND	ND	ND	ND	790.8
赵家院子泉	Mean	160.7	190.5	26.69	96.97	122	138.6	13.29	6.84	ND	0.08	ND	ND	0.23	ND	ND	ND	755.9
	Min	91.36	20.03	0.39	2.15	29.58	1.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.00	ND	ND	ND	288.7
	Max	390.1	617.5	65.09	328.6	722.9	1292	51.61	29.88	ND	0.82	ND	ND	2.27	ND	ND	ND	2 252
桂花湾泉	Mean	376	238	153.8	474.8	916.8	55.32	267.7	153.6	ND	0.23	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2 636
	Min	105.6	10.65	12.67	42.89	50.68	2.69	16.11	9.69	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	272
	Max	1 813	752.8	1 042	3 108	6 087	3 674	1 664	959.6	ND	0.56	ND	ND	ND	ND	ND	ND	15 200
仙女洞	Mean	119.6	42.87	69.06	106.3	114.7	22.43	27.02	18.65	19.24	16.31	26.65	7.88	14.52	ND	ND	ND	605.3
	Min	94.33	37.41	60.47	89.92	93.63	19.76	22.55	15.65	18.17	14.36	25.69	8.57	14.45	ND	ND	ND	514.9
	Max	144.9	48.33	77.66	122.7	135.8	25.1	31.5	21.65	20.31	18.27	27.61	7.19	14.59	ND	ND	ND	695.7

