

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析

卢丽, 王喆*, 裴建国

(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: 为了确定岩溶地下河系统内不同环境介质中多环芳烃(PAHs)的污染特征及来源, 选择典型的清水泉地下河为研究对象, 采用2013~2014年同期采集的空气、地下河水、沉积物和土壤样品测试数据, 运用16种多环芳烃(PAHs)的成分谱、分布特征和特征比值, 结合其物理化学性质进行对比分析。结果表明, 空气和地下河水以萘(Nap)、菲(Phe)和荧蒽(Fla)这3种2~3环PAHs为主, 其中空气的2~3环PAHs比例为71.66%, 地下河水的2~3环PAHs比例为54.84%, 而沉积物和土壤以4~6环PAHs为主, 其中沉积物的4~6环PAHs比例为54.26%, 土壤的4~6环PAHs比例为65.06%; 环境介质中PAHs的浓度变化表明上游小于中游, 中游小于下游, 这与污染源排放、吸附作用等相关; PAHs来源解析表明, 上游乡村地区PAHs来源以草、木、煤燃烧源为主, 敢怀村天窗附近显示为石油源, 地下河出口处PAHs来源则以石油源和燃烧源的混合源为主。

关键词: 多环芳烃; 岩溶地下河; 环境介质; 组成; 来源

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0862-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.015

Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River

LU Li, WANG Zhe*, PEI Jian-guo

(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 PAHs in different environmental mediums of karst underground river, the authors chose the Qingshuiquan underground river as the study object. Based on the data of air, groundwater, sediment and soil samples collected during the same period from 2013 to 2014, contrastive analysis was conducted in light of the component spectra, the distribution features and the characteristic ratios as well as the chemical and physical properties of 16 kinds of PAHs. The results showed that 3 kinds of PAHs with 2-3 rings (naphthalenes, phenanthrene and fluoranthene) were dominant in the air and underground river water, which accounted for 71.66% and 54.84% of the total PAHs. And PAHs with 4-6 rings were dominant in the soil and sediment of the underground river, which accounted for 54.26% and 65.06% of the total PAHs. The distribution of PAHs in environmental mediums along the underground river indicated that the mean concentration PAHs in upstream area was less than that of midstream, and that of midstream was less than that of downstream, because of pollution discharge and absorption. The ratios of specific PAHs indicated that the PAHs sources in upstream rural area mainly came from the combustion of grassy, wood and coal, the PAHs sources in Ganhuai village were mainly originated from petroleum, and the PAHs sources in the outlet of the underground river mainly came from both petroleum and its combustion.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; karst underground river; environmental medium; composition; source

多环芳烃(PAHs)是一类具有致癌性、致畸性、致突变性和生物难降解性, 对环境和人体有着严重危害的持久性有机污染物。美国环境保护署已经确定16种PAHs为优控污染物^[1], 其主要来源是化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧^[2]。岩溶地下河是岩溶地区主要的水资源载体, 也是城乡供水的重要水源^[3], 但由于其特殊的含水结构, 尤其是通过落水洞、地下河入口等点状补给方式往往会使污染物直接进入含水层而无任何过滤作用, 因此地下河极易遭受污染, 且污染后很难治理。随着经济不断发展, 人类活动日益增强, PAHs污染逐渐严重, 地下河正在逐步变成各地排污的下水道^[4], PAHs一旦进入地下河, 由于其自身特点和地下空间特

殊的环境特性, 使得PAHs长时间残留, 造成持续性的污染, 因此对地下河PAHs开展研究有着重要的意义。

目前有关PAHs研究多集中在非岩溶区的地表水^[5~11]、空气^[12~17]、土壤^[18~21]等方面, 而针对岩溶地区, 多数学者只研究地下河系统单一环境介质内的PAHs^[22~24], 多环境介质的则研究较少, 因此本

收稿日期: 2014-08-21; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772164); 环境保护公益性行业科研专项(2013A035); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121164); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(201309)

作者简介: 卢丽(1985~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为地下水污染调查与评价, E-mail: luli@karst.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangzhe@karst.ac.cn

