

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)	

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究

蓝家程¹, 孙玉川^{2*}, 师阳², 梁作兵²

(1. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 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)

摘要: 为了解重庆南山老龙洞岩溶地下河表层沉积物中多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的污染特征及生态风险, 分析了地下河上游及出口表层沉积物样品中 16 种优先控制 PAHs 的含量和组成。结果表明, 沉积物中 PAHs 总量在 $58.2 \sim 3\,598 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 大部分在 $100 \sim 5\,000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 处于中等到高污染水平; 从组成来看, 老龙洞组成以 2~4 环为主, 占到 75.1%, 仙女洞以 4~6 环相对富集, 其比例为 56.6%; 老龙洞沉积物中 PAHs 主要来源于上游水体传输及地表土壤的输入, PAHs 在地下河管道中的迁移表现为 2~3 环 PAHs 迁移距离远, 4~6 环的 PAHs 被强烈地吸附于沉积物中, 迁移能力不足, 从而富集于地下河管道中; 生态风险评估结果表明, 老龙洞沉积物 PAHs 很少产生负面生态效应, 而仙女洞沉积物产生负面生态效应概率较大, 一旦 PAHs 逐渐往下游迁移, 将对下游的生态构成威胁。

关键词: 多环芳烃; 表层沉积物; 污染特征; 生态风险; 岩溶地下河

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0855-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.014

Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River

LAN Jia-cheng¹, SUN Yu-chuan^{2*}, SHI Yang², LIANG Zuo-bing²

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to understand pollution characteristics and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment from Laolongdong underground river, the concentration and composition of 16 priority PAHs were analyzed. The results showed that the total concentrations of PAHs ranged from 58.2 to $3\,598 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, and most of the values were between 100 and $5\,000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. It means that sediments in the river were moderately and heavily polluted by PAHs. The PAH composition were dominated by 2-4 rings (accounted for 75.1%) compounds in Laolongdong, while 4-6 rings PAHs accounted for 56.6% in Xiannvdong. Sediments in Laolongdong mainly came from the transportation of the upstream water and surface soil. 2-3 rings PAHs had higher transport capability with farther migration distance, while 4-6 rings PAHs had lower transport capability and shorter migration distance in the conduit, because 4-6 rings PAHs could be easily absorbed by sediments. The result of ecological assessment of PAHs showed that the ecological risk level in Laolongdong was low, leading to little negative ecological impact. However, the level in Xiannvdong was high. Once PAHs migrated from upstream to downstream, it would result in ecological threat for the downstream area.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); surface sediment; pollution characteristic; ecological risk; karst underground river

水体沉积物中的 PAHs 主要来自于工业废水排放、城市生活污水、地表径流、土壤淋溶、石油的泄漏及大气颗粒物的干湿沉降及水气交换。由于 PAHs 具有亲脂憎水性, 在水中溶解度低, 进入水体中的 PAHs 通常吸附于颗粒物上, 因此水体中 PAHs 极易聚集到沉积物中, 沉积物成为 PAHs 主要的储存库。蓄积在沉积物中的 PAHs 可以通过食物链方式危害人体健康, 也可以通过生物地球化学循环过程再次进入水体, 对 PAHs 的迁移转化过程有重要作用。国内现有的研究大多集中于地表江、河、湖、海中沉积物中 PAHs 的污染水平^[1-13], 而且集中在我国重大重点流域和经济工业发达地区。

岩溶区由于特殊的地表地下双层结构, 岩溶裂

隙发育, 地下排水系统 (岩溶管道) 发育, 土层浅薄, 污染物可随降雨等地表径流通过竖井、落水洞、天坑等进入岩溶地下系统, 造成污染。岩溶巨型漏斗或岩溶洞穴具有“冷陷阱效应”, 成为持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 的一个汇^[14,15]。岩溶漏斗底部大多与管道、地下河相连接, 从而使 POPs 蓄积在地下河里, 进而危害洞穴生

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-10-23

基金项目: 重庆市院士专项 (cstc2013jcyjys20001); 国家自然科学基金项目 (41072192, 41103068); 中央高校基本科研业务费专项 (XDK2013D012, XDK2013B021); 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)