1) ND 为未检

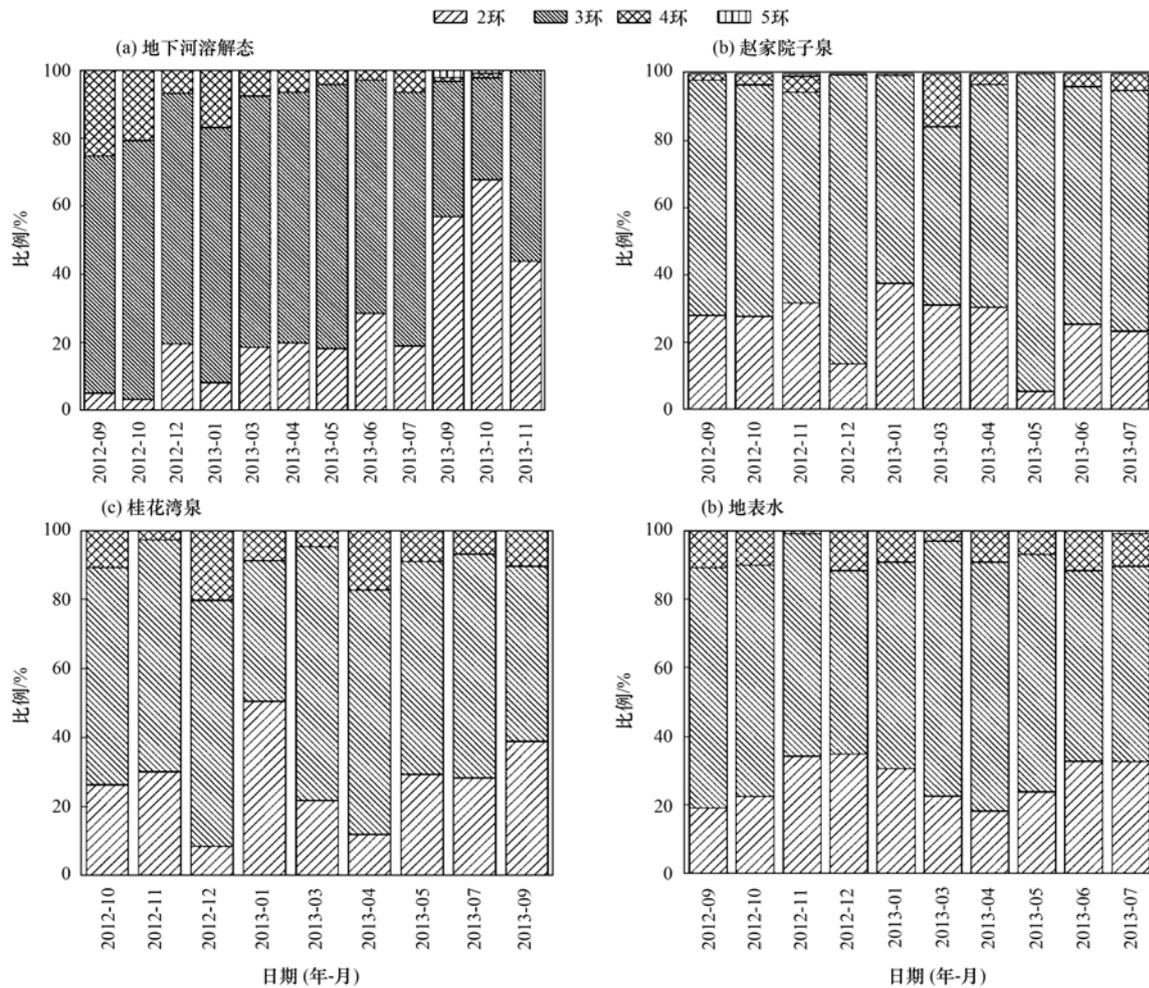


图 3 老龙洞流域水体 PAHs 组成变化

Fig. 3 Variations of PAHs composition in the water of Laolongdong catchment

岩溶区由于特殊的地表地下双层结构,地表污染物容易进入地下系统,但与地表河流相比,地下河管道发育,相对封闭,黑暗无光,不易被光降解,温度相对

恒定,而且地下河环境介质(沉积物、碳酸盐岩)能够吸附污染物,这些条件均有利于地下河富集有机污染物^[13].

表 2 不同地区水中 PAHs 含量

Table 2 PAHs content in water from different sites

地点	PAH 化合物数量 /种	\sum PAHs /ng·L ⁻¹		文献
		Mean	Range	
天津河流	16	174	45.81 ~ 1 272	[5]
松花江	15	33.9	13.9 ~ 161	[6]
锦江河	16	53.23	43.02 ~ 63.00	[7]
珠江广州段	16	1 796.4	987 ~ 2 878.5	[8]
九龙江河口	16	17 000	6 960 ~ 26 900	[9]
长江口	16	1 857	478 ~ 6 273	[10]
广西百朗地下河	16	102.3	54.7 ~ 192.0	[13]
太湖平原地下水	16	4 420	4 ~ 32 449	[21]
老龙洞岩溶泉	16	1 696	288.7 ~ 15 200	本研究
老龙洞地下河	16	1 438	81.5 ~ 8 019	本研究

2.2 流域内不同水体 PAHs 污染相关性分析

为了排除上游黄桷埡镇污水的影响,取 2013 年 4 月以后的数据分别与地表水(2013 年 4、5、6、7 月)和落水洞(2013 年 5、6、9、10 月)对应月份数据进行相关分析(图 4). 从图 4 可以看出,地下河水与地表水、地下河水与落水洞水中 PAHs 含量均呈显著正相关,表明地表水和落水洞是地下河 PAHs 的重要来源,对地下河 PAHs 污染起重要作用. 由于低环 PAHs 溶解性大,相对易迁移,并且岩溶区特殊的二元结构,土层较薄,导致这些低环 PAHs 在表层岩溶带更易迁移,进而污染地下河.