文不是只对单一介质开展研究,而是重点研究地下河系统中多环境介质内的 PAHs 的特点. 以广西南宁清水泉地下河为研究对象,分析地下河系统内空气、地下河水、沉积物和土壤这 4 种环境介质中 PAHs 的污染水平、组成、分布特征及主要来源,有助于研究地下河系统内有机污染物的分布、迁移和归趋规律,以期为岩溶地下河系统污染防治及管理提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清水泉地下河位于广西南宁市邕宁区蒲庙镇(图 1),多年平均降雨量 1 235.2 mm,地貌为溶蚀残丘,相对高差 20 ~ 60 m,区内水系发育. 研究区面积约 55 km²,出露地层主要为石炭系中、上统厚层灰

岩夹白云岩(C₂、C₃)、白垩系下统粉砂岩(K₁)和第三系古新统粗砂岩(E₁). 在灰岩裸露区,地下河出口、天窗和落水洞较为发育,而在非岩溶区,由于碎屑岩覆盖层较厚(50 ~ 300 m),地表无岩溶形态发育(天窗、落水洞等). 地下河自东向西流动,经过 QS06、QS09、QS11 号天窗(图 1),在 QS16 处流出地表形成溪流,地下河管道全长 7 km,地下河出口枯水期流量为 900 L·s⁻¹,目前已在地下河出口处修建水厂,供水能力为 5 万 m³·d⁻¹,为南宁市重要的地下水水源地. 研究区内污染源分为工业污染源、生活污染源和农业污染源这 3 种. 工业污染源为造纸厂和水泥厂 2 家企业、3 座高架烟筒和加油站;生活污染源为研究区内约 1 万人所产生的生活污水和生活垃圾;农业污染源为耕地和园地所使用的农药、化肥,以及养殖场排放的废水.