作者简介: 蓝家程 (1986~), 男, 博士, 主要研究方向为喀斯特生态环境, E-mail: lanjc@swu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

物和人类健康. 岩溶地下河沉积物中 PAHs 污染的研究并不多见,孔祥胜报道了广西大石围天坑群地下河底部沉积物中 PAHs 污染特征及其与地下河之间 PAHs 迁移传输关系^[16],并进行了风险评价. 杨梅^[17]发现本研究地点南山老龙洞地下河沉积物 PAHs 含量较高,地下河上游有机污染物含量高于下游,其主要赋存于富含高有机质的土壤中,粗粉粒含量可能是影响有机污染物分布的重要因素. 本文以老龙洞地下河流域表层沉积物为研究对象,探讨表层沉积物中 PAHs 在地下河管道中的污染变化特征及污染水平,并进行生态风险评价.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

老龙洞地下河沿途落水洞分布众多,但是只有上游仙女洞和老龙洞出口能够取到沉积物样,仙女洞曾经是旅游景点,现已废弃,目前周边进行别墅区的建设. 老龙洞出口为旅游景点,可入洞内大约 1 km, 采样点位置见图 1. 2012 年 12 月~2013 年 11 月,采集地下河出口老龙洞及上游仙女洞沉积物样,其中仙女洞由于附近开发建设,洞口被填埋,无法进行采样,仅仅获得了 3 个月的样品. 采集地下河 0~

20 cm 表层沉积物样,用封口带密封包装好后立即带回实验室. 冷冻干燥后,过 60 目筛,放入 -20℃ 冰箱保存至分析,采样点位置见图 1.

1.2 主要试剂与仪器

样品分析所用的正己烷,二氯甲烷均为农残级,购自美国 Fisher 公司;内标物质为六甲基苯, (HMB),购自美国 Supelco 公司;美国 EPA 规定的 16 种优控 PAHs 混标购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;无水硫酸钠(分析纯)于马弗炉中 480℃ 活化 5~6 h,干燥备用;硅胶和氧化铝分别于 130℃ 和 450℃ 活化 24 h,待冷却后再加入其质量 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 后烘干,干燥备用.

实验所用主要仪器为气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS, Agilent, 7890A/5975C)、旋转蒸发器 (RV05basic 2-B, 德国 IKA)、循环冷却系统、冻干机、循环水式真空泵、氮吹仪.

1.3 分析步骤

准确称取 10 g 经过 60 目筛的沉积物样,加 10 g 焙烧过的无水硫酸钠混匀后,加入回收率指示物(萘-d8、二氢苊-d10、菲-d10、蒽-d12、苝-d12),滤纸包

