

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析

孙玉川^{1,2}, 沈立成¹, 袁道先^{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. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 对重庆市南川区4个典型表层岩溶泉进行连续采样观测, 利用GC-MS定量分析泉水中16种优控多环芳烃(PAHs)含量, 研究了表层岩溶泉水中多环芳烃含量、组成、来源的季节变化以及污染特征。结果表明, 4个表层岩溶泉中16种PAHs均有检出。在一年的观测期间, 泉水中的 $\sum$ PAHs含量变化较大, 范围在341~4968 ng·L⁻¹之间, 平均值为1772 ng·L⁻¹。7种致癌性PAHs的含量均表现为雨季大于旱季。泉水中PAHs组成以2~3环PAHs为主, 其比例均超过了50%。泉水中的PAHs主要来自于煤、生物质以及石油的燃烧, 但在2011年6~10月期间, 来源于煤、生物质燃烧的PAHs对泉水中PAHs的贡献要更大一些。Ant/(Ant + Phe)和Fla/(Fla + Pyr)比值随季节变化的特点, 表明Ant、Phe、Fla和Pyr在表层岩溶带土壤中易于迁移、传输。4个同分异构体比值中, Fla/(Fla + Pyr)比值对源信息的指示更灵敏。与其它地区相比, 研究区表层岩溶泉水中的PAHs含量处于较高水平, 泉水已受到多环芳烃的污染。

关键词: 表层岩溶泉; 多环芳烃; 季节变化; 组成; 来源

中图分类号: X131; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2091-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.008

Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water

SUN Yu-chuan^{1,2}, SHEN Li-cheng¹, YUAN Dao-xian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: The water samples were collected from four typical epikarst springs in Nanchuan District, Chongqing Municipality between October 2010 and October 2011. Sixteen priority polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring waters were quantitatively analyzed by the gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS). The objectives of this study were to investigate the seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons' concentration, composition, source and contamination characterization in epikarst springs water. The results showed that the detection ratios of 16 PAHs in four springs were 100%. The total concentrations of 16 PAHs fluctuated greatly in epikarst spring water during one year observation, and the concentration ranged from 341 to 4968 ng·L⁻¹, with a mean value of 1772 ng·L⁻¹. The total concentrations of 7 carcinogenic PAHs in rain season were all higher than those in dry season in four epikarst springs. The PAHs profiles were dominated by (2-3) rings PAHs in spring water, which accounted for more than 50% of 16 PAHs. The PAHs in spring water mainly originated from the combustion of coal, biomass and petroleum, and during June to October 2011, PAHs originated from the combustion of coal and biomass had a larger contribution. The ratios of Ant/(Ant + Phe) and Fla/(Fla + Pyr) changing with seasons showed that Ant, Phe, Fla and Pyr were easy to migrate in epikarst soils. In 4 isomeric ratios, the ratios of Fla/(Fla + Pyr) were more sensitive to reflect the information of sources. Compared to other areas in the world, the concentration of 16 PAHs in epikarst spring water is at a higher level, which shows the epikarst spring water has been suffered the PAHs pollution.

Key words: epikarst spring; polycyclic aromatic hydrocarbons; seasonal variation; composition; source

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指2个或2个以上的苯环以稠环形式连接在一起的有机化合物,其主要来源于化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧^[1]。由于我国经济和社会的快速发展,能源消耗的增加和大量机动车辆的使用,使得我国正面临着非常严重的PAHs污染。我国PAHs的排放量占到世界总释放量的20%^[2],PAHs的污染问题已经引起了很大关注。近年来,研究人员对西南岩溶地区环境中的PAHs进行了一些研

究^[3~7],表明PAHs在西南岩溶地区环境中迁移、传输有其独特的方式,例如洞穴中的PAHs存在有洞口陷阱效应和洞内色层效应,天坑有地质陷阱效应等,并且一些地下河水已受到苯并[a]芘的污染。表

收稿日期: 2013-09-24; 修订日期: 2013-11-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B021); 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); 重庆市科委院士专项(cstc2013jcyjys20001)

作者简介: 孙玉川(1978~),男,博士,主要研究方向为岩溶环境学、有机地球化学, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

层岩溶泉水主要是储存于表层岩溶带的地下水,为近地面的表层地下水系统^[8]. 作为岩溶地区重要水资源的表层岩溶泉水,由于位置高,开发利用便利,对解决居民、土地较分散的岩溶区人畜用水与农田灌溉具有重要意义^[9]. 表层岩溶泉水中 PAHs 的污染状况,关系到当地居民的饮水安全问题. 然而目前还未见对表层岩溶泉中的 PAHs 动态变化、来源和污染现状的研究报道.