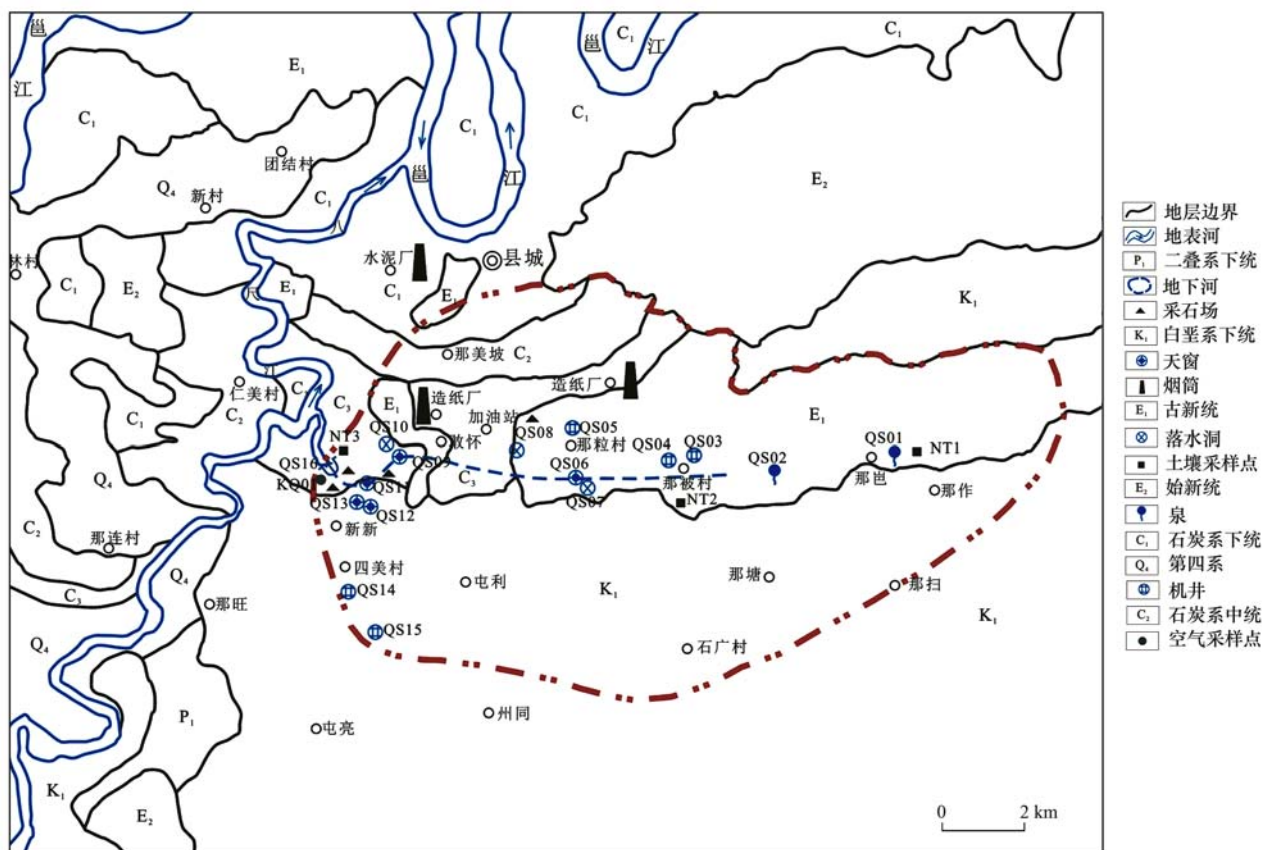


图 1 研究区位置及采样点位示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 样品采集

2013 年 11 月至 2014 年 1 月采集研究区内的环境空气样,2014 年 1 月采集地下河水、沉积物和土壤样品. 根据污染源分布情况及当地风向(主导风向为西风),空气采样点布设在地下河出口处(KQ01),该点代表了研究区污染源集中区的空气情

况. 由于采样期为冬季,部分水点水位较低甚至干涸,考虑到取样难度和反映研究区上中下游的特点等因素,顺地下河流动方向分别布置地下河水采样点 6 个(QS01、QS02、QS04、QS09 和 QS16),沉积物采样点 2 个(QS04-CJ 和 QS09-CJ)、土壤采样点 3 个(NT1、NT2 和 NT3),所有采样点如图 1 所示. 这

些采样点的选取基本上能够反映整个研究区上、中、下游各部分的环境介质的特点。

空气样采用聚氨酯泡沫 (PUF) 被动采样器采集^[25~27], 其中 PUF 碟片为圆形饼状, 规格为: 半径 7 cm, 厚度 1.5 cm, 表面积 154 cm², 体积 231 cm³, 重量 4.5 g; 地下河水样用采水器在水点处直接采集; 沉积样用抓斗式采泥器采集水点底部表层沉积样 1 kg, 装于棕色广口瓶中; 土壤样用不锈钢铲采集 0~20 cm 表层土壤样。采集样品后, 空气样用聚乙烯塑料袋密封, 地下河水样用 1 000 mL 有机棕色专用瓶密封, 沉积样放置于棕色广口瓶内, 土壤样则置于聚乙烯封口袋内。上述所有样品用车载冰箱 4℃ 冷藏, 尽快运至实验室, 并于 7 d 内完成预处理。

1.3 试剂与材料

样品分析所用的二氯甲烷、正己烷和丙酮试剂均为农残级, 购自美国 Fisher 公司。无水硫酸钠 (分析纯) 于烘箱中 480℃ 马弗炉中灼烧 5~6 h, 置于干燥器中冷却备用; 硅胶和氧化铝分别于 180℃ 和 250℃ 活化 24 h, 待冷却至室温时再加入其质量 3% 的超纯水降活, 平衡后, 加入正己烷储于干燥器中备用。滤纸和脱脂棉经二氯甲烷抽提 72 h 后风干, 密封干燥备用。EPA 规定的 16 种优控 PAHs 混标购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司, PAHs 回收率指示物为氘代萘、氘代二氢萘、氘代菲、氘代蒽和氘代芘, 内标物为六甲基苯, 购自美国 Supelco 公司。

1.4 样品前处理

空气样品前处理: 对空气采集样品 PUF 进行称重, 将 PAHs 回收率指示物放入样品中, 根据索氏萃取法利用二氯甲烷循环蒸馏 48 h, 将萃取物浓缩为 5 mL, 并溶解交换为正己烷, 用体积比为 1:2 的氧化铝与二氧化硅色谱柱分离净化。净化柱采用湿法装柱, 由下至上依次装入 10 cm 的硅胶, 5 cm 的氧化铝, 2 cm 无水硫酸钠。然后用体积比为 2:3 的 25 mL 二氯甲烷/正己烷混合液淋洗柱体, 再将过柱液体浓缩至 0.5 mL, 接着转移至 2 mL 细胞瓶中, 用氮气吹至 0.2 mL, 加入 4 μL 六甲基苯放入冰箱中待测。

地下河水样前处理: 水样预处理前静置 24 h, 将上层清液倒入分液漏斗中, 取经过玻璃纤维滤膜 (有效孔径) 过滤的水样 1 L, 加入 25 mL 二氯甲烷及 PAH 回收率指示物, 摇匀混合液后静置分层, 将液体浓缩至约 2 mL, 以下处理步骤与空气样品分析相同。

