

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任崴, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 吴伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征

苗迎, 孔祥胜*

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为了确定多环境介质中多环芳烃的浓度、组成和分布特征, 采集南宁市冬夏季空气、大气干湿沉降物、土壤和地下水样品, 利用 16 种多环芳烃的成分谱, 结合其物理化学性质, 分析多环芳烃在多环境介质中的浓度、组成和分布特征, 结果表明: ①空气和大气干湿沉降物中 PAHs 均以 2~3 环为主, 由于冬夏季差异性, 冬季 $\sum$ PAHs 浓度高于夏季; ②土壤中 PAHs 以 2~3 环为主, 且土壤颗粒粒径分布差异性是导致不同层位 PAHs 分布特征差异的主要原因; ③地下水中 PAHs 检出种类少, 检出量小, 也表明土壤包气带能够“截留”较多的 PAHs; ④16 种 PAHs 在不同环境介质中质量分数均呈现由低环向高环递减的趋势, 且两地区冬夏季 2~3 环和 5~6 环 PAHs 在各环境介质中分布特征具有较好的一致性, 但也有一定的差异. 这与 PAHs 的理化性质、水文地质条件、城市污染状况、天气状况等方面有关.

关键词: 多环境介质; 多环芳烃; 分布特征; 南宁; 第四系

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4333-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201603240

Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City

MIAO Ying, KONG Xiang-sheng*

(Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to understand the contamination characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental media, the authors collected samples of air, atmospheric dry and wet depositions, soil and groundwater in winter and summer in Nanning, using component spectra of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons, combining with the physical and chemical properties, analyzed concentration, composition and distribution characteristics of the PAHs in different environment media, the results showed that PAHs with 2 to 3 rings were dominant in the air and atmospheric dry and wet depositions, and $\sum$ PAHs in winter were higher than in summer because of the seasonal differences. And PAHs with 2 to 3 rings were dominant in soil, too. Distribution difference of soil particle diameter was the main reason for the PAHs distribution characteristics in different horizons. And species of PAHs in groundwater were fewer, with lower concentrations, which showed that soil vadose zone could entrap more PAHs. The mass fraction of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental media presented a decreasing trend from low rings to high rings, and the distribution characteristics of PAHs with 2 to 3 rings and 5 to 6 rings in different environmental media in two areas in winter and summer had good consistency, but also had certain differences because of the physical and chemical properties of PAHs, hydro-geological conditions, urban pollution, weather conditions, etc.

Key words: multiple environmental media; polycyclic aromatic hydrocarbon; distribution characteristic; Nanning; quaternary

据 2010 年国际癌症研究机构研究表明, 多环芳烃(PAHs) 是环境毒性有机污染物的重要组成部分之一, 其具有“致癌、致畸、致突变”的三致作用, 可以经食物链对生态系统和人类健康造成潜在威胁. 环境中的多环芳烃主要来源于化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧^[1], 由于其持久性而广泛存在于多种环境介质中.

目前, 有关多环芳烃在大气^[2,3]、土壤^[4~6]、水体^[7,8]、沉积物^[9,10]等单环境介质中的污染特征和来源分析多见报道, 然而针对空气-大气干湿沉降-土壤(含包气带)-地下水的多环境介质的研究较少. 本文选取南宁市第四系冲洪积砂卵砾石层孔隙水系

为研究对象, 采集冬夏两季空气、大气干湿沉降物、土壤和孔隙地下水样品, 利用 16 种 PAHs 的成分谱和特征比值, 结合物理化学性质, 重点分析多环芳烃在空气-大气干湿沉降-土壤(含包气带)-孔隙水中多环芳烃的浓度、组成和分布特征, 通过研究多环境介质中 PAHs 的分布、迁移和转化规律, 以期对地下水开发利用及保护提供科学依据.

收稿日期: 2016-03-31; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2015007); 湘江上游岩溶流域 1:5 万水文地质环境地质调查项目(DD20160303)

作者简介: 苗迎(1987~), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为岩溶地下水污染、岩溶水文地质, E-mail: miaoying.1988@karst.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: karstkxs@126.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图1所示,研究区为南宁市环城高速以内,沙井采样点位于邕江南侧,二水采样点位于邕江北侧,均位于南宁市区居民生活密集,商业交通发达的地区,可控制南宁市区各环境介质中PAHs的分布。

研究区属于湿润的亚热带季风气候,具有夏长炎热、冬寒短暂、降雨丰富的特点。年平均气温在21.6℃左右,年平均降雨量达1 304.2 mm,相对湿度

为79%,全年盛行东南、东、东北风^[11]。

研究区位于南宁盆地西南部邕江江畔的冲积平原,南宁盆地为北东东向向斜构造盆地,状似橄榄。地层以第四系冲洪积层为主,岩性为黏土、亚黏土、粉砂、砂卵砾石层等。地貌主要由邕江河漫滩和I~IV级阶地组成。地下水以松散岩类孔隙水为主,充沛的降雨量为地下水提供了较好的补给来源,松散岩类便于地下水的径流,邕江从西到东切割整个地层,成为研究区地表水和地下水的最终排泄通道。