本研究以重庆市南川区典型表层岩溶泉为对象,测定泉水中 PAHs 的含量水平和组成特征,探讨泉水中 PAHs 含量和来源的季节变化以及污染特征,以期表层岩溶泉水的合理开发、利用与保护提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

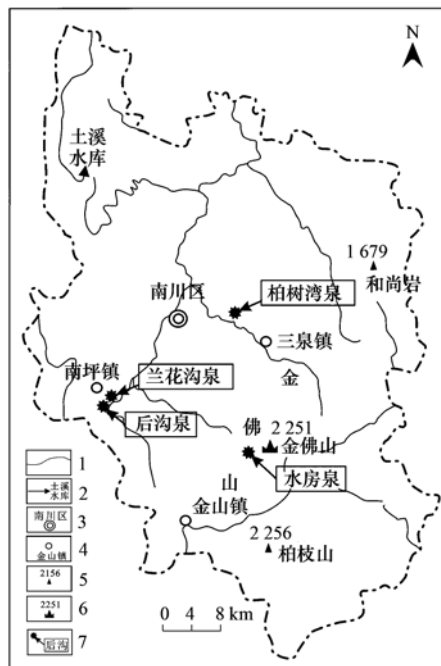
重庆市南川区地处大娄山脉西北侧,地理位置为 $N28^{\circ}46' \sim 29^{\circ}30'$ 和 $E106^{\circ}54' \sim 107^{\circ}27'$, 气候属亚热带季风气候,多云雾、少日照,年均温度 16°C , 年降雨量 $1\,185\text{ mm}$, 集中分布于每年的 4~10 月,占全年降水的 83%^[10]. 南川区经济发展迅速,铝工业、煤化工是其重点打造的两大产业,电力能源以煤电为主. 选取该区的柏树湾泉、兰花沟泉、后沟泉和水房泉等 4 个典型表层岩溶泉为研究对象(图 1). 这 4 个表层岩溶泉均为四季长流泉,其中,后沟泉海拔约 563 m ,柏树湾泉海拔约 783 m ,兰花沟泉海拔约 736 m ,水房泉位于金佛山国家自然保护区,海拔约 $2\,090\text{ m}$.

1.2 样品采集

泉水按月取样,用 1 L 带聚四氟乙烯衬垫的螺旋盖棕色玻璃瓶直接在泉口采集. 水样置于便携式冰箱中避光冷藏运输,尽快送达实验室,放入冰箱于 4°C 冷藏保存,于 7 d 内完成前处理. 其中,后沟泉(HG)、柏树湾泉(BSW)和兰花沟泉(LH)分别采集了 11 个样品,水房泉(SF)采集了 9 个样品. 采样点位置见图 1.

1.3 试剂和材料

样品分析所用的正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯均为农残级,购自美国 Fisher 公司. 玻璃纤维膜(Whatman GF/F, 有效孔径 $0.7\text{ }\mu\text{m}$) 于 450°C 马弗炉中灼烧 6 h,无水硫酸钠(分析纯)于 550°C 马弗炉中灼烧 8 h,分别置于干燥器中冷却密封备用;脱脂棉经二氯甲烷抽提 72 h 后风干,密封干燥备用.



1. 水系; 2. 水库及名称; 3. 南川区; 4. 镇/乡级行政单位;
5. 山峰及高程; 6. 金佛山主峰及高程; 7. 取样点及名称

图 1 研究区及取样点位置示意

Fig. 1 Locations of the study area and samples

16 种优控多环芳烃混标: 萘(Nap)、蒽(Acy)、二氢蒽(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、䓛(Chry)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DaA)、苯并[g,h,i]芘(BgP), 购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司; 5 种回收率指示物: 氘代萘(Nap-D8)、氘代二氢蒽(Ace-D10)、氘代菲(Phe-D10)、氘代䓛(Chry-D12)、氘代芘(Per-D12), 内标物六甲基苯(HMB), 均购自美国 Supelco 公司.

1.4 样品前处理

水样中多环芳烃的提取采用美国 EPA525.2 的方法进行. 取经过玻璃纤维滤膜(有效孔径 $0.7\text{ }\mu\text{m}$) 过滤的水样 1 L, 装入棕色瓶中, 加入回收率指示物(5 种氘代 PAHs) 和农残级甲醇 5 mL, 摇匀, 使用全自动固相萃取系统(美国 Horizon 公司, SPE-DEX 4790) 萃取(C18 膜, 直径 47 mm, 3M 公司), 提取液用 50 mL 鸡心瓶收集, 经干燥、浓缩、置换溶剂后, 氮吹至 $200\text{ }\mu\text{L}$, 加入内标物, 放入 -26°C 冰箱中待测.

1.5 PAHs 检测

PAHs 检测采用 GC-MS(美国 Agilent 公司, 7890A/5975C) 分析, 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱($30.0\text{ m} \times 0.32\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$). 载气为高纯氦气,

流速为 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样口温度 280°C , 升温程序为初始温度 50°C , 保持 1 min 后以 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 200°C , 然后再以 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温至 290°C , 保持 15 min . 无分流进样, 进样量 $1\text{ }\mu\text{L}$. EI 电离源 70 eV , 离子源温度 300°C , 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. 使用内标法对多环芳烃进行定量分析.