沉积物样品前处理: 对沉积物样品进行冷冻干燥、研磨和过筛, 称取 20.0 g 样品。将 PAHs 回收率

指示物放入每个样品中, 根据索氏萃取法利用二氯甲烷循环蒸馏 48 h, 将萃取物浓缩为 5 mL, 以下处理步骤与空气样品分析相同, 整个过程净化效果较好。

土壤样品前处理: 土壤样品经冷冻干燥机干燥和研磨后通过 100 目不锈钢筛子, 称取 20.0 g 样品。基于索氏萃取法利用二氯甲烷循环蒸馏 24 h, 萃取物被浓缩至 2 mL, 以下处理步骤与空气样品分析相同。

1.5 PAHs 的分析测试

PAHs 检测采用气相色谱-质谱联用仪 (美国 Agilent 公司, 7890A), 毛细管柱: HP-5MS (30.00 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。进样口温度 270℃, 升温程序为初始温度 40℃, 持续 4 min, 以 5℃·min⁻¹ 升温至 300℃, 持续 12 min。载气为高纯氦气, 连续流动速率为 1 mL·min⁻¹, 无分流进样, 进样量 1 μL, 采用内标法和多点校正曲线对 PAHs 进行定量分析。测试的 16 种优控多环芳烃为 2~3 环包括萘 (Nap)、蒽 (Acy)、芘 (Ace)、苊 (Flu)、菲 (Phe)、蒽 (Ant) 和荧蒽 (FlA), 4 环包括芘 (Pyr)、苯并[a]蒽 (BaA)、䓑 (Chr)、苯并[b]荧蒽 (BbF) 和苯并[k]荧蒽 (BkF), 5~6 环包括苯并[a]芘 (BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘 (InP)、二苯并[a,h]蒽 (DaA) 和苯并[ghi]芘 (BgP)。

1.6 质量控制与质量保证

本实验的仪器分析流程控制均符合美国 EPA 的要求, 质量控制与质量保证的措施参见文献[28~31]。利用空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样对整个实验过程进行质量保证和质量控制, 其中空白样品中无目标化合物检出, 加标平行样和样品平行样的相对标准偏差均低于 10%。每个样品在萃取前加入回收率指示物用来检测样品的耗损情况。本研究中空气样品的回收率为 75%~95%, 平均值为 84.0%, 地下河水样品的回收率为 83%~105%, 平均值为 94.5%; 沉积物样品的回收率为 78%~97%, 平均值为 85.5%; 土壤样品的回收率为 81%~102%, 平均值为 89.6%。

2 结果与讨论

2.1 不同环境介质中 PAHs 的浓度和组成特征

清水泉地下河系统各环境介质中 PAHs 的浓度和组成见表 1。空气中 $\sum$ PAHs 浓度为 112.34 ng·m⁻³, 以萘、菲和荧蒽为主的 2~3 环, 占 71.66%, 检出率较低, 有苯并[a]蒽、苯并[b]荧

蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]蒽和苯并[ghi]花这 7 种 PAHs 未检出. 地下河水中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 146.87 ~ 219.96 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 175.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 以 2 ~ 3 环的蔡、菲和荧蒽为主, 占 54.84%, 检出率除了茚和茚并[1,2,3-cd]芘外, 其余 PAHs 均为 100%; 一般情况下, 如果地下河未受污染或轻微污染时, 水中 PAHs 以 2 ~ 3 环为主, 但如果污染严重时则以 4 ~ 6 环为主^[23], 本研究与该现象基本吻合. 沉积物中 PAHs 平均浓度为 61.79 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 以 4 ~ 6 环 PAHs 为

主, 占 54.26%, 除苯并[k]荧蒽和苯并[ghi]花外, 其余 PAHs 检出率均为 100%. 土壤中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 17.85 ~ 32.55 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 24.61 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 以 4 ~ 6 环 PAHs 为主, 占 65.06%, 16 种 PAHs 均检出. 综上所述, 空气和地下河水均以蔡、菲和荧蒽为主, 而沉积物和土壤则以 4 ~ 6 环 PAHs 为主, 由图 2 可以看出, 不同环境介质中已检出的 PAHs 成分谱比较相似, 这说明它们的组成有较好的一致性; 从污染水平来看, 研究区的空气、地下河水、沉积物和土壤中的 PAHs 尚处在较低的水平.