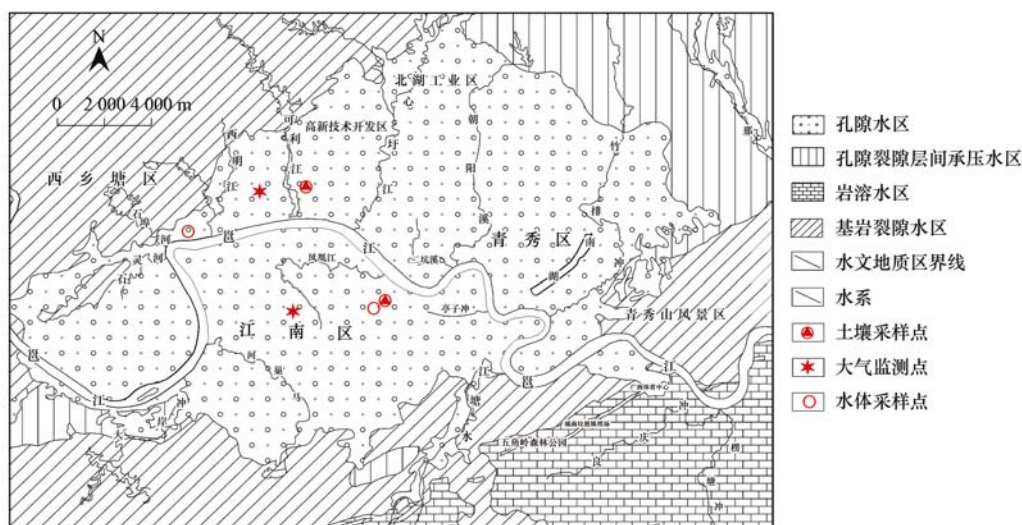


图1 研究区地理位置和采样点位置分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area and sampling sites

1.2 样品采集

依据研究区不同功能分区和全年盛行风向,选取西乡塘区第二水文队和江南区沙井街道办为研究地点,即主导风向下风向。夏季于2011年8月4日至11月4日,冬季于2011年11月4日至2012年1月4日,分别采集空气和大气干湿沉降样品。并于2011年8月采集夏季地下水样品和土壤样品,于2011年11月采集冬季地下水样品。

参照文献[12~15]中空气和大气干湿沉降样品的采集方法,将空气被动采样器和大气干湿沉降采集器安置于距离地面约10 m高的建筑物顶部,详见图2。其中,大气干湿采样器的塑料桶中加入5 mL 20%的硫酸铜作为杀菌剂抑制藻类生长,并用锡箔纸包裹遮光。空气被动采样器中最关键的是聚氨酯泡沫(PUF),用于采集空气中的有机污染物^[16~18],其规格为:直径14 cm,厚度1.35 cm,表面积365 cm²,净重4.04 g,体积207 cm³,密度0.021 3 g·cm⁻³,每天吸收2.0~3.5 m³空气。在实验室经

索氏萃取法用二氯甲烷循环蒸馏24 h抽提净化后拿到野外安装使用。水样采用美国生产容积为1 L的有机专用棕色玻璃瓶,采样过程中必须保证一次性迅速采集,并且瓶内无气泡,最后密封低温保存;土样采用250 mL棕色广口玻璃瓶装满压实密封。以上所有样品均置于保温箱4℃保存,尽快送往实验室进行检测。

测试的16种优控多环芳烃为2~3环萘(Nap)、萘烯(Acy)、萘(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)和荧蒽(Fla),4环芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)和苯并[k]荧蒽(BkF),5~6环苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DaA)和苯并[ghi]芘(BgP)。