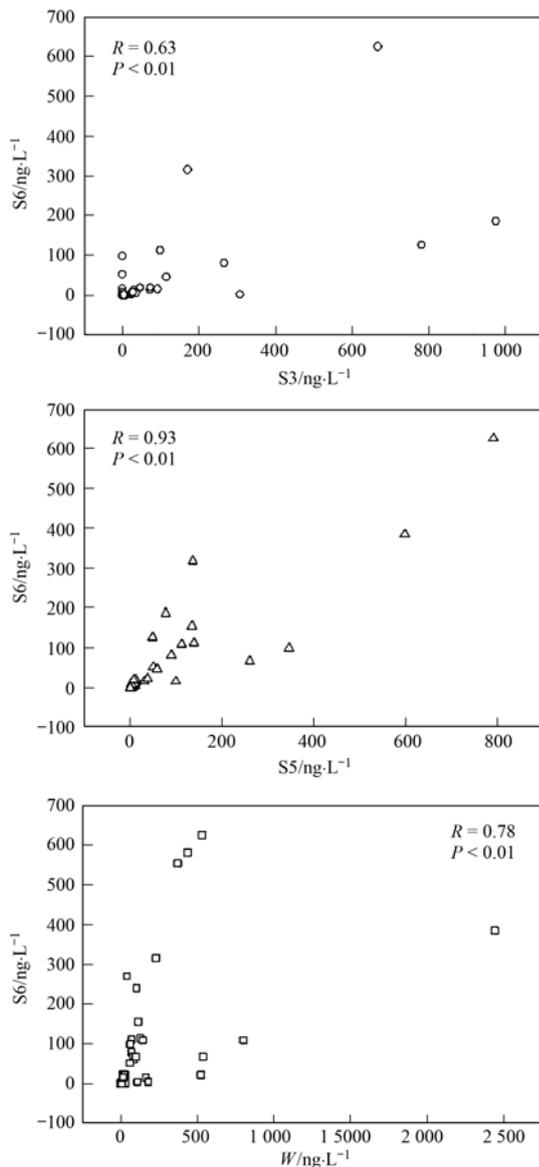


图 4 地下河与其它水体 PAHs 含量关系

Fig. 4 Relationship of PAHs contents between underground river and other waters

2.3 多环芳烃生态风险评价

根据 Kalf 等^[22]的研究,可以用风险商值 (risk quotient, RQ) 的方法来评价介质中 PAHs 的生态风险,其公式如下:

$$RQ = c_{PAHs}/c_{QV}$$

$$RQ_{NCs} = c_{PAHs}/c_{QV(NCs)}$$

$$RQ_{MPCs} = c_{PAHs}/c_{QV(MPCs)}$$

式中,RQ 为风险商值, c_{PAHs} 为介质中某种 PAHs 的浓度, c_{QV} 为某种 PAHs 所对应的风险标准值, RQ_{NCs} 为最低风险浓度风险商值, RQ_{MPCs} 为最高风险浓度风险商值, $c_{QV(NCs)}$ 为最低风险标准值, $c_{QV(MPCs)}$ 为最高风险标准值. 利用该方法仅仅能评价 10 种单体 PAH 化合物的生态风险,而 Acy、Ace、Flu、Pyr、BbF、DaA 的生态风险无法评价,根据 Cao 等^[23]的研究,这 6 种 PAH 单体的最低和最高风险值见表 3. 由此可以对 16 种 PAHs 进行生态风险评价. 根据前人研究^[23,24],当 $RQ_{NCs} < 1.0$ 表示处于低风险,当 $RQ_{MPCs} > 1.0$,表明处于严重污染,应立即采取必要措施,当 $RQ_{NCs} > 1.0$ 且 $RQ_{MPCs} < 1.0$,说明处于中等风险,需考虑控制和修复措施. 由表 3 可知,除了 BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、InP、DaA、BgP 在所有水中基本上都未检测到外,其余单体 PAH 化合物处于中等污染和重污染风险,应该引起重视并采取控制和修复措施以降低这些化合物的污染风险.

3 结论

(1)流域内水中 PAHs 组成均以 3 环为主,受污水、季节的影响及不同 PAH 性质的差异,水中 PAHs 含量月变化呈现不同的变化特征. 老龙洞地下河受城镇生活污水的影响导致前两个月的 PAHs 含量最高,之后并无太大波动. 表层岩溶泉则表现为雨季大于旱季,在组成上旱季相对变化较大,雨季相对稳定;相对于表层岩溶泉,地表水组成变化较为稳定,主要是因为地表水缺乏土壤层. 受黄桷埡镇污水影响,地下河出口相对落水洞、仙女洞和地表水等补给来源的 PAHs 含量较高.

(2)各个水体间 PAHs 含量的相关性表明老龙洞地下河水中 PAHs 的污染受地表水,落水洞排放污水的控制,岩溶地表地下双层结构导致低环 PAHs 易迁移至地下系统中.

(3)流域内水中 PAHs 以低环污染为特征,与其他地方相比其污染水平处于中等偏低水平. 生态风险评价结果显示,除了 BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、InP、DaA、BgP 在所有水中基本上都未检测到外,

表 3 老龙洞流域水体 PAHs 的 $RQ_{(NCs)}$ 和 $RQ_{(MPCs)}$ Table 3 Mean values of $RQ_{(NCs)}$ and $RQ_{(MPCs)}$ of PAHs in water of Laolongdong catchment