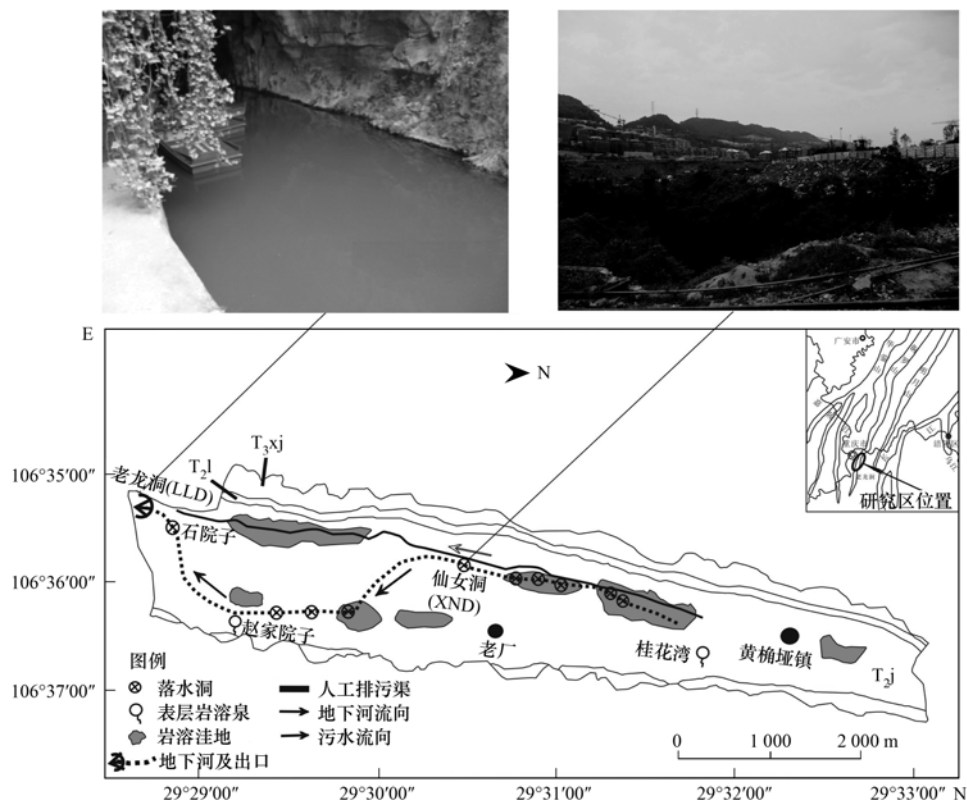


图 1 老龙洞地下河沉积物采样点及照片

Fig. 1 Sampling site of sediment and photos of Laolongdong underground river

样,加入活化铜片脱硫,用二氯甲烷进行提取 24 h,收集提取物并用旋转蒸发仪浓缩至 5 mL. 经氧化铝和硅胶层析柱净化,淋洗后的液体经浓缩、置换溶剂后,转移至 2 mL 细胞瓶中,氮吹至 0.2 mL,最后加入 4 μ L 内标物(六甲基苯)放入冰箱中待测. 使用气相色谱-质谱联用仪进行 PAHs 检测.

1.4 质量控制与质量保证

每分析 10 个样品同时做空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样. 每个样品在抽提前加入回收率指示物,用于检测实验过程中的损失情况,空白样用于确认实验结果的再现性. 该方法的 PAHs 基质加标回收率除 Nap 的较低外,平均值为 62%,其他 PAHs 的基质加标回收率介于 76% ~ 115% 之间. 以 10 g 颗粒物样品计算的方法检出下限范围为 0.5 ~ 3.1 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 多环芳烃的含量及组成

16 种 PAHs 在沉积物中均有检出,其含量如表 1 所示. 老龙洞出口沉积物中 PAHs 总量变化范围为 58.2 ~ 1 051 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 367.9 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,最高值和最低值为 1 051 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 58.2 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,分别出现在 2013 年 6 月和 2013 年 9 月. 7 种致癌性 PAHs 含量变化范围为 10.1 ~ 319.3 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 118.4 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其变化趋势与 $\sum$ PAHs 变化一致. 2013 年 6 月老龙洞沉积物中 PAHs 含量异常高,可能的原因是,2013 年 4 月底至 2013 年 6 月是降雨集中的时间,暴雨或大雨的冲刷使上游沉积物迁移至下游,随后又由于水的稀释作用使其浓度降低. 仙女洞沉积物中 PAHs 总量平均值为 2 173

表 1 沉积物中 PAHs 含量¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 1 PAHs contents in sediment/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

PAHs	老龙洞								仙女洞 (Mean)
	01-13	03-13	04-13	05-13	06-13	07-13	09-13	10-13	
Nap	110.1	77.5	67.8	48.3	345.2	67.3	14.4	27.4	516.9
Acy	8.7	9.3	8.7	6.3	34.8	9.1	2.1	4.1	129.4
Ace	10.9	9.3	8.6	15.0	17.6	6.8	2.9	2.7	52.0
Flu	37.2	32.7	37.4	46.9	67.4	22.5	12.0	12.4	130.6
Phe	84.6	24.7	45.8	56.7	118.2	27.0	10.4	24.9	171.1
Ant	3.0	1.0	1.7	3.5	7.5	1.0	0.4	0.6	17.3
Fla	26.8	5.9	9.6	15.6	46.2	5.6	1.6	5.8	104.0
Pyr	29.6	6.1	8.4	15.2	46.4	5.8	1.7	3.8	69.4
BaA *	29.4	2.8	4.2	7.7	24.5	2.5	0.8	1.5	38.3
Chry *	92.5	16.4	5.2	34.2	132.5	19.8	2.8	6.3	81.6
BbF *	66.7	14.4	4.4	26.5	93.2	16.0	2.4	5.7	143.8
BkF *	30.9	13.7	4.3	10.0	34.7	15.4	2.3	5.2	86.8
BaP *	36.6	4.1	1.2	15.2	48.5	4.0	0.7	1.1	66.1
InP *	38.7	3.6	1.6	8.7	9.2	2.2	0.8	1.9	390.0
DaA *	24.5	2.6	1.2	3.9	5.0	1.4	0.5	0.8	21.8
BgP	94.8	12.6	5.2	16.9	20.4	9.3	2.5	6.2	153.7
$\sum$ PAHscarc	319.3	57.7	22.1	106.2	347.6	61.5	10.1	22.6	828.3
$\sum$ PAHs	724.9	236.7	215.3	330.7	1 051	215.9	58.2	110.6	2 173