1.3 样品测试分析

1.3.1 主要试剂与仪器

二氯甲烷和正己烷(农残级)、丙酮(HPLC级)均需作溶剂空白实验,满足需求后使用;无水硫酸

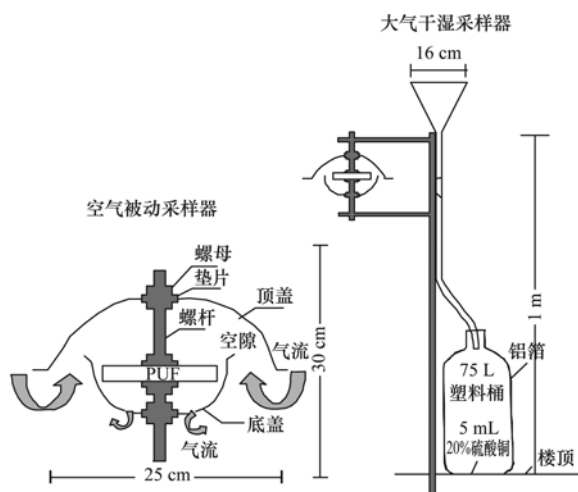


图2 样品采集装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of samplers

钠(分析纯)在 500℃ 的马弗炉中焙烧 4 h 冷却干燥备用;硅胶(0.154 mm 或 0.098 mm)使用前置于浅盘中 130℃ 活化至少 16 h,金属铝箔覆盖,冷却干燥备用;氧化铝(层析用)240℃ 活化 12 h,待冷至室温再加入其重量的 3% 的去离子水降活性,平衡后保存于干燥器备用;PAHs 回收率指示物(美国 Supeco):含二氢萘-d10、萘-d8、菲-d10、蒽-d12 和花-d12;内标标准:六甲基苯。

高效液相色谱仪(LC-Vpseries)、荧光检测器(RF-10Ax1)、紫外检测器(SPD-10Avp/SPD-10AVvp),索氏提取器。

1.3.2 样品提取和净化

大气干湿沉降物:首先用石英过滤器分离降尘和降水。取 1 000 mL 降水于分液漏斗中并加二氯甲烷 25 mL 及 PAHs 回收率指示物,静置分层后将二氯甲烷相分离到平底烧瓶中,用 25 mL 二氯甲烷萃取 3 次后浓缩至约 2 mL,加正己烷 1 mL 用硅胶/氧化铝层析柱(1 cm 内径)净化(层析柱为干法装柱,由下至上装入 6 cm 硅胶及 3 cm 氧化铝)。浓缩液净化分离后用 25 mL 体积比 2:3 的二氯甲烷/正己烷混合液淋洗柱体,最终浓缩至 0.5 mL 后,于 2 mL 细胞瓶中氮吹至 0.2 mL,加内标物 4 μ L(六甲基苯)进行定量分析。

土壤和降尘:土壤样品经干燥粉碎过 100 目筛后称取 20.0 g,加二氯甲烷 120 mL 和 PAHs 回收率指示物,用二氯甲烷做萃取剂索氏萃取 24 h,同时加铜片脱硫,萃取浓缩至 5 mL。降尘干燥称重后以下步骤同土壤分析。以下步骤同降雨。

空气样品:首先对采集空气样品的 PUF 称重,用微量注射器注射 PAHs 回收率指示物至 PUF 中,

采用索氏萃取法用二氯甲烷(萃取剂)萃取 48 h,萃取物浓缩至 2 mL。以下步骤同降雨。

水样:取 1 L 上清液加入二氯甲烷 25 mL 及 PAHs 回收率指示物萃取。以下步骤同降水。

1.3.3 仪器分析条件

高效液相色谱仪(LC-Vpseries)条件:分析时间 35 min,流动相流速 1.5 mL $\cdot$ min⁻¹,柱温箱温度控制 30℃,进样量 10 μ L,紫外光谱范围 190 ~ 300 nm, Waters PAH C₁₈ 色谱柱(12 nm, 5 μ m, 4.6 mm $\times$ 250 mm)。

1.3.4 质量控制与质量保证(QA/QC)

所有样品测试均在国家地质实验测试中心完成,实验的仪器分析流程控制均符合美国 EPA 的要求。每批样品分析一个空白、平行、空白加标样品是从取样到检测进行质量保证和质量控制的关键因素,并且所有样品加入回收率指示物来检测样品损耗情况。其中,空白样品中目标化合物无检出,平行样品和对应样品相对标准偏差低于 10%,空白加标样品检出值也在可控范围之内。本研究中空气样品的回收率为 117% ~ 124%;降雨样品的回收率为 73.5% ~ 114%;降尘样品的回收率为 97.3% ~ 109%;土壤样品的回收率为 83% ~ 115%;地下水样品的回收率为 77.2% ~ 102%。

具体测试方法、质量控制/质量保证和检出限见文献[19 ~ 23]。

2 结果与讨论

研究区各环境介质中 PAHs 的组成及浓度见表 1。

2.1 空气中 PAHs 的浓度和组成特征

南宁市区各环境介质中 PAHs 的浓度和组成见表 1。各环境介质中 16 种 PAHs 均有检出。空气中沙井采样点冬季 Acy、Fla、Pyr 和 DaA 未被检出,夏季 Fla、BaP 和 DaA 未被检出;二水采样点冬季 Acy 和 DaA 未被检出,夏季 Phe、Fla、BaP、DaA 和 BgP 未被检出。沙井和二水冬季、沙井和二水夏季空气中 PAHs 均以 2 ~ 3 环为主,比重分别为 89.42%、73.83%、81.30%、56.17%,这是由于低分子量 PAHs 具有较高的蒸气压(PL),易于挥发,因此更多地存在于气相中,这与祁士华等^[24]、卢丽等^[25]研究结果相一致。沙井和二水冬季、沙井和二水夏季空气中 $\sum$ PAHs 浓度分别为 56.88、121.53、35.3 和 42.94 ng $\cdot$ m⁻³,可以看出冬季 $\sum$ PAHs 浓度普遍远