表 1 清水泉地下河各环境介质中 PAHs 的浓度¹⁾

Table 1 Concentrations of PAHs in environmental mediums from the Qingshuiquan underground river											
PAHs	KQ01 (空气) / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	地下河水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$					地下河沉积物/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		土壤/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		
		QS16	QS09	QS04	QS02	QS01	QS09-CJ	QS01-CJ	NT3	NT2	NT1
Nap	19.38	32.94	12.66	34.37	27.14	31.17	6.19	4.10	2.27	1.17	3.15
Acy	4.82	2.89	1.85	2.89	2.86	2.86	1.10	1.02	0.16	0.14	0.09
Ace	6.52	3.91	4.34	3.58	3.42	3.84	1.85	1.74	0.23	0.27	0.24
Flu	10.86	3.30	16.24	nd	nd	nd	2.86	2.71	0.45	0.38	0.42
Phe	17.62	26.02	35.12	17.43	18.24	22.65	6.77	5.67	2.65	1.65	2.01
Ant	1.34	2.19	3.86	3.00	2.77	2.85	0.55	0.73	0.21	0.27	0.23
FlA	19.96	32.29	17.89	28.03	28.06	21.22	4.80	16.44	3.88	3.91	2.03
Pyr	21.30	38.54	29.16	18.45	16.17	10.53	8.82	4.10	4.22	0.32	0.46
BaA	nd	11.04	5.06	6.80	12.54	11.76	2.38	3.51	1.25	0.50	1.69
Chr	10.54	26.44	24.18	12.32	9.95	10.18	11.76	2.13	4.70	0.34	0.98
BbF	nd	11.39	5.53	7.75	7.91	9.92	3.54	3.98	2.02	0.95	2.01
BkF	nd	7.23	7.23	5.07	5.28	6.40	nd	3.09	1.50	1.25	1.20
BaP	nd	9.20	6.28	6.21	5.98	5.94	2.49	2.02	1.77	1.87	1.40
InP	nd	nd	nd	nd	nd	nd	5.23	3.63	3.83	3.29	nd
DaA	nd	4.80	3.30	4.50	2.20	2.60	1.06	1.52	1.10	1.76	0.64
BgP	nd	7.78	4.54	5.54	5.67	4.95	2.35	nd	2.32	1.81	1.31
2 ~ 3 环	80.50	103.54	91.96	89.30	82.49	84.59	24.12	32.41	9.84	7.79	8.17
4 环	31.84	94.64	71.16	50.39	51.85	48.79	26.50	16.81	13.69	3.36	6.34
5 ~ 6 环	0.00	21.78	14.12	16.25	13.85	13.49	11.13	7.16	9.01	8.73	3.35
$\sum$ PAHs	112.34	219.96	177.24	155.94	148.19	146.87	61.75	56.38	32.55	19.87	17.85

1) nd 表示未检出

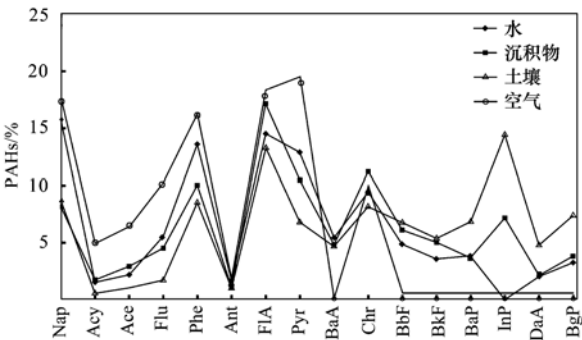


图 2 环境介质中 16 种 PAHs 的成分谱

Fig. 2 Component spectra of 16 PAHs in the environmental mediums of the study area

2.2 不同环境介质中 PAHs 的分布特征

由图 3 和图 4 所示, 清水泉地下河水中 PAHs 分布为: 上游 PAHs 值 < 中游 PAHs 值 < 下游 PAHs 值, 而沉积物和土壤中 PAHs 分布为: 上游 PAHs 值 < 中游 PAHs 值 < 下游 PAHs 值, 且沉积物 PAHs 值 > 土壤 PAHs 值, 浓度逐渐增大的原因有两方面, 一方面是由上游到下游, 污染源(烟筒、加油站、采石场等)不断增多, 导致地下河水、沉积物和土壤的 PAHs 不断聚集, 浓度逐渐增大; 另一方面, 由于采样时间为冬季, 温度低, 阳光辐射差, 不利于 PAHs 的挥发和降解.

