

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配

蓝家程^{1,3}, 孙玉川^{2*}, 肖时珍^{1,2,3}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 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; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 利用实测老龙洞地下河水中和沉积物中多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的实际浓度, 获取了溶解相-沉积物中PAHs的分配系数 K_p 值. 研究了老龙洞地下河PAHs在水相和沉积物中的质量浓度变化及其在水相和沉积物间的分配. 研究表明水相和沉积物中PAHs质量浓度分别为 $81.5 \sim 8089 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值 $(1439 \pm 2248) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $58.2 \sim 1051 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值 $(367.9 \pm 342.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; PAHs组成均以2~3环为主, 但沉积物中明显富集高环PAHs. 沉积物-水相 K_p 值分布在 $55.74 \sim 46067 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随PAHs环数的增加而增大. 沉积物-水相中实测的有机碳分配系数($\lg K_{oc}$)大部分高于预测值上限, PAHs强烈吸附在沉积物上. $\lg K_{oc}$ 与正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)呈较好的线性自由能关系($R^2 = 0.75$), 但其斜率小于1, 推测地下河沉积物对PAHs化合物的吸收能力较差.

关键词: 岩溶地下河; 多环芳烃; 影响因素; 分配; 分配系数

中图分类号: X142; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4081-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.018

Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River

LAN Jia-cheng^{1,3}, SUN Yu-chuan^{2*}, XIAO Shi-zhen^{1,2,3}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation of China, Guiyang 550001, China)

Abstract: Based on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) field data of dissolved phase and sediment phase, partition coefficient K_p in sediment-water interface from Laolongdong underground river was obtained. The concentration of PAHs in water and sediment and partition coefficient K_p in sediment-water interface were studied. The results showed PAHs concentrations were $81.5 \sim 8089 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ with a mean value $(1439 \pm 2248) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ in water and $58.2 \sim 1051 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ with an average $(367.9 \pm 342.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ in sediment. The dominant PAHs were 2-3 rings PAHs in water and sediment. However, high rings PAHs obviously enriched in the sediment. Partition coefficients varied from 55.74 to $46067 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ in sediment-water interface, increasing with the rise of PAH compounds. All the organic carbon partition in sediment-water interface were higher than predicate values based on typical model of equilibrium distribution indicated that PAHs were strongly adsorbed in sediment. The linear free-energy relationship coefficient between K_{oc} value and octanol-water partition coefficient K_{ow} was 0.75 , but the slope was lower than 1, indicating that sediment in Laolongdong underground river had weakly lipophilic characteristics and adsorption ability for PAHs.

Key words: karst underground river; polycyclic aromatic hydrocarbons; impact factor; partition; partition coefficients

水生生态系统是PAHs污染的主要汇之一^[1], 并且由于PAHs的亲脂性和生物富集效应而备受关注^[2]. PAHs的疏水性使其更倾向于吸附在水中的胶体、溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM), 悬浮颗粒物(suspended particle matter, SPM)上, 最终通过沉积作用贮存于沉积物中. 因此, 在水生环境中, PAHs通常以游离态、DOM结合态、SPM结合态以及沉积物结合的形式存在^[3]. 研究PAHs在这些相中的分配, 对其在环境中的行为和归趋有重要意义. PAHs在这些相中的分配除了与本身的理化性质有关外, 吸附剂的类型和性质可能是影响PAHs在水体中环境行为的重要控制因

素^[3]. 研究表明有机碳吸附是控制水体环境中PAHs行为和环境归宿的主要机制^[3]. 除了有机碳外, 还存在例如盐度^[4,5]、碳黑(soot carbon, SC)^[6]类物质共同影响PAHs在水体中的分配. 因此, PAHs在水、悬浮颗粒物和沉积物中的分配取决于各种吸附剂之间的竞争强弱.

收稿日期: 2015-03-27; 修订日期: 2015-07-01

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(XDJK2013D012, XDJK2013B021); 西南大学博士基金项目(SWU110258); 应对全球气候变化地质调查综合研究项目(12120113006700)

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: lanjiacheng@gznu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

岩溶区特殊的二元结构,基岩大片裸露,土被不连续,土层浅薄,土壤层的天然保护和过滤作用基本丧失;加上大量落水洞、漏斗、竖井和裂隙等岩溶形态发育,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河系统,造成污染.尤其是 PAHs 等持久性有机污染物,一旦进入地下河管道,有可能最终残留在地下河管道内,这将给地下河带来潜在的生态风险. PAHs 在岩溶地下河的污染水平已有报道^[7,8],笔者已对研究区 PAHs 的污染水平有过报道^[9,10],大多研究关注的是地表水、悬浮颗粒物、沉积物系统 PAHs 的分配及影响因素^[3-6, 11-17],而有关岩溶地下河中 PAHs 存在形态及分配研究尚未见报道.因此,本文以重庆南山老龙洞地下河为例,研究地下河中 PAHs 在沉积物和水中的分配,将有助于厘清 PAHs 在地下河环境中的迁移归宿问题.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆南山老龙洞地下河位于南山岩溶槽谷地