表 1 研究区各环境介质中 PAHs 的含量¹⁾

PAHs	空气(冬)		空气(夏)		干湿(冬)		干湿(夏)		土壤(沙井)			土壤(二水)		地下水(冬)		地下水(夏)	
	/ng·m ⁻³		/ng·m ⁻³		/ng·(m ² ·d) ⁻¹		/ng·(m ² ·d) ⁻¹		/ng·g ⁻¹			/ng·g ⁻¹		/ng·L ⁻¹		/ng·L ⁻¹	
	沙井	二水	沙井	二水	沙井	二水	沙井	二水	A 层	B 层	C 层	B 层	C 层	沙井	二水	沙井	二水
Nap	15.02	17.66	10.32	14.89	72.38	—	—	13.49	14.7	21.6	15.8	27.3	29.8	580	—	—	—
Acy	—	—	0.43	1.28	—	—	6.54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ace	0.60	1.19	0.96	1.01	5.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Flu	10.76	12.18	3.60	5.82	23.85	34.49	6.48	22.55	11.5	10.9	5.7	—	10.1	—	—	—	—
Phe	23.89	35.04	12.84	—	37.84	36.41	19.68	55.11	39.5	19.9	12.7	20.7	41.7	—	—	—	—
Ant	0.59	0.51	0.55	1.12	3.64	2.96	—	—	40.4	20.3	12.8	—	—	—	43.7	—	—
Fla	—	23.15	—	—	27.42	44.37	—	—	30.4	3.04	2.56	—	43.1	—	—	7.09	—
Pyr	—	21.24	4.08	11.94	30.16	39.74	13.15	28.03	20.2	1.33	2.63	—	33.0	—	—	4.77	—
BaA	0.99	2.07	0.32	1.17	4.44	10.46	2.15	—	11.4	—	—	5.44	12.0	—	4.74	—	—
Chr	2.13	3.5	1.22	3.0	12.72	14.48	6.36	14.87	61.6	1.04	2.11	9.67	20.7	—	—	—	3.92
BbF	1.14	1.73	0.47	1.54	9.27	15.73	8.78	22.61	13.8	—	—	16.2	25.2	—	—	—	—
BkF	0.42	0.73	0.18	0.75	2.6	6.08	—	—	12.2	—	—	5.15	8.6	—	—	—	2.05
BaP	0.24	0.49	—	—	3.15	9.05	1.9	11.55	3.2	—	—	7.35	8.08	—	—	—	—
DaA	—	—	—	—	—	—	—	—	4.87	—	—	—	29.5	—	—	—	—
InP	0.56	0.98	0.16	0.42	—	—	4.28	21.01	4.11	—	—	11.9	13.0	—	—	—	—
BgP	0.53	1.05	0.18	—	—	—	5.53	28.25	14.2	—	—	15.6	18.4	—	—	—	—
∑ PAHs	56.88	121.53	35.3	42.94	233.06	213.78	63.88	217.47	282.08	78.11	54.3	119.31	293.18	580	48.44	4.77	5.97
2~3 环	50.86	89.73	28.7	24.12	170.72	118.24	32.7	91.16	136.5	75.74	49.56	48.0	124.7	580	43.7	—	—
4 环	4.69	29.28	6.26	18.41	59.19	86.5	19.47	65.51	119.2	2.37	4.74	36.46	99.5	—	4.74	4.77	5.97
5~6 环	1.33	2.52	0.34	0.42	3.15	9.05	11.71	60.81	68.98	—	—	34.85	34.85	—	—	—	—

1) “—”为未检出;二水地区 A 层土壤运输过程瓶体破裂,无结果;土壤 A 层为 0~20 cm、B 层为 30~50 cm、C 层为 60~80 cm

远高于夏季,这是由于冬季温度低,阳光辐射差,不利于空气中 PAHs 的降解;另外夏季雨水丰富,对空气中的污染物有很好的清洗作用。

2.2 大气干湿沉降物中 PAHs 的通量和组成特征

大气干湿沉降物中沙井采样点冬季 Acy、DaA、InP 和 BgP 未被检出,夏季 Nap、Ace、Ant、Fla、BkF 和 DaA 未被检出;二水采样点冬季 Nap、Acy、Ace、DaA、InP 和 BgP 未被检出,夏季 Acy、Ace、Ant、Fla、BaA、BkF 和 DaA 未被检出。沙井和二水冬季、沙井和二水夏季大气干湿沉降物中 2~3 环 PAHs 比重分别为 73.25%、51.18%、55.31%、41.92%,相比于空气降低了 18.07%~37.06%,4 环比重上升,主要原因为大气干湿沉降中 PAHs 主要以溶解相和颗粒相存在,低分子量 PAHs 具有较低的正辛醇-水分配系数(K_{ow} 值),容易溶解在雨水中;随着分子量的增加,PAHs 更倾向于以吸附态存在,并且其具有较高的正辛醇-水分配系数(K_{ow} 值)和较低的蒸气压(PL),导致 PAHs 挥发性逐渐降低,很难溶于水而易于吸附在颗粒相上^[26~28],因此大气干湿沉降中 PAHs 以 2~