由图 5 可见, 上游和中游地下河水 QS1、QS2

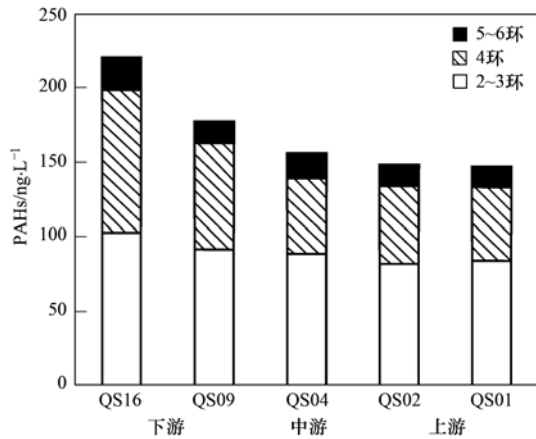


图3 地下河水中 PAHs 的分布

Fig. 3 Distribution of PAHs in water from the underground river

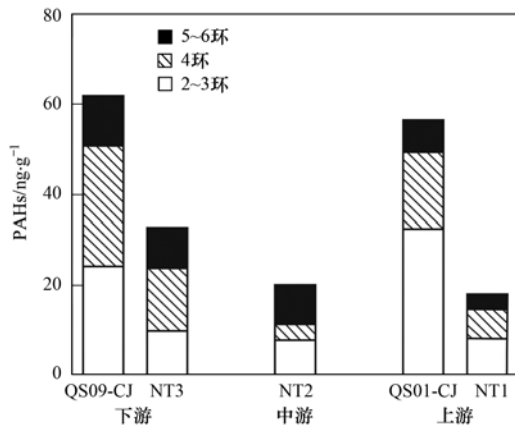


图4 沉积物和土壤中 PAHs 的分布

Fig. 4 Distribution of PAHs in sediments and soils from the underground river

和 QS3 的 2~3 环 PAHs 百分比(质量分数,下同)为 55.67%~57.60%,变化不大,但到下游时,2~3 环 PAHs 百分比开始降低,至地下河出口处(QS16),其百分比降低 10.23%,PAHs 以 4~6 环为主,这可能与下游污染源(采石场、加油站等)汇入有关. 沉积物和土壤的变化趋势也与地下河水的相同,沉积物 2~3 环 PAHs 百分比由 57.48%降低到 39.49%,土壤的 2~3 环 PAHs 百分比则由 45.75%降低到 30.24%,其产生原因除了沿途不断有污染源汇入外,另一个是因为 4~6 环 PAHs 正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$ 为 5.18~6.75)较大,更倾向于被沉积物和土壤等固相介质所吸附.

通过对比同一区域的地下河水、沉积物和土壤的 PAHs 百分比可以看出,2~3 环 PAHs 百分比的特征:地下河水>沉积物>土壤,而 4~6 环百分比则呈相反趋势(如 QS09、QS09-CJ 和 NT3),这是由 PAHs 的物理化学性质造成的. 2

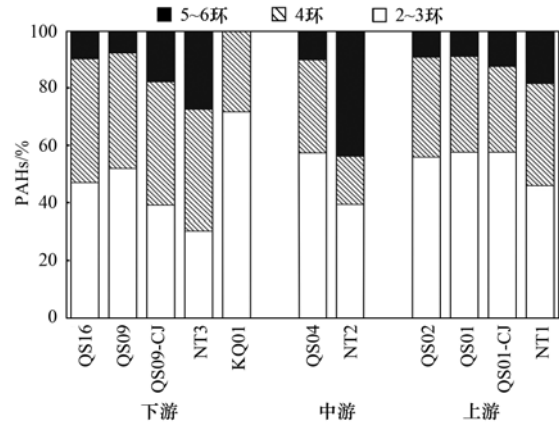


图5 不同环境介质中 PAHs 组分百分比

Fig. 5 Percentage of PAH components with different ring numbers in the environmental mediums from the underground river

~3 环 PAHs 因正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$ 为 3.37~4.57)较小,主要存在于水相中,而高环 PAHs 因正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)较高,具有强烈的疏水亲颗粒性而紧密吸附于沉积物或土壤的颗粒物中. 但是沉积物中的高环 PAHs 比例为什么低于土壤的呢? 一般来说,地下河沉积物的来源包括两个部分,一是地表物质的输入,如地表土壤、沉积质等从地表迁移至地下;二是地下物质的迁移,即地下河沉淀作用、化学物理风化和崩裂等,这导致沉积物成分复杂,可能会被高环 PAHs 比例较低的物质所稀释. 而土壤中的 PAHs 是沉降、吸附等作用长期累积的结果,高环 PAHs 在土壤中不易挥发,导致土壤中高环 PAHs 的比例较高,此外土壤有机质的构成差异也可能是产生该现象的原因之一.