1) * 为致癌性 PAHs, $\sum$ PAHscarc 为 7 种致癌性 PAHs 的总量

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其含量高于老龙洞出口,即地下河上游大于地下河出口.

图 2 为老龙洞地下河沉积物中 PAHs 平均组成,从中可知,老龙洞沉积物中主要由 Nap、Phe 为主,Flu、Chry 含有较高的含量;仙女洞沉积物中以 Nap、InP 为主,Phe、BbF 含量也较高. 从各环 PAHs 组成来看,老龙洞沉积物中 2 环、3 环、4 环、5 环、6 环 PAHs 所占比例分别为 25.7%、28.4%、21%、16.9%、8%;以 2 ~ 4 环为主;仙女洞沉积物中 2

环、3 环、4 环、5 环、6 环 PAHs 的比例分别为 18.6%、24.9%、15%、17.5%、24.1%,各环比例相对比较平均,但 4 ~ 6 环 PAHs 的比例达到 56.6%,超过 2 ~ 3 环所占比例. 与老龙洞相比,仙女洞沉积物相对富集高环 PAHs. 对地下河水中 PAHs 组成研究发现,水中 PAHs 组成以 3 环为主,大多数月份水中 2 ~ 3 环 PAHs 占到 90% 以上. 相对于溶解态 PAHs,沉积物中高环 PAHs 的比重相对水体富集. 这主要是因为随着苯环数增加,PAHs 化

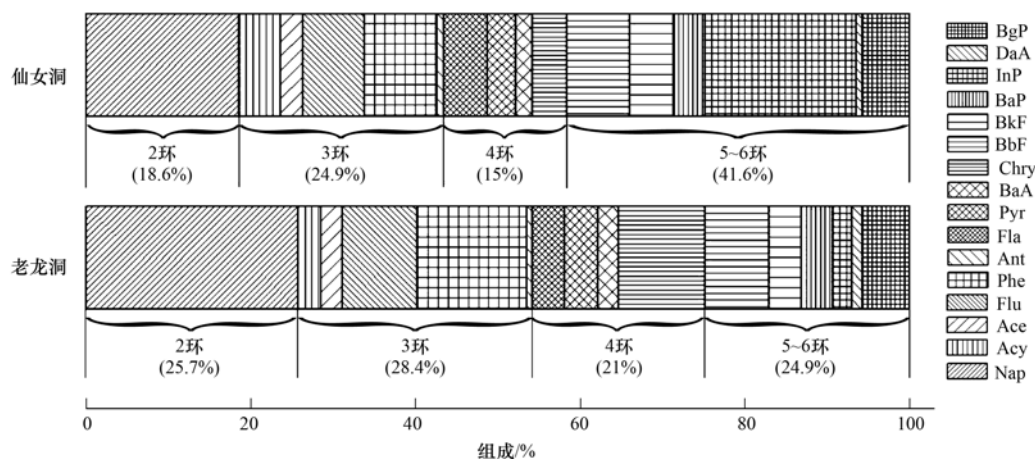


图2 沉积物 PAHs 组成

Fig. 2 Mean composition of individual PAHs in sediment

合物水溶解性越低,亲脂性越强,越容易被有机质吸附.分析 PAHs 组成可以有助于解析 PAHs 来源,2~3 环低分子量主要来自有机物的低温转化和石油产品的泄漏,4 环以上的高环 PAHs 主要来自化石燃料的燃烧^[18].地下河沉积物主要来源地表土壤颗粒物以及污水颗粒物,由以上分析和之前研究^[19],可以判断地下河沉积物主要来源于低温转化的石油产品泄漏和交通排放与煤炭、石油及生物质的燃烧的混合源.