1.6 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, 平行样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 $78\% \sim 110\%$ 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 $0.2 \sim 1.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 泉水中多环芳烃组分及含量特征

由表 1 可知, 16 种多环芳烃在表层岩溶泉水中均有检出. 其中 16 种 PAHs 在柏树湾泉中每月均有

检出, 而除了 DaA 外, 其余的 15 种 PAHs 在另外的 3 个泉中每月也均有检出. 泉水中的 16 种 PAHs 含量变化较大, 在后沟泉、柏树湾泉、兰花沟泉和水房泉中, $\sum\text{PAHs}$ 含量范围分别为 $498 \sim 4\,968$ 、 $627 \sim 3\,504$ 、 $341 \sim 3\,193$ 和 $842 \sim 4\,152\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为 $2\,097$ 、 $1\,734$ 、 $1\,608$ 和 $1\,576\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 7 种致癌性 PAHs 的含量也呈现较大的变化, 按后沟泉、柏树湾泉、兰花沟泉和水房泉顺序, 其含量变化分别为 $20.2 \sim 663$ 、 $37.9 \sim 669$ 、 $27.8 \sim 517$ 和 $39.0 \sim 276\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均含量分别为 155 、 263 、 226 和 $151\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 总体而言, 表层泉水中的 $\sum\text{PAHs}$ 平均含量呈现后沟泉 > 柏树湾泉 > 兰花沟泉 > 水房泉的变化趋势, 而 $\sum\text{PAH}_{\text{scarce}}$ 的平均含量呈现与 $\sum\text{PAHs}$ 含量不同的变化趋势, 其变化趋势呈现的是柏树湾泉 > 兰花沟泉 > 后沟泉 $\approx$ 水房泉. 在 4 个表层泉中, Nap、Ace、Acy、Flu 和 Phe 均是主要检测物, 其中在后沟泉和柏树湾泉中, 16 种 PAHs 中 Flu 平均浓度最高, 其含量分别是 $626\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $322\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 而兰花沟泉和水房泉中, 16 种 PAHs 中平均含量最高的是 Nap, 其含量分别是 $332\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $574\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 表层岩溶泉中多环芳烃组分及含量¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

化合物	后沟泉		柏树湾泉		兰花沟泉		水房泉	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
Nap	67.2 ~ 2 440	579	89.9 ~ 622	256	93.4 ~ 834	332	81.6 ~ 2309	574
Acy	24.3 ~ 339	147	28.8 ~ 281	144	22.5 ~ 287	144	28.1 ~ 305	127
Ace	42.9 ~ 539.3	184	59.2 ~ 270	159	38.7 ~ 371	170	63.7 ~ 573	169
Flu	74.8 ~ 4 289	627	78.1 ~ 970	312	44.0 ~ 440	250	88.5 ~ 535	226
Phe	23.4 ~ 1 524	253	30.9 ~ 980	323	23.8 ~ 836	266	29.4 ~ 440	187
Ant	3.3 ~ 176	31.5	5.4 ~ 106	42.7	4.2 ~ 97.8	35.3	5.9 ~ 43.9	21.8
Fla	5.5 ~ 392	70.9	10.9 ~ 288	96.0	5.6 ~ 258	81.4	8.3 ~ 130	51.9
Pyr	7.0 ~ 243	46.8	9.2 ~ 184	70.6	7.6 ~ 166	53.0	9.7 ~ 82.1	37.6
BaA *	3.4 ~ 54.0	16.4	5.3 ~ 54.4	33.1	4.4 ~ 50.6	20.5	5.4 ~ 23.1	14.4
Chry *	4.9 ~ 77.2	23.5	8.5 ~ 140	46.6	4.4 ~ 67.6	25.0	6.8 ~ 42.0	20.6
BbF *	3.2 ~ 55.9	20.1	8.5 ~ 127	44.2	3.7 ~ 59.5	24.3	5.8 ~ 37.0	18.3
BkF *	3.0 ~ 209	31.1	4.9 ~ 137	47.8	3.1 ~ 52.0	23.0	5.1 ~ 22.0	13.9
BaP *	3.5 ~ 54.8	18.8	5.3 ~ 138	37.4	3.7 ~ 59.0	24.6	5.1 ~ 48.9	20.9
InP *	2.3 ~ 101	30.0	4.9 ~ 129	62.7	4.4 ~ 122	54.5	5.2 ~ 76.4	33.0
DaA *	N. D ~ 111	28.0	4.8 ~ 136	60.2	N. D ~ 132	54.6	N. D ~ 75.1	29.7
BgP	2.2 ~ 94.7	27.7	4.6 ~ 165	62.6	3.8 ~ 125	50.1	5.0 ~ 67.2	30.3
$\sum\text{PAHs}$	498 ~ 4 968	2 135	627 ~ 3 504	1 798	341 ~ 3 193	1 608	842 ~ 4 152	1 576
$\sum\text{PAH}_{\text{scarce}}$	20.2 ~ 663	168	37.9 ~ 792	332	27.8 ~ 517	226	39.0 ~ 276	151

1) * 表示致癌性 PAHs; $\text{PAH}_{\text{scarce}}$: 7 种致癌性 PAHs; N. D: 低于检测限

2.2 泉水中多环芳烃含量的变化特征

图 2 为 2010 年 10 月至 2011 年 10 月水房泉、后沟泉、兰花沟泉和柏树湾泉水中 16 种 PAHs 与

7 种致癌性 PAHs 含量的动态变化. 从中可知, 水房泉和后沟泉泉水中的 $\sum\text{PAHs}$ 含量在雨季(2011 年 4 月 ~ 2011 年 10 月)变化较平缓, 旱季(2010 年