项目	NCs	MPCs	老龙洞			赵家院子泉			桂花湾泉			地表水		
			Mean / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{(NCs)}$	$RQ_{(MPCs)}$	Mean / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{(NCs)}$	$RQ_{(MPCs)}$	Mean / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{(NCs)}$	$RQ_{(MPCs)}$	Mean / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{(NCs)}$	$RQ_{(MPCs)}$
Nap	12	1200	151.2	12.6	0.13	160.7	13.39	0.13	375.9	31.33	3.48	255.5	21.29	0.21
Acy	0.7	70	230.2	328.8	3.29	190.5	272.2	2.72	237.9	339.9	37.78	160.1	228.7	2.29
Ace	0.7	70	68.40	97.71	0.98	26.69	38.13	0.38	153.8	219.7	24.41	47.57	67.96	0.68
Flu	0.7	70	257.2	367.5	3.67	96.97	138.5	1.39	474.7	678.2	75.36	160.8	229.7	2.30
Phe	3	300	440.3	146.8	1.47	121.9	40.65	0.41	916.8	305.6	33.96	174.2	58.08	0.58
Ant	0.7	70	28.74	41.05	0.41	138.6	198	1.98	55.32	79.03	8.78	10.66	15.24	0.15
Fla	3	300	164.7	54.90	0.55	13.29	4.43	0.04	267.7	89.24	9.92	57.07	19.02	0.19
Pyr	0.7	70	97.01	138.6	1.39	6.84	9.77	0.10	153.6	219.5	24.39	32.79	46.84	0.47
BaA	0.1	10	ND ¹⁾	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Chry	3.4	340	0.64	0.19	0.00	0.08	0.02	0.00	0.23	0.07	0.01	0.35	0.10	0.00
BbF	0.1	10	ND	ND	ND									
BkF	0.4	40	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.36	0.89	0.01
BaP	0.5	50	ND	ND	ND	0.23	0.45	0.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
InP	0.4	40	ND	ND	ND									
DaA	0.5	50	0.27	0.54	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BgP	0.3	30	ND	ND	ND									
\sum PAHs	23.8	2380	1438	60.45	0.60	755.9	31.76	0.32	2636	110.8	12.31	899.4	37.79	0.38

1) ND 未检测到数据

其余单体 PAH 化合物处于中等污染和重污染风险。

致谢: 在野外和室内工作中得到西南大学地理科学学院老师和同学的帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Ambient concentrations and exposure to carcinogenic PAHs in the environment[J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**(7): 1278-1284.
- [2] Yunker M R, 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.
- [3] Johnsen A, Karlson U. Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation[J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2007, **76**(3): 533-543.
- [4] Srogi K. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons; a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2007, **5**(4): 169-95.
- [5] Shi Z, Tao S, Pan B, *et al.* Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **134**(1): 97-111.
- [6] Ma W L, Liu L Y, Qi H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediment and soil of the Songhua River Basin, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(10): 8399-8409.
- [7] Yang D, Qi S H, Zhang Y, *et al.* Levels, sources and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment along the Jinjiang River mainstream to Quanzhou

Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 298-306.

- [8] Luo X J, Mai B X, Yang Q S, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **48**(11-12): 1102-1115.
- [9] Maskaoui K, Zhou J L, Hong H S, *et al.* Contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Jiulong River Estuary and Western Xiamen Sea, China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(1): 109-122.
- [10] 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.
- [11] Ford D C, Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Chichester: Wiley & Sons, 2007.
- [12] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 127-164.
- [13] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 广西大石围天坑群地下水中多环芳烃的污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1081-1087.
- [14] 杨梅. 典型岩溶区地下河有机污染物控制因素及运移特征研究——以重庆南山岩溶槽谷区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [15] 孙玉川. 有机氯农药和多环芳烃在表层岩溶系统中的迁移、转化特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [16] 孔祥胜, 祁士华, 孙莺, 等. 广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4212-4219.
- [17] 孔祥胜, 祁士华. 典型岩溶区多介质中多环芳烃的环境存在特征——以广西大石围天坑群为例[J]. *中国岩溶*, 2013,

- 32(2): 182-188.
- [18] Alam M J, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Sources and transports of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Nanshan Underground River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(4): 1967-1976.
- [19] Alam M J. Sources and transports of organic pollutants in the Nanshan underground river Chongqing, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. 1-57.
- [20] 陈宇云. 钱塘江水体中多环芳烃的时空分布、污染来源及生物有效性[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 15-16.
- [21] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1806-1810.
- [22] Kalf D F, Crommentuijn T, van de Plassche E J. Environmental quality objectives for 10 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, **36**(1): 89-97.
- [23] Cao Z G, Liu J L, Luan Y, *et al.* Distribution and ecosystem risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Luan River, China[J]. *Ecotoxicology*, 2010, **19**(5): 827-837.
- [24] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(5): 1614-1624.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjxx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjxx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行