2.2 多环芳烃的污染特征

图3为老龙洞沉积物与上游仙女洞沉积物及地表土壤 PAHs 加权平均后的成分谱,从中可以看出,老龙洞与上游仙女洞沉积物及地表土壤具有相似的 PAHs 成分谱轮廓线,相关性均达到 0.90 以上,说明地下河出口沉积物主要来源于上游水体传输及地表土壤的输入.上游仙女洞沉积物 PAHs 总浓度为 $2173 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,经过大约 3 km 的地下河管道后,到老龙洞出口 PAHs 浓度下降到 $368 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,同时 PAHs 由 4~6 环为主变为以 2~3 环为主,说明 4~6 环的 PAHs 被强烈地吸附于沉积物中,而且被优先吸附,并且其迁移能力较弱,表现为近距离迁移,而 2~3 环 PAHs 则由于正辛醇-水分配系数较小,相对易溶于水相中,其迁移能力较强,表现为远距离迁移.这一现象与孔祥胜等^[16]的研究一致,表明 PAHs 容易富集于上游,尤其是高环 PAHs,如果长期积累并向下游扩散将对地下河产生严重的污染.同样的现象出现在地表土壤与老龙洞沉积物中,可以看到相对于老龙洞沉积物,土壤中低环(2~3 环)PAHs 的比例较低,而 4~6 环 PAHs 的比例较高,尤其是 5~6 环 PAHs 表现得更为明显.仙女洞沉积物与土壤

PAHs 成分谱中表现的稍微复杂,但整体上还是土壤中 5~6 环 PAHs 组成较高,除了 InP 相对特别高外(18.14%),高出 12.9%,主要是与仙女洞附近开发建房,使用柴油钻井等有关;而 3 环中 Flu 和 Phe 百分比仙女洞相对土壤较高,4 环则并无太大差异,这可能与大气沉降交换有关.以上表明地表土壤是地下河沉积物 PAHs 的主要来源,低环 PAHs 相对易于迁移,使得沉积物中低环比重相对土壤较高,而高环 PAHs 由于疏水性和亲颗粒物较高相对不易迁移使得土壤中其比例较高.

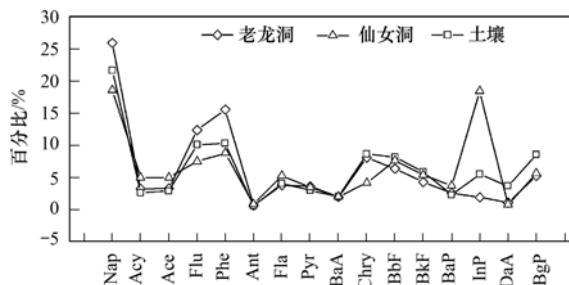


图3 地下河沉积物与地表土壤中 PAHs 成分谱

Fig. 3 Profile of PAHs in sediment and surface soil

2.3 多环芳烃污染水平

Baumard 等^[20]将沉积物污染水平分为:低污染为 $50 \sim 100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,中等污染为 $100 \sim 1100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,高污染为 $1000 \sim 5000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,极高污染为大于 $5000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.老龙洞地下河沉积物 $\sum \text{PAHs}$ 变化范围为 $58.2 \sim 3598 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.按照 Baumard 等划定的标准,老龙洞地下河沉积物污染水平为中等污染到高污染水平,上游污染水平高于下游.与其他地区沉积物相比(表2),老龙洞地下河沉积物 PAHs 污染水平处于中等偏低水平,相对同为岩溶区的百朗地下河要高.