11月~2011年3月)变化波动较大,而在柏树湾泉和兰花沟泉中,则表现为雨季的变化幅度大于旱季. 水房泉和后沟泉泉水中 $\sum$ PAHs的平均含量旱季(分别为 $2\,066\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\,823\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)要大于雨季(分别为 $1\,184\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $797\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). 而在兰花沟泉水中, $\sum$ PAHs平均含量雨季($1\,619\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)略高于旱季($1\,570\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). 在柏树湾泉水中,雨季平均含量明显大于旱季(分别为 $2\,183\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\,289\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). 这可能是在降雨条件下,土壤渗透性增强,PAHs在泉域内土层中的迁移能力增强,迁移至泉水中的量增大,然而由于4个表层岩溶泉泉域内生态环境的调蓄能力不同,泉域内的生态环境对雨水的调蓄能力越强,泉水越不易出现暴涨暴落

的现象,泉水流量增大对PAHs含量的稀释效应小于PAHs迁移至泉水中增大效应,则会表现雨季大于旱季的现象. 已有研究表明^[11],4个表层岩溶泉域生态环境的调蓄能力从大到小依次为柏树湾泉>兰花沟泉>水房泉>后沟泉,由此可知,在柏树湾泉和兰花沟泉, $\sum$ PAHs含量主要受从上覆土壤中迁移增大效应的影响,而在后沟泉和水房泉中, $\sum$ PAHs含量主要受稀释效应的影响. $\sum$ PAH_{scarce}均表现为雨季平均含量大于旱季,这是因为这7种致癌性PAHs是4~5环化合物,在土壤中相对较难迁移,而在雨季,由于降雨的作用,泉域内土壤渗透性急剧增强,使其较易迁移,且从土壤中的迁移增大效应要大于流量增大的稀释效应.

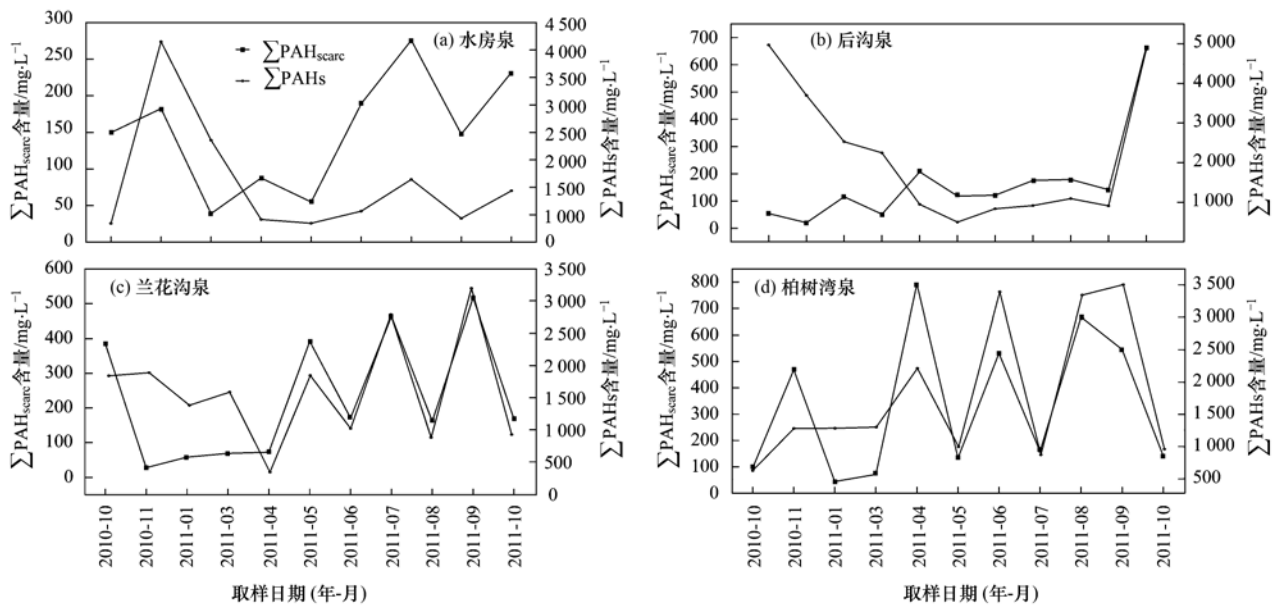


图2 泉水中16种PAHs与7种致癌性PAHs含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic variations of PAHs and PAH_{scarce} concentration in spring water

2.3 泉水中多环芳烃组成变化特征

图3为表层岩溶泉水中多环芳烃组成的动态变化. 从中可知,4个表层岩溶泉中,PAHs组成均是以2~3环的低环PAHs为主,其比例均高于50%,5~6环PAHs的比例均低于39%. 由于2010年10月后沟泉水中的Flu出现异常高值($4\,289\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$),如果不考虑这个月的数据,水房泉、后沟泉和兰花沟泉中PAHs的组成均表现出受降雨的影响,旱季泉水中的低环PAHs比例明显高于雨季,而雨季泉水中4环和5~6环等高分子量的PAHs的比例明显高于旱季. 这主要是因为相对于2~3环PAHs,4~6环PAHs憎水亲脂性更强,在表层土壤中迁移较