2.3 环境介质中 PAHs 的来源分析

国内外学者^[32~34]经常用同分异构体比值法判断环境介质中 PAHs 来源,因此本研究用苯并[a]蒽/[苯并[a]蒽+䓑][$BaA/(BaA + Chr)$]和荧蒽/[荧蒽+芘][$FlA/(FlA + Pyr)$]的比值判断清水泉地下河系统内 PAHs 的来源,计算结果见表 2. 根据 Yunker 等^[35]归纳的结果,环境介质中,当 $BaA/(BaA + Chr) < 0.2$ 时,表明 PAHs 来源为石油源;当 $0.35 < BaA/(BaA + Chr)$ 时,PAHs 来源为燃烧源;当 $0.2 < BaA/(BaA + Chr) < 0.35$, PAHs 来源为二者的混合源. 当 $FlA/(FlA + Pyr) < 0.4$ 时,表明 PAHs 来源为石油源;当 $0.4 < FlA/(FlA + Pyr) < 0.5$ 时,PAHs 来源为石油类物质燃烧源;当 $0.5 < FlA/(FlA + Pyr)$ 时,PAHs 来源为草、木、煤燃烧源.

表 2 不同环境介质中 PAHs 的比值

PAHs 比值	KQ01 (空气)	地下河水				沉积物			土壤		
		QS16	QS09	QS04	QS02	QS01	QS09-CJ	QS01-CJ	NT3	NT2	NT1
BaA/(BaA + Chr)	—	0.29	0.17	0.36	0.56	0.54	0.17	0.62	0.21	0.60	0.63
FlA/(FlA + Pyr)	0.48	0.46	0.38	0.60	0.63	0.67	0.35	0.80	0.48	0.92	0.82

从表 2 可以看出, BaA/(BaA + Chr) 比值范围为 0.17 ~ 0.63, QS09、QS09-CJ 显示为石油来源, QS16、NT3 表征为石油源和燃烧源, 其余取样点均表征为燃烧源. QS09 和 QS09-CJ 位于敢怀村天窗内, 敢怀村东北部有一加油站, 其汽油、柴油的洒漏以及含油废水的直接排放是造成 QS09 和 QS09-CJ 显示石油源的主要原因. 而 QS16 和 NT3 均位于地下河出口处, 除了接受来自上游 QS09 天窗的含油地下水外, 还受到地下河出口附近采石场、造纸厂烟筒等燃烧源的影响, 因此表征为混合来源. 表征为燃烧源的取样点均位于地下河系统的中上游, 这是与当地村民使用能源的方式密切相关的.

FlA/(FlA + Pyr) 的比值范围为 0.35 ~ 0.92, QS09 和 QS09-CJ 表征为石油源, 这与加油站排放含油废水是一致的. KQ01、QS16 和 NT3 均显示了石油类物质的燃烧排放源, 产生的原因是由于 3 个取样点紧靠公路和采石场, 车辆使用的汽油、柴油不完全燃烧排放造成的. 其余取样点的 FlA/(FlA + Pyr) 的比值范围为 0.60 ~ 0.92, 表征的来源以草、木、煤燃烧源为主, 这些取样点位于地下河系统的中上游乡村地区, 该地区远离县城, 农业人口占绝大多数, 村民家庭使用的燃料 80% 以上是草、木和煤炭, 这种能源结构与上述比值推断的结果是相符的, 同时造纸厂的烟筒位于其上风向, 燃烧物也会影响 PAHs 的来源. QS04、QS02 和 QS01 虽然均表征为燃烧源, 但其 BaA/(BaA + Chr) 和 FlA/(FlA + Pyr) 比值却呈现出逐渐增大的趋势, 这可能与采样点至造纸厂烟筒的距离有关, QS01、QS04 和 QS02 在烟筒的下风向, 距离烟筒分别约为 750、2 400 和 4 300 m, 由于采样期为冬季, 温度较低, 烟筒排出的 PAHs 易发生沉降作用, 并产生组分间的分异现象, 导致这两组比值出现了差异性变化.