4 环为主。

沙井和二水冬季、沙井和二水夏季大气干湿沉降物中 ∑ PAHs 分别为 233.06、213.78、63.88 和 217.47 ng·(m²·d)⁻¹,沙井采样点冬季 PAHs 沉降通量远高于夏季,这是由冬夏两季不同的气候特点造成的。然而,二水采样点冬夏两季相差不大,可能与夏季取样期间二水地区施工修路、开发新居民小区有关,一是大量机动车尾气排放造成 PAHs 源增加,二是施工期间产生大量扬尘有利于 PAHs 吸附,并且扬尘阻碍 PAHs 的光解和挥发,导致二水地区夏季大气干湿沉降中 ∑ PAHs 明显升高。

2.3 土壤中 PAHs 的浓度和组成特征

沙井采样点 A 层、B 层、C 层和二水采样点 B 层、C 层中 ∑ PAHs 分别为 282.08、78.11、54.3、119.31 和 293.18 ng·g⁻¹,沙井和二水地区土壤平均值分别为 138.16 ng·g⁻¹ 和 206.25 ng·g⁻¹,土壤中 PAHs 主要集中在 2~4 环。据文献[29]得知,如果土壤未受污染或受轻微污染时,以 2~3 环 PAHs 为主,污染严重时以 4~6 环为主,本研究区与其他地

区对比,远低于北京(平均值 $1\,637\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[30]、天津(平均值 $1\,148\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[31]等地区,由此可见研究区内土壤中的 PAHs 浓度处在较低的水平。

沙井采样点 A 层、B 层、C 层中 Acy、Ace、Ant 一直未检出,其余 PAHs 的检出种类和浓度均随深度减少;二水采样点 B 层、C 层中 Acy、Ace 一直未检出,其余 PAHs 检出种类和浓度大部分随深度增加。两地区土壤 PAHs 浓度和分布特征差别较大,主要与地层岩性有关。沙井位于邕江 II 级阶地,地层岩性主要为黏土、亚黏土,由表 2 可知,沙井采样点土壤颗粒粒径为 $0.05\sim0.002\text{ mm}$ 占 86.5% ,土壤过滤性能好,将大部分污染物质截留在上层土壤;

二水位于邕江 I 级阶地,地层岩性主要为砂砾石、砂土砾石,土壤颗粒粒径偏大,难以截留过多的污染物质,因此 PAHs 在向下运移的过程中逐步富集,主要集中在 C 层。此外,夏季强烈的气温辐射也可能对表层土壤中 PAHs 浓度产生一定的干扰,沙井土壤样品采集是在上午 $09:00\sim10:00$,太阳辐射不是很强烈,气温也不是很高,气温辐射对表层土壤的干扰较小;二水土壤样品采集是在中午 $13:00\sim14:00$,太阳辐射最强,温度最高,气温辐射对表层土壤有很大的干扰。因此两地区土壤 PAHs 浓度和分布特征的差别主要因素为地层岩性的差异,气温辐射可能为次要因素。

表 2 研究区土壤颗粒组成质量分数¹⁾/ %
Table 2 Mass fraction of soil particles in the study area/ %

项目		颗粒大小/mm				
		0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	0.005~0.002
二水地区	A 层	1.5	26.9	3.1	35.1	33.4
	B 层	2.4	28.9	2.5	35.9	30.3
	C 层	—	16.8	2.4	36.4	44.4
沙井地区	B 层	—	10.6	5.5	41.8	42.1
	C 层	—	6.4	4.5	41.7	47.4

1) “—”为未检出;沙井地区 A 层土壤丢失,无结果;土壤 A 层为 $0\sim20\text{ cm}$ 、B 层为 $30\sim50\text{ cm}$ 、C 层为 $60\sim80\text{ cm}$