难,而2~3环低分子量PAHs则相对易溶于水,较易随土壤水迁移^[12]. 然而由于表层岩溶带的土壤较薄,在降雨的作用下,土壤的渗透能力急剧增强,使得高环PAHs在雨季也较易迁移,从而出现雨季高环PAHs比例增高的现象. 相对于后沟泉、兰花沟泉和水房泉,柏树湾泉水中的PAHs组成在一年中的观测当中变化幅度较小,这表明在柏树湾泉域中,高环PAHs在旱季也有较强的迁移能力. 由于柏树湾泉域内生态环境的调蓄能力是4个表层岩溶泉域中最强的^[11],使得雨水在泉域内保留时间较长,土壤渗透性增强,便于高环PAHs随土壤中的溶解性有机质迁移. 这可能是造成柏树湾泉中PAHs组成

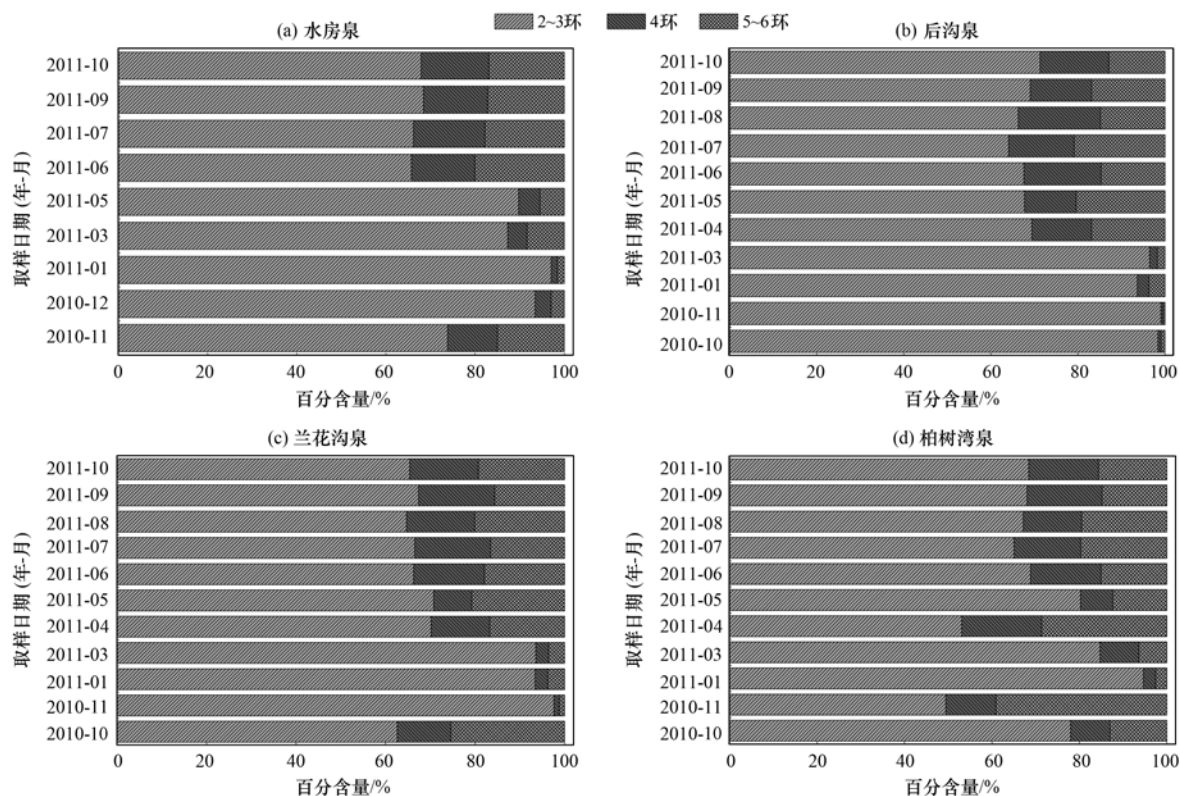


图3 泉水中多环芳烃组成的动态变化

Fig. 3 Dynamic variations of PAHs percentage composition in spring water

变化较小的主要原因。

2.4 泉水中多环芳烃异构体比值变化特征及来源指示

环境中 PAHs 的来源包括天然源和人为源^[13], 且以人为源为主, 人为源主要是生物和化石燃料的不完全燃烧、机动车尾气的排放以及石油开发、运输和石油化工过程的泄漏与排放。同分异构体比值法是判断环境中 PAHs 来源的常用方法之一, 常用以指示 PAHs 来源的同分异构体比值主要有以下 4 种, 分别为: $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgP})$ 。环境介质中, $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值小于 0.1, 指示 PAHs 来自于石油源, 大于 0.1 指示 PAHs 来自于燃烧源; $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值小于 0.40, 表明 PAHs 主要来自石油源, 大于 0.50 表明 PAHs 主要是煤和生物质的燃烧源, 介于 0.40 ~ 0.50 之间则是石油燃烧源; 当 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值小于 0.20 为石油源, 大于 0.35 为燃烧源, 而介于 0.20 ~ 0.35 之间则为混合源; $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BaP})$ 比值小于 0.20 为石油源, 大于 0.50 为煤和生物质燃烧源, 介于 0.20 ~ 0.50 之间为石油燃烧源^[14]。