区,东经 29°32′30″,北纬 106°37′30″.气候为亚热带湿润气候,年均降雨量 1 100 mm,植被主要为亚热带常绿阔叶林,土壤为黄壤和石灰土.区域整体地貌类型为背斜低山,背斜北段呈现“一山二岭一槽”岩溶景观;背斜南段呈现“一山三岭两槽”的岩溶景观.区域内主要分布的地层为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j}),中统雷口坡组(T_{2l})和上统须家河组(T_{3xj})碳酸盐岩(图 1).

岩溶槽谷内广泛分布有岩溶洼地、岩溶裂隙、落水洞,并有表层岩溶泉出露.老龙洞地下河总长约 6 km,地下河出口为老龙洞风景区,常流量为 50~80 L·s⁻¹.流域内主要土地利用类型为建设用地、厂矿用地、农业用地和林地,随着城镇化发展,农地被大量占用,建设用地有扩大趋势.由于岩溶特殊脆弱性,人为活动的影响,老龙洞地下水已经遭受氮、磷、微生物^[18]和持久性有机污染物的威胁^[19].流域内多环芳烃的主要来源包括生活排污,企业排污,垃圾焚烧,汽修、电焊等汽油、柴油的洒漏以及场地冲洗和洗车过程产生的含油废水排放,企业生产燃煤和汽车尾气的排放等.

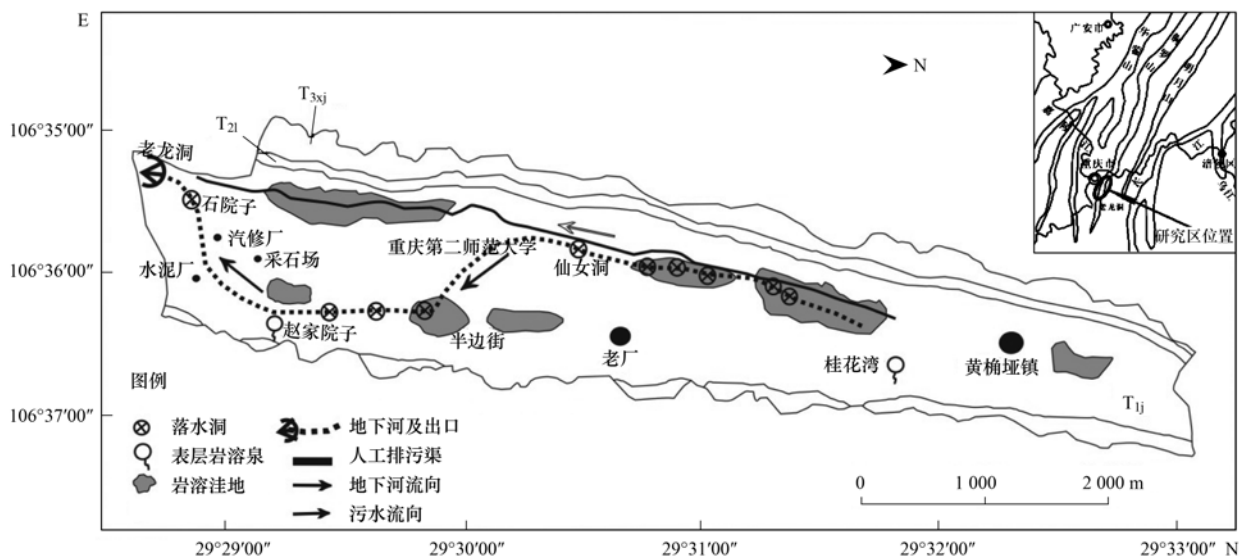


图 1 研究区位置及水文地质

Fig. 1 Location and hydrogeological map of study area

1.2 样品采集与保存

2012 年 10 月~2013 年 10 月在地下河出口老龙洞采集沉积物样品.每月采集老龙洞地下河 0~20 cm 表层沉积物样,采样用自制的底泥采样器,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.2012 年 10 月~2013 年 11 月对地下河水进行为期 1 a 的每月采样监测.采集水样时直接用 1 L 带聚四氟乙

烯衬垫的螺旋盖棕色玻璃瓶采集,采样过程中不能引入气泡,水样装满至瓶口上有一弯月面时旋紧瓶盖,然后翻转瓶子检查,如发现有气泡,则重新取样,共采集 2 L 水样.

1.3 样品的测试分析

1.3.1 有机碳和 pH 值的测定

有机碳的测定采用经典的丘林法即重铬酸钾加热氧化法^[20].