3 结论

(1) 研究区内不同环境介质中, 空气和地下水以萘(Nap)、菲(Phe)和荧蒽(FlA)这 3 种 2 ~ 3 环 PAHs 为主, 而沉积物和土壤以 4 ~ 6 环 PAHs 为主. 各组介质中的 PAHs 存在特征具有较好的一致

性, 但也有一定的差异.

(2) 清水泉地下河水、沉积物和土壤的 PAHs 分布特征为: 上游 PAHs 值 < 中游 PAHs 值 < 下游 PAHs 值, 且沉积物 PAHs 值 > 土壤 PAHs 值. 同一区域的地下河水 2 ~ 3 环 PAHs 百分比最大, 沉积物次之, 土壤最小, 而 4 ~ 6 环 PAHs 百分比的变化规律则相反.

(3) 研究表明上游地区环境介质中 PAHs 来源以草、木、煤燃烧源为主, 敢怀村天窗附近 PAHs 来源为石油源, 地下河出口处 PAHs 来源则以石油源和燃烧源的混合源为主.

致谢: 感谢中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶区域研究室的林永生、樊连杰、代俊鸽、王潇媛等在野外调查、采样过程中的帮助.

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] 覃小群, 蒋忠诚, 李庆松, 等. 广西岩溶区地下河分布特征与开发利用[J]. *水文地质工程地质*, 2007, (6): 10-13.

[4] 袁道先, 薛禹群, 傅家谟, 等. 防止我国西南岩溶地区地下河变成“下水道”的对策与建议[A]. 见: 中国科学院院士建议[C]. 北京, 2007.

[5] 苏禹龙, 徐晓萌, 郭志勇, 等. 条子河中多环芳烃和有机氯农药的时空分布及来源解析[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2014, **52**(3): 611-622.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Farooq S, Eqani S A, Malik R N, *et al.* Occurrence, finger printing and ecological risk assessment of polycyclic aromatic

- hydrocarbons (PAHs) in the Chenab River, Pakistan [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(11): 3207-3215.
- [10] 许云竹, 花修艺, 董德明, 等. 地表水环境中 PAHs 源解析的方法比较及应用[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2011, **49**(3): 565-574.
- [11] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 中国地表水体多环芳烃含量分布特征及其生态风险评价[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(5): 680-691.
- [12] 刘恩莲, 王方华. 济南市环境空气中多环芳烃的来源识别和解析[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(1): 58-62.
- [13] 朱利中, 沈学优, 刘勇建. 城市居民区空气中多环芳烃污染特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2001, **22**(1): 86-89.
- [15] 杨红玉, 倪进治, 黄艳梅, 等. 福州市大气 PM₁₀ 中多环芳烃污染特征及其源解析[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(2): 74-78.
- [16] Ravindra K, Sokhi R, Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 2895-2921.
- [17] 张勇, 刘浩, 张家泉, 等. 黄石市夏季大气颗粒物中多环芳烃污染特征解析[J]. *安全与环境工程*, 2014, **21**(2): 28-31.
- [18] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 等. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 248-255.
- [19] Lau E V, Gan S Y, Ng H K. Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils from five different locations in Klang Valley, Malaysia [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(5): 741-746.
- [20] Peng C, Ouyang Z Y, Wand M E, *et al.* Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 36-42.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 广西大石围天坑群地下河水中多环芳烃的污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1081-1087.
- [24] 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 等. 岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- [25] Jaward F M, Barber J L, Booij K, *et al.* Spatial distribution of atmospheric PAHs and PCNs along a north-south Atlantic transect [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(1): 173-181.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 林峥, 麦碧娴, 张干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. *环境化学*, 1999, **18**(2): 115-121.
- [29] 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.
- [30] 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): 221-231.
- [31] 郭建阳, 廖海清, 韩梅, 等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 626-631.
- [32] Doong R A, Lin Y T. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan [J]. *Water Research*, 2004, **38**(7): 1733-1744.
- [33] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2091-2098.
- [34] 陈思, 葛睿, 王鹏, 等. 松花江吉林市段江水与沉积物中多环芳烃的分布、来源和生态风险[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2014, **52**(3): 623-630.
- [35] 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.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行