对水房泉、后沟泉、兰花沟泉和柏树湾泉水

中的 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BgP})$ 比值进行分析, 其在 2010 年 10 月 ~ 2011 年 10 月之间的动态变化见图 4。从中可知, 4 个表层岩溶泉中的 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值均呈现 2010 年 11 月 ~ 2011 年 5 月比值大于 0.1, 而 2011 年 6 ~ 10 月比值小于 0.1, 但均接近于 0.1 的现象, 这可能是由于 Ant 相对于 Phe 更易光解^[14], 由于 2010 年 11 月 ~ 2011 年 5 月观测期间, 雾天较多, 太阳光照不强, 不利于 Ant 降解, 因此这一观测期间的比值能更好的保留源的信息, 更准确地指示 PAHs 的来源; 而在 2011 年 6 ~ 10 月观测期间, 无大雾天, 太阳光照强, 利于 Ant 光解, 会造成该比值降低。此外在这一观测期间, 气温较高, 石油类物质易于挥发, 也会造成该比值降低。水样中的 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值与 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值类似, 比值的变化可明显地分为两个时间段, 与 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值不同的是 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值在 2011 年 6 ~ 10 月观测期间的比值要明显大于 2010 年 11 月 ~ 2011 年 5 月的比值, 这可能是由于南川区的电力供应主要来自于煤电^[15], 2011 年 6 ~ 10 月, 气温较高, 居民用电增加, 煤的需求量增大, 因此这一期间煤燃烧发电产生的 PAHs 对泉水中的 PAHs 要大

于其它时间段. 由于 Fla 和 Pyr 在环境中具有相似的降解速率^[14,16], 因此 Fla/(Fla + Pyr) 比值能更准确地反映 PAHs 来源的信息. 结合 Ant/(Ant + Phe) 和 Fla/(Fla + Pyr) 的比值可知, 2011 年 6 ~ 10 月观测期间, 较低的 Ant/(Ant + Phe) 比值应该主要是来自于 Ant 的光解, 该比值指示的应该是来自于燃烧源的贡献.

在一年的观测期间, 泉水中 BaA/(BaA + Chry) 比值变化波动较大, 除个别月份比值小于 0.35 外, 其

余月份均大于 0.35. 水房泉、后沟泉、兰花沟泉和柏树湾泉水中 BaA/(BaA + Chry) 比值在一年观测期间的平均值分别为 0.43、0.42、0.45 和 0.44, 均大于 0.35, 指示泉水中 PAHs 主要来自于燃烧源.

由图 4 可知, InP/(InP + BgP) 比值在一年的观测期间, 除个别月份的比值低于 0.5, 但均大于 0.2 外, 其余月份的比值均大于 0.5, 而且全年观测的平均值也均大于 0.5, 指示泉水中的 PAHs 主要来自于煤和生物质的燃烧.