2.4 孔隙水中 PAHs 的浓度和组成特征

由表 1 可知,地下水中 PAHs 检出种类少,检出血量小,分布没有明显规律性。在夏季,沙井采样点仅有 Pyr 检出,浓度为 $4.77\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,二水采样点有 Chr、BkF 检出,浓度分别为 $3.92\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.05\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,结合土壤中 PAHs 浓度情况可知,PAHs 多数被截留在土壤中,因此地下水中 PAHs 检出种类少,检出血量小。在冬季,沙井采样点仅有萘(Nap)检出,浓度高达 $580\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,萘是 16 种 PAHs 中溶解度最高($31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和挥发性最强(饱和蒸气压 13 Pa)的有机物,正辛醇-水的分配系数(K_{ow})为 3.37,相对亲水性最强。在低温下(13°C)萘的挥发性受到抑制,易溶解到降雨中入渗地下;而夏季温度高(36°C),萘在随降雨至地表时大量挥发,因此夏季检测不到萘;二水采样点有 Ant、BaA 检出,浓度分别为 $43.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.74\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,虽然夏季土壤样品中没有检出 Ant,但冬季空气和大气干湿沉降样品中均检测出 Ant,不排除冬季土壤中也含有 Ant。

2.5 不同环境介质中 PAHs 的分布特征及联系

PAHs 为半挥发性有机物,其不同环境介质中的含量与 PAHs 的理化性质、水文地质条件、城市污染状况、天气状况等方面有关。由图 3 可以看

出,16 种 PAHs 在不同环境介质中质量分数均呈现由低环向高环递减的总趋势。其中,空气中 PAHs 所占质量分数随着分子量增大由 $55\%\sim90\%$ 减至 5% 以下,表明空气中以 2~3 环 PAHs 为主,主要取决于 2~3 环 PAHs 分子量小易气化、蒸气压高易挥发的物化性质;大气干湿沉降中 PAHs 质量分数随着分子量变化不大,降雨有利于低环 PAHs 溶解于水中,颗粒物有利于高环 PAHs 吸附,因此各环 PAHs 质量分数分布较均匀;土壤中 PAHs 质量分数随分子量增大的递减趋势最小,表明分子量不是影响 PAHs 在土壤中富集的重要因素,主要原因是土壤中富含有机物质和微生物,有利于 PAHs 的吸附和降解。

由图 3 可知,PAHs 在沙井和二水地区冬夏两季相同环境介质中的成分谱线基本相似。沙井和二水地区冬季,2~3 环 PAHs 在各环境介质中分布特征为空气>大气干湿沉降>土壤,5~6 环为土壤>大气干湿沉降≈空气;沙井和二水地区夏季,2~3 环 PAHs 在各环境介质中分布特征为空气>土壤>大气干湿沉降,5~6 环为大气干湿沉降>土壤>空气。两地区冬夏季 2~3 环和 5~6 环 PAHs 在各环境介质分布特征一致性表明其与