表 2 国内外表层沉积物 PAHs 污染状况¹⁾

Table 2 Contamination of PAHs in surface sediment in different cities and countries

地点	范围/ng·g ⁻¹	平均值/ng·g ⁻¹	文献
美国圣地亚哥湾	80 ~ 20 000	3 000	[21]
日本东京湾	230 ~ 6 000	—	[21]
英国亨伯河口	13 ~ 1 972	—	[22]
澳大利亚悉尼港	100 ~ 38 000	—	[23]
香港维多利亚湾	1 200 ~ 14 100	—	[24]
泉州湾	9.48 ~ 108.4	39.63	[1]
大连湾	3 270 ~ 3 559	1 152	[2]
长江口	263 ~ 6 372	—	[3]
珠江三角洲	217 ~ 2 680	1 028	[4]
黄浦江	244 ~ 2 805	—	[5]
天津河流	0.787 ~ 1 943	10.98	[6]
辽河	27.45 ~ 198.3	—	[7]
太湖	23.1 ~ 1 129.7	—	[8]
百朗地下河	37.75 ~ 1 662.7	267.6	[16]

1) “—”表示无数据

2.4 生态风险评价

Long 等^[25]提出了一种用于河流和海洋沉积物中单体 PAHs 的潜在生态风险评价标准. 即效应区间低值 (effects range low, ERL) 和效应区间中值 (effects range median, ERM). 当 PAHs 浓度低于 ERL 值, 说明对生物有害几率 < 10%, 极少产生负面生态效应; 当 PAHs 浓度大于 ERM 值, 则对生物有害几率 > 50%, 将会经常出现负面生态效应; 当

PAHs 浓度介于两者之间, 则偶尔出现负面生态效应. 临界影响水平/可能影响水平 (TEL/PEL) 也被广泛应用^[26]. 该方法同样分为 3 个区间, PAH 含量低于 TEL 值, 生物毒性效应很少产生; 高于 PEL 值, 生物毒性效应频繁发生; 介于两者之间, 生物毒性效应有可能发生. 不同单体 PAH 的 ERL/ERM 和 TEL/PEL 值见表 3. 从中可以看出, 老龙洞沉积物中, 除了 Flu 含量超出 ERL 值外, 其余单体 PAHs 均

表 3 老龙洞地下河沉积物中 PAHs 平均值与风险评价标准值对比¹⁾/ng·g⁻¹

PAHs	ERL	ERM	TEL	PEL	老龙洞	仙女洞
Nap	160	2 100	34.6	391	94.6	516.9
Acy	16	500	6.71	88.9	10.4	129.4
Ace	44	640	5.87	128	9.24	52.0
Flu	19	540	21.2	144	33.6	130.6
Phe	240	1 500	86.7	544	49.0	171.1
Ant	853	1 100	46.9	245	2.34	17.3
Fla	600	5 100	113	1 494	14.7	104.0
Pyr	665	2 600	153	1 398	14.6	69.5
BaA	261	1 600	74.8	693	9.17	38.3
Chry	384	2 800	108	846	38.7	81.6
BbF	320	1 880	—	—	28.7	143.8
BkF	280	1 620	—	—	14.6	86.8
BaP	430	1 600	88.8	763	13.9	66.1
InP	—	—	—	—	8.34	390.0
DaA	63.4	260	6.22	135	4.99	21.8
BgP	430	1 600	—	—	21.0	153.8
2~3 环	552	3 160	—	—	199.3	1 017
4~6 环	1 700	9 600	—	—	168.7	1 155
∑ PAHs	4 022	44 792	—	—	368.0	2 172

1) “—”为无数据

低于 ERL 值,只有 Nap、Acy、Ace 和 Flu 含量高于对应的 TEL 值,所有单体 PAH 含量都低于 ERM/PEL 值;在仙女洞沉积物中,Nap、Acy、Ace、Flu 和 2~3 环 PAHs 含量均超过了 ERL 值,Nap、Acy、Ace、Flu、Phe 和 DaA 含量超过 TEL 值,Nap、Acy 含量超出 PEL 值,所有单体 PAH 含量都低于 ERM 值.说明老龙洞沉积物 PAHs 很少产生负面生态效应,而仙女洞沉积物产生负面生态效应概率较大,尤其是 Nap 和 Acy 的生物毒性效应频繁发生.由前文分析可知,仙女洞沉积物中 PAHs 含量高于老龙洞沉积物,而且地下河管道富集高环 PAHs,地下河上游 PAHs 生态风险较高,将会随着 PAHs 的迁移,对下游构成生态威胁.