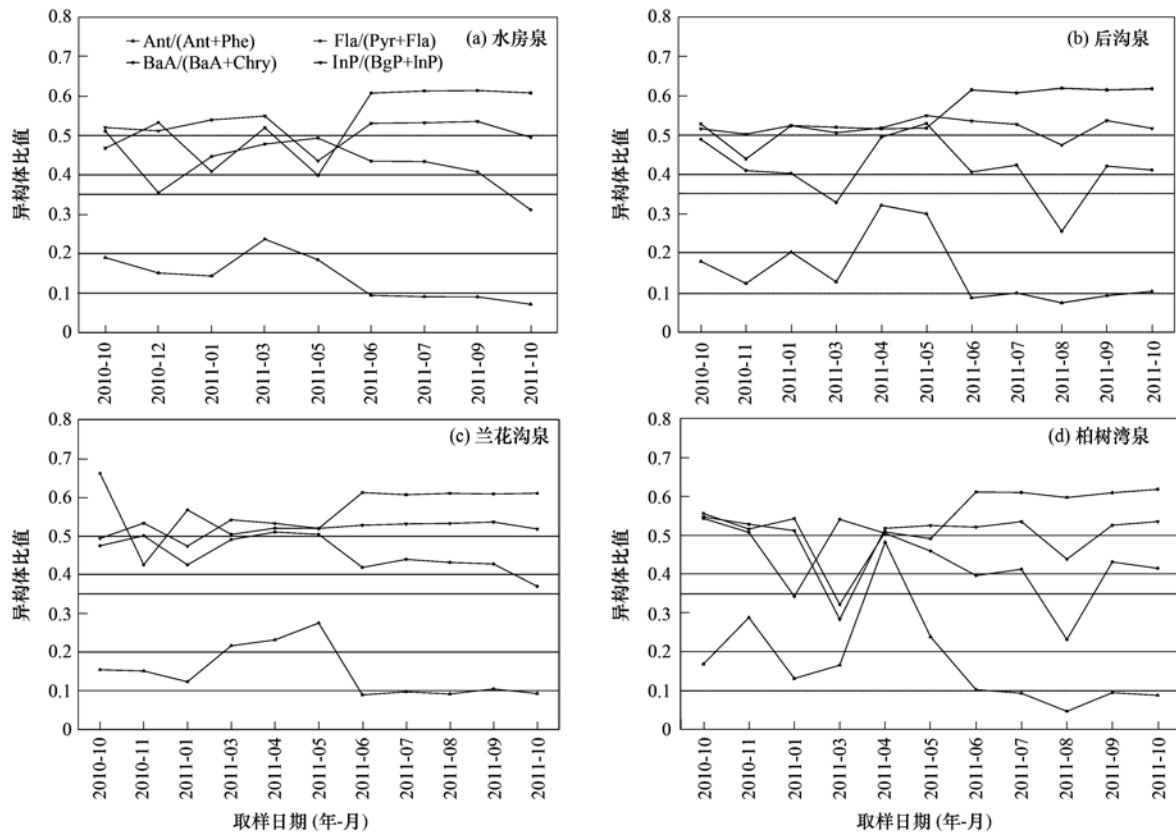


图 4 泉水中多环芳烃异构体比值动态变化

Fig. 4 Dynamic variation of PAHs isomeric ratios in spring water

结合泉水中 Ant/(Ant + Phe)、BaA/(BaA + Chry)、Fla/(Fla + Pyr) 和 InP/(InP + BgP) 比值可知, 泉水中的 PAHs 主要来自于煤、生物质、石油的不完全燃烧, 并且 2011 年 6 ~ 10 月期间, 来源于煤、生物质燃烧的 PAHs 对泉水中 PAHs 的贡献要更大一些. Ant/(Ant + Phe) 比值和 Fla/(Fla + Pyr) 比值随季节变化的特点表明, Ant、Phe、Fla 和 Pyr 在环境中更易于在表层岩溶带土壤中迁移、传输. 4 个同分异构体比值中, Fla/(Fla + Pyr) 比值对 PAHs 来源的信息指示更为灵敏, Ant/(Ant + Phe) 比值对环境信息反应较为敏感.

2.5 泉水中 PAHs 的污染程度及成因

表 2 列出了我国饮用水水质标准、荷兰地下水水质标准和加拿大水质标准中规定的多环芳烃限值. 根据这些标准, 结合表 1 可知, 4 个表层岩溶泉中, 均有多个月份的泉水中的 PAHs 和 BaP 超过我国生活饮用水卫生标准规定的限值, 其中柏树湾泉 2011 年 4 月水样中的 BaP 含量超过限值 13 倍之多.

在一年的观测期间, 研究区表层岩溶泉水中的 Phe、Fla、BaA、BkF、BaP、InP 含量均超过了荷兰地下水标准中规定的限值, 2011 年 4 月、6 ~ 10 月水样中 Ant 的含量超过了荷兰地下水标准中规定的限值; 根据加拿大的水质标准可知, 所研究的表层岩溶泉水中的 DaA、Phe、BaA、BbF、BaP 和 InP、

BgP 含量均有多个月份超过该标准。

有关地下水中 PAHs 的研究相对较少,与已有的研究相比,本研究表层岩溶泉水中的 PAHs 含量明显高于细河流域地下水(159.1 ~ 483.7 ng·L⁻¹,平均值为 234.5 ng·L⁻¹)^[17]、北京市东南郊灌区地下水(9.11 ~ 1 069.52 ng·L⁻¹,平均值 151.63 ng·L⁻¹)^[18]以及广西大石围天坑地下水(54.7 ~ 192.0 ng·L⁻¹,平均值为 102.3 ng·L⁻¹)^[6],但要低于太湖平原城近郊浅层地下水(0.004 ~ 32.449 μg·L⁻¹,中值为 2.281 μg·L⁻¹)^[19]。与其它地区地表水相比,本研究中 PAHs 含量要明显低于闽江口(9 900 ~ 474 000 ng·L⁻¹)^[20]、九龙河口(6 960 ~ 26 900 ng·L⁻¹)^[21]和印度的 Gomti 河水(1 033 ~

19 940 ng·L⁻¹)^[22],与珠江广州段(987.1 ~ 2 878.5 ng·L⁻¹)^[23]相当,明显高于海河(115 ng·L⁻¹)^[24]和美国密西西比河(5.6 ~ 68.9 ng·L⁻¹)^[25]。

以上结果表明 4 个表层岩溶泉已受到了多环芳烃的污染,而且污染程度较重,应引起当地居民和政府有关部门的注意。作为岩溶区多环芳烃贮存库的表层岩溶带土壤,是表层岩溶泉水的潜在污染源。由于表层岩溶带具有独特的水文地质特征,含水介质内在结构的不均一性,加上表层岩溶带土层薄,厚度不均一,覆盖不连续^[26,27],土壤渗透性较强,从而降低了土层对 PAHs 的缓冲、净化作用,致使土壤中的 PAHs 极易进入地下水中,直接威胁到岩溶地区饮水安全。