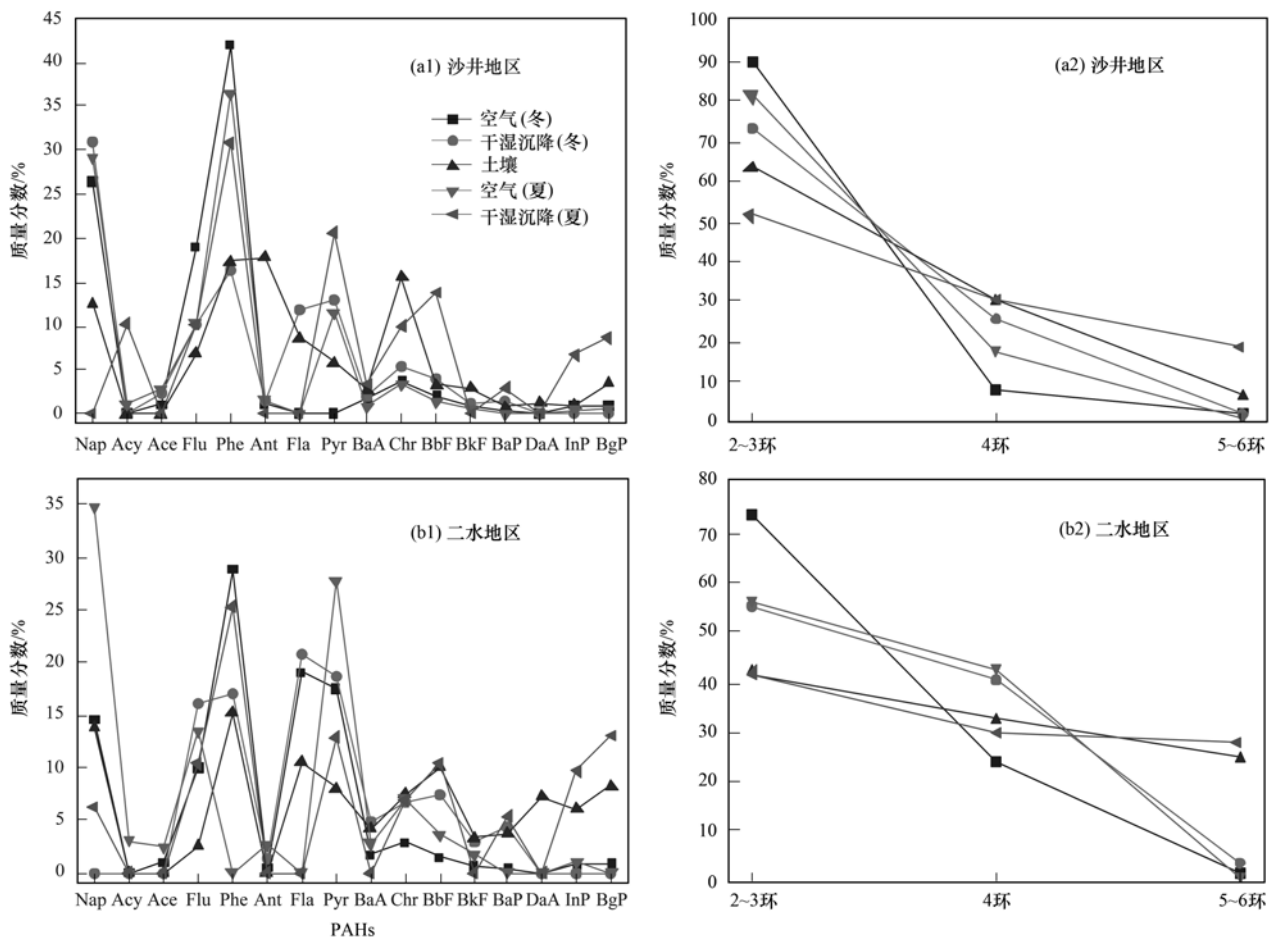


图3 研究区环境介质中16种PAHs的成分谱

Fig. 3 Component spectra of 16 PAHs in the environmental media of the study area

PAHs 的物理化学性质、气象因素(如温度、风力等)有关。

3 结论

(1)沙井和二水冬夏季空气、大气干湿沉降物和土壤中均以2~3环PAHs为主。冬季空气、大气干湿沉降物、地下水中PAHs的含量明显高于夏季,主要原因是冬季温度低,阳光辐射差,不利于空气中PAHs的降解;土壤中PAHs浓度和分布特征差别较大的主要因素是地层岩性和土壤颗粒粒径,气温辐射次之。

(2)16种PAHs在空气、大气干湿沉降、土壤中质量分数均呈现由低环向高环递减的总趋势,在相同环境介质中16种PAHs的成分谱线基本相似。

(3)两地区冬夏季2~3环和5~6环PAHs在各环境介质分布特征具有较好的一致性,但也有一定的差异。PAHs分布特征与PAHs的理化性质、水文地质条件、城市污染状况、天气状况等方面有

关,主要由PAHs的物理化学性质决定。

参考文献:

- [1] 窦哈, 常彪, 魏志成, 等. 国内民用燃煤烟气中多环芳烃排放因子研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(11): 1783-1788.
Dou H, Chang B, Wei Z C, *et al.* Emission factors of PAHs in residential coal combustion in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(11): 1783-1788.
- [2] 张利飞, 杨文龙, 董亮, 等. 利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3339-3346.
Zhang L F, Yang W L, Dong L, *et al.* PUF passive air sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere of the Yangtze River Delta, China: spatio-temporal distribution and potential sources[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3339-3346.
- [3] Pozo K, Estellano V H, Harner T, *et al.* Assessing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using passive air sampling in the atmosphere of one of the most wood-smoke-polluted cities in Chile: the case study of Temuco[J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 475-481.
- [4] 章迪, 曹善平, 孙建林, 等. 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 711-718.
Zhang D, Cao S P, Sun J L, *et al.* Occurrence and spatial differentiation of Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils

- from Shenzhen, China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [5] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 等. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 253-261.
- Li J Y, Wu D, Xu Y S, *et al.* Recent distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 253-261.
- [6] Bortey-Sam N, Ikenaka Y, Nakayama S M M, *et al.* Occurrence, distribution, sources and toxic potential of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils from the Kumasi Metropolis, Ghana[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **496**: 471-478.
- [7] 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 等. 温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4226-4236.
- Zhou J C, Chen Z L, Bi C J, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban rivers of Wenzhou city [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4226-4236.
- [8] Valavanidis A, Vlachogianni T, Triantafyllaki S, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface seawater and in indigenous mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from coastal areas of the Saronikos Gulf (Greece) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **79**(4): 733-739.
- [9] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评估[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 839-846.
- Mu Q L, Fang J, Shao J B, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Yangtze estuary and Zhejiang coastal areas [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 839-846.
- [10] 王彬, 董发勤, 湛书, 等. 草海及其入湖河口表层沉积物中 PAHs 的污染特征及其风险评估[J]. *矿物学报*, 2016, **36**(1): 19-24.
- Wang B, Dong F Q, Zhan S, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in surface sediment of Lake Caohai and its estuaries in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016, **36**(1): 19-24.
- [11] 南宁(广西壮族自治区首府)[EB/OL]. (2016-06-19). <http://baike.baidu.com/subview/4277/17185152.htm#2>.
- [12] Garban B, Blanchoud H, Motelay-Massei A, *et al.* Atmospheric bulk deposition of PAHs onto France: trends from urban to remote sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(34): 5395-5403.
- [13] 孔祥胜, 苗迎. 大气干湿沉降: 地下河多环芳烃的重要来源——以广西清水泉地下河为例[J]. *地球学报*, 2014, **35**(2): 239-247.
- Kong X S, Miao Y. Atmospheric depositions, PAHs sources of an underground river; a case study of the Qingshuiquan Underground River [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, **35**(2): 239-247.
- [14] 孔祥胜, 苗迎. 南宁市郊空气和大气干湿沉降物中多环芳烃的污染特征[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(8): 34-42.
- Kong X S, Miao Y. Pollution characteristic of PAHs in the atmospheric deposition and air of Nanning suburb [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2014, **36**(8): 34-42.
- [15] Moon H B, Kannan K, Lee S J, *et al.* Atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in an urban and a suburban area of Korea from 2002 to 2004 [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **51**(4): 494-502.
- [16] Harner T, Pozo K, Gouin T, *et al.* Global pilot study for persistent organic pollutants (POPs) using PUF disk passive air samplers [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(2): 445-452.
- [17] Jaward F M, Farrar N J, Harner T, *et al.* Passive air sampling of PAHs and PCNs across Europe [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, **23**(6): 1355-1364.
- [18] 刘向, 张干, 李军, 等. 利用 PUF 大气被动采样技术监测中国城市大气中的多环芳烃[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 26-31.
- Liu X, Zhang G, Li J, *et al.* Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of China cities using PUF-passive air sampler[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 26-31.
- [19] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 大石围天坑群地下河沉积物中 PAHs 的污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(8): 42-48, 159.
- Kong X S, Qi S H, Oramah I T, *et al.* Contaminant and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Bailang Underground River in karst area, Guangxi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(8): 42-48, 159.
- [20] 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.
- [21] 孔祥胜, 祁士华, 孙骞, 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.
- Kong X S, Qi S H, Sun Q, *et al.* Transport and differentiation of polycyclic aromatic hydrocarbons in air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4212-4219.
- [22] 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.
- Kong X S, Qi S H, Jiang Z C, *et al.* Environmental factors on distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3905-3915.
- [23] 饶竹, 李松, 何森. 高效液相色谱-荧光-紫外串联测定土壤中 16 种多环芳烃[J]. *分析化学*, 2007, **35**(7): 954-958.
- Rao Z, Li S, He M. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by high performance liquid chromatography with fluorescence and ultraviolet detection [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, **35**(7): 954-958.
- [24] 祁士华, 傅家谟, 盛国英, 等. 澳门大气降尘中优控多环芳烃研究[J]. *环境科学研究*, 2001, **14**(1): 9-13.
- Qi S H, Fu J M, Sheng G Y, *et al.* Study on priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in dustfall at Macao [J]. *Research of Environmental Science*, 2011, **14**(1): 9-13.
- [25] 卢丽, 王喆, 裴建国. 岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 862-868.

- Lu L, Wang Z, Pei J G. Contamination characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in multimedium in karst underground river [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 862-868.
- [26] 刘炎坤, 汪青, 刘敏, 等. 上海市大气沉降物中多环芳烃赋存特征及其来源[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2605-2614.
- Liu Y K, Wang Q, Liu M, *et al.* Concentration characteristics and potential sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric deposition in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2605-2614.
- [27] 王静, 朱利中. 交通干线空气中多环芳烃的干、湿沉降[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 471-474.
- Wang J, Zhu L Z. Preliminary exploration of fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air of dry, wet deposil [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(4): 471-474.
- [28] 陈宇云, 朱利中. 杭州市多环芳烃的干、湿沉降[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1720-1723.
- Chen Y Y, Zhu L Z. The dry, wet deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in Hangzhou city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(7): 1720-1723.
- [29] 卢丽, 王喆, 裴建国. 广西岩溶区某地下河系统多种介质中多环芳烃的分布特征[J]. *现代地质*, 2015, **29**(2): 324-330.
- Lu L, Wang Z, Pei J G. Environment characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in multimedia in underground rivers of Guangxi karst areas [J]. *Geoscience*, 2015, **29**(2): 324-330.
- [30] Li X H, Ma L L, Liu X F, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(5): 944-950.
- [31] 李静, 吕永龙, 焦文涛, 等. 天津滨海工业区土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2111-2117.
- Li J, Lv Y L, Jiao W T, *et al.* Concentration and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in the industrial area of Tianjin, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 2111-2117.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行