1.3.2 多环芳烃的测定

多环芳烃分析所用的主要试剂为:正己烷、二氯甲烷,均为农残级,购自美国 Fisher 公司;美国 EPA 规定的 16 种优控 PAHs 混标,购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;氘代萘(Nap-D₈)、氘代二氢萘(Ace-D₁₀)、氘代菲(Phe-D₁₀)、氘代蒽(Chr-D₁₂)、氘代芘(Per-D₁₂)共 5 种回收率指示物;内标物质六甲基苯(HMB)购自美国 Supelco 公司。

固体样品多环芳烃测定采用 EPA3540 方法进行。主要分析步骤为:将磨好的沉积物样 10 g,滤膜上所有颗粒物样,放入包好的滤纸里,加 10 g 焙烧过的无水硫酸钠混匀后,加入回收率指示物,用 125 mL 二氯甲烷索氏抽提 24 h。抽提完后浓缩至 5 mL,用氧化铝和硅胶层析柱(层析净化,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 μL 内标物(六甲基苯)放入冰箱中待测。

水样多环芳烃的提取采用美国 EPA525.2 方法进行。过滤后的水样,加回收率指示物,摇匀后进行固相萃取,萃取后的液体浓缩至 5 mL,过无水硫酸钠脱水后继续浓缩至 5 mL,浓缩后的液体过硅胶柱,收集提取液浓缩至 2 mL,用正己烷置换溶剂,最后浓缩至 0.8 mL,转移至细胞瓶并氮吹至 0.2 mL 后加入内标物(六甲基苯)放入冰箱中待测。

1.3.3 测试仪器及质量控制与保证

使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Agilent, 7890A/5975C),进行 PAHs 检测。仪器分析条件为 HP-5MS 毛细管柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm),高纯氦气作为载气,流速为 1 mL·min⁻¹,无分流进样,进样量 1 μL,进样口温度 280℃,初始温度 50℃,以 20℃·min⁻¹升温至 200℃,然后再以 10℃·min⁻¹的速度升温至 290℃,保持 15 min。EI 电离源 70 eV,离子源温度 300℃。

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。加入氘代回收率指示物用于控制整个实验流程的回收情况。该方法除 Nap 回收率较低外,水样和固体样平均值分别为 53% 和 62%,水样中其它 PAHs 的回收率介于 78% ~ 110% 之间,且平行样品的相对标准偏差均小于 12%;固体样中其它 PAHs 的回收率介于 76% ~ 115% 之间。

1.4 分配系数的计算

分配系数 K_p 被定义为颗粒物或沉积物 PAHs

浓度(c_s)相对于溶解相 PAHs 浓度(c_w)的比值,即:

$$K_p = c_s / c_w$$

K_p 可以通过室内实验得到,但是无法真实反映野外现场环境。实验室室内吸附实验和野外实验发现有机质有利于吸附沉积物或颗粒物中的 PAHs^[21,22]。理论上假设 PAHs 化合物的吸附只受有机碳的影响,于是可用有机碳归一化的形式来表达,即:

$$K_{oc} = K_p / f_{oc}$$

式中, f_{oc} 为颗粒物或沉积物的有机碳百分含量(%), K_{oc} 既可以实地测试,也可由有机化合物的正辛醇-水分配系数(K_{ow})利用线性自由能方程关系计算。 K_{oc} 与正辛醇-水分配系数 K_{ow} 之间存在着良好的相关关系,因此可以建立如下线性自由能关系:

$$\lg K_{oc} = a \lg K_{ow} + b$$

式中, a 和 b 均为常数。这种线性关系存在于 PAHs 这样的化合物中,并且得到广泛使用^[21,23]。

2 结果与讨论

2.1 地下河水和沉积物中 PAHs 的对比

老龙洞地下河水中 PAHs 质量浓度为 81.5 ~ 8 089 ng·L⁻¹,平均值为 (1 439 ± 2 248) ng·L⁻¹,其中 2 ~ 3 环质量浓度为 78.95 ~ 6 056 ng·L⁻¹,平均为 (1 176 ± 1 663) ng·L⁻¹,占到总 PAHs 的 74.87% ~ 100%,4 ~ 6 环浓度为 ND ~ 2 033 ng·L⁻¹,平均为 (262.6 ± 588.2) ng·L⁻¹。7 种致癌性 PAHs 质量浓度很低,几乎未检出。受地下河上游黄桷埡镇污水排入的影响,以 2013 年 4 月为界,明显分为两个时期段,在此之前,PAHs 质量浓度也较高,之后 PAHs 质量浓度明显降低^[9],表明地下河水中 PAHs 浓度受污水影响明显。沉积物中 16 种 PAHs 全部检出,PAHs 质量浓度为 58.2 ~ 1 051 ng·g⁻¹,平均值为 (367.9 ± 342.6) ng·g⁻¹,最高值出现在 2013 年 6 月,可能的原因是降雨集中的月份,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^[10]。7 种致癌性 PAHs 质量浓度为 10.07 ~ 347.6 ng·g⁻¹,平均值为 (118.4 ± 136.4) ng·g⁻¹。沉积物中 2 ~ 3 环 PAHs 质量浓度为 42.22 ~ 590.7 ng·g⁻¹,平均为 (199.3 ± 171.0) ng·g⁻¹,其质量分数为 35.1% ~ 78.95%;4 ~ 6 环 PAHs 质量浓度为 15.98 ~ 470.5 ng·g⁻¹,平均为 (168.6 ± 187.8) ng·g⁻¹,占到总 PAHs 的 21.05% ~ 64.9%。7 种致癌性 PAH 质量浓度为 10.07 ~ 347.6 ng·g⁻¹,平均为 (118.4 ± 136.4) ng·g⁻¹(表 1)。