表 2 多环芳烃水质标准/ng·L⁻¹

Table 2 Standards for water quality of PAHs/ng·L⁻¹

水质标准 ¹⁾	Nap	Phe	Ant	Fla	Pyr	Chry	BaA	BaP	BbF	BkF	BgP	DaA	InP	PAHs
中国	— ²⁾	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	2 000
荷兰	100	20	20	5	—	2	2	1	—	1	2	—	0.4	—
加拿大	200	200	200	—	200	—	10	10	10	—	—	10	10	—

1) 中国 2006 年生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006); 荷兰地下水水质标准^[28]; 加拿大水质标准^[29]; 2) “—”表示空缺

3 结论

(1) 16 种 PAHs 在 4 个表层岩溶泉中均有检出, ∑PAH_{scarce} 的含量均表现为雨季大于旱季。

(2) 4 个表层岩溶泉中, PAHs 均是以 2 ~ 3 环 PAHs 为主,其比例均超过 50%。其中在水房泉、后沟泉和兰花沟泉,雨季高环 PAHs 比例增加,低环 PAHs 比例降低,由于柏树湾泉域土壤较强的调蓄作用,使得泉水中的 PAHs 组成在一年的观测当中变化幅度较小。

(3) 泉水中的 PAHs 主要来自于煤、生物质、石油的不完全燃烧,而且 2011 年 6 ~ 10 月期间,来源于煤、生物质燃烧的 PAHs 对泉水中 PAHs 的贡献要更大一些。Ant/(Ant + Phe) 和 Fla/(Fla + Pyr) 比值随季节变化的特点表明 Ant、Phe、Fla 和 Pyr 在表层岩溶带土壤中易于迁移、传输。4 个同分异构体比值中,Fla/(Fla + Pyr) 比值对源信息的指示更灵敏,而 Ant/(Ant + Phe) 比值对环境信息反应较为敏感。

(4) 4 个表层岩溶泉的泉水已受到多环芳烃的污染,应引起当地居民和政府有关部门的注意。

致谢:感谢西南大学地理科学学院付允、毛海红、蓝家程在野外、实验和文章撰写过程中的帮助,在此表示由衷的感谢!

参考文献:

[1] Dugay A, Herrenkencht C, Czok M, *et al.* New procedure for selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants for gas chromatographic-mass spectrometric analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2002, **958**(1-2): 1-7.

[2] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(3): 702-708.

[3] 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 等. 广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3905-3915.

[4] 王英辉, 祁士华, 袁道先, 等. 广西岩溶洞穴土壤中多环芳烃污染特征与解析[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1255-1259.

[5] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 表层岩溶带土壤中多环芳烃分布特征及来源解析[J]. 中国岩溶, 2013, **32**(1): 79-87.

[6] 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.

[7] Wang Y H, Qi S H, Chen J H, *et al.* Concentration, distribution and sources of polyaromatic hydrocarbons in soils from the karst tiankengs, South China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **83**(5): 720-726.

[8] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. 中国岩溶, 2005, **24**(3): 250-254.

[9] 梁小平, 朱志伟, 梁彬, 等. 湖南洛塔表层岩溶带水文地球化学特征初步分析[J]. 中国岩溶, 2003, **22**(2): 103-109.

[10] 高彦芳, 沈立成, 杨平恒. 重庆金佛山地下水的氮污染源研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, **18**(6): 23-26.

- [11] 李林立. 西南典型岩溶区生态环境对表层岩溶水调蓄功能的影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2009. 47-76.
- [12] 何江涛, 金爱芳, 陈素媛, 等. 北京东南郊污灌区 PAHs 垂向分布规律[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1260-1266.
- [13] Wilcke W, Amelung W, Krauss M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) patterns in climatically different ecological zones of Brazil [J]. Organic Geochemistry, 2003, **34**(10): 1405-1417.
- [14] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River Basin; A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.
- [15] 游正焜. 重庆南川市电力能源需求预测与可持续发展对策研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007. 25-41.
- [16] Tobiszewski M, Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources [J]. Environmental Pollution, 2012, **162**(1): 110-119.
- [17] 罗庆, 孙丽娜, 张耀华. 细河流域地下水中多环芳烃污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 959-964.
- [18] 金爱芳. 不同灌溉条件下多环芳烃在包气带中的迁移规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010. 64-75.
- [19] 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.
- [20] Zhang Z L, Hong H S, Zhou J L, *et al.* Phase association of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Minjiang River Estuary, China [J]. Science of the Total Environment, 2004, **323**(1-3): 71-86.
- [21] Maskaoui A, 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.
- [22] Malik A, Verma P, Singh A K, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and bed sediments of the Gomti River, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **172**(1-4): 529-545.
- [23] Mai B X, Luo X J, 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.
- [24] 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.
- [25] Mitra S, Bianchi T S. A Preliminary assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon distributions in the lower Mississippi River and Gulf of Mexico [J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 273-288.
- [26] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 2000, **19**(2): 103-108.
- [27] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 207.
- [28] Annokée G J. MT-TNO research into the biodegradation of soils and sediments contaminated with oils and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH's) [A]. In: Wolf K. Contaminated Soil [C]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1990. 941-945.
- [29] CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment; Interim Canadian Quality criteria for contaminated sites [R]. Report CCME EPC-CS3. Winnipeg. Manitoba, Canada, 1991. 26-27.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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