3 结论

(1)老龙洞地下河沉积物中 PAHs 总量在 $58.2 \sim 3\,598 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,地下河上游大于出口,老龙洞组成以 2~4 环为主,仙女洞以 4~6 环相对富集. PAHs 含量大部分在 $100 \sim 5\,000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,处于中等到高污染水平,相对于其他地区,则处于中等偏低水平.

(2)地下河出口老龙洞沉积物中 PAHs 主要来源于上游水体传输及地表土壤的输入,2~3 环 PAHs 表现为远距离迁移,4~6 环的 PAHs 被强烈的吸附于沉积物中,表现为近距离迁移,高环 PAHs 富集于地下河管道中.

(3)老龙洞地下河沉积物 PAHs 生态风险总体上处于低风险水平,地下河上游 PAHs 生态风险较高,一旦长期积累富集于地下河管道中,并向下游迁移,将对整个地下河系统构成较大的生态风险.

致谢:感谢西南大学地理科学学院徐昕、任坤、王尊波、江泽利、李建鸿等同学在野外采样和室内实验的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Yang D, Qi S H, Zhang Y, *et al.* Levels, sources and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment along the Jinjiang River mainstream to Quanzhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 298-306.
- [2] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(4): 507-509.
- [3] 刘敏, 侯立军, 邹慧仙, 等. 长江口潮滩表层沉积物中多环芳烃分布特征[J]. *中国环境科学*, 2001, **21**(4): 343-346.
- [4] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 129-134.
- [5] 胡雄星, 周亚康, 韩中豪, 等. 黄浦江表层沉积物中多环芳烃的分布特征及来源[J]. *环境化学*, 2005, **24**(6): 703-706.
- [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] 许士奋, 蒋新, 王连生, 等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物[J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(2): 128-131.
- [8] 张路, 范成新, 秦伯强, 等. 太湖宜溧河水系沉积物中多环芳烃来源解析[J]. *地球化学*, 2003, **32**(2): 124-130.
- [9] 刘丰, 刘静玲, 陈秋颖, 等. 海河南系表层沉积物中多环芳烃的污染特征与生态风险评价[J]. *科学通报*, 2013, **58**(12): 1109-1116.
- [10] 曹治国, 刘静玲, 栾芸, 等. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(2): 246-253.
- [11] 张明, 唐访良, 吴志旭, 等. 千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 253-258.
- [12] 张枝焕, 陶澍, 沈伟然, 等. 天津地区主要河流沉积物中多环芳烃化合物的组成与分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(11): 1507-1516.
- [13] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(2): 192-197.
- [14] 王英辉. 喀斯特洞穴中持久性有机污染物分布与传输动力学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 杨梅. 典型岩溶区地下河有机污染物控制因素及运移特征研究——以重庆南山岩溶槽谷区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010. 36-54.
- [18] Soclo H H, Garrigues P H, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**(5): 387-396.
- [19] 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.
- [20] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments and mussels of the western Mediterranean Sea [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(5): 765-776.
- [21] Kim G B, Maruya K A, Lee R F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Kyeonggi Bay, Korea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **38**(1): 7-15.
- [22] Zhou J L, Fileman T W, Evans S, *et al.* Fluoranthene and pyrene in the suspended particulate matter and surface sediments

of the Humber Estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, **36**(8) : 587-597.

[23] McCready S, Slee D J, Birch G F, *et al.* The distribution of Polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments of Sydney Harbour, Australia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(11) : 999-1006.

[24] Hong H, Xu L, Zhang L, *et al.* Environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediment of Xiamen harbor and Victoria harbours [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, **31**(4-12) : 229-236.

[25] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects with ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1) : 81-97.

[26] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 1998, **4**(5) : 1019-1039.



《环境科学》多项引证指标名列前茅

2014 年 9 月 26 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2013 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2013 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 76. 6,排名第一,总被引频次6 941,影响因子 1. 266.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2013 年度《环境科学》综合评价总分 76. 6,在被统计的 33 种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

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