表 1 地下河沉积物和水中的 PAHs 浓度¹⁾

化合物	沉积物(<i>n</i> = 8)/ng·g ⁻¹		水(<i>n</i> = 12)/ng·L ⁻¹	
	mean ± SD	range	mean ± SD	range
Nap	94.75 ± 105.5	14.45 ~ 345.2	151.2 ± 99.96	46.45 ~ 410
Acy	10.4 ± 10.22	2.06 ~ 34.84	230.2 ± 227.9	2.06 ~ 883.2
Ace	9.25 ± 5.27	2.75 ~ 17.62	68.4 ± 84.08	4.24 ~ 271.2
Flu	33.55 ± 18.47	11.96 ~ 67.4	257.2 ± 322.3	13.24 ~ 993.8
Phe	49.02 ± 36.39	10.37 ~ 118.2	440.3 ± 990.1	ND ~ 3 453
Ant	2.34 ± 2.38	0.45 ~ 7.52	28.74 ± 64.09	0.67 ~ 222.8
Fla	14.65 ± 15.01	1.63 ~ 46.2	164.7 ± 372.2	ND ~ 1 285
Pyr	14.66 ± 15.62	1.74 ~ 46.41	97.01 ± 216.3	ND ~ 748.1
BaA	9.17 ± 11.25	0.79 ~ 29.44	ND	ND
Chry	38.72 ± 47.86	2.76 ~ 132.5	0.64 ± 0.82	ND ~ 2.41
BbF	28.66 ± 33.33	2.35 ~ 93.18	ND	ND
BkF	14.56 ± 12.18	2.27 ~ 34.69	ND	ND
BaP	13.93 ± 18.54	0.67 ~ 48.48	ND	ND
InP	8.34 ± 12.67	0.77 ~ 38.65	ND	ND
DaA	4.99 ± 8.05	0.46 ~ 24.52	0.27 ± 0.63	ND ~ 1.7
BgP	20.99 ± 30.41	2.55 ~ 94.76	ND	ND
∑ PAHs	367.9 ± 342.6	58.2 ~ 1 051	1 439 ± 2 248	81.5 ~ 8 089
2 ~ 3 环 PAHs	199.3 ± 171.0	42.22 ~ 590.7	1 176 ± 1 663	78.95 ~ 6 056
4 ~ 6 环 PAHs	168.6 ± 187.8	15.98 ~ 470.5	262.6 ± 588.2	ND ~ 2 033
∑ PAHscar	118.4 ± 136.4	10.07 ~ 347.6	0.91 ± 0.83	ND ~ 2.41

1) ND 表示未检测到; ∑ PAHscar 为致癌性 PAHs

从以上分析可知,地下河水和沉积物中虽然都以 2~3 环 PAHs 为主,但沉积物 4~6 环 PAHs 的比重明显比水中增高. 7 种致癌性 PAHs 也是明显富集于沉积物中,水中几乎未检测到. 这主要是因为随着苯环数增加,PAHs 化合物水溶解性越低,亲脂性越强,正辛醇-水分配系数越高,沉积物对正辛醇-水分配系数越高的 PAHs 化合物具有强烈的吸附作用. 从图 2 可知,除了 2013 年 6 月外,地下河水中沉积物中 PAHs 浓度变化一致,可能的原因为 PAHs 在沉积物和水中的平衡和非平衡分配行为,推测水和沉积物之间存在低环 PAHs 紧密交换.

2.2 地下河沉积物 PAHs 影响因素分析

研究表明沉积物中有机质的组成、种类及粒径都会对沉积物中 PAHs 的环境行为和归宿产生影响^[3]. 沉积物 TOC 含量是控制 PAHs 质量浓度及分布的主要因素^[3,4,14, 24]. 然而,Wu 等^[25]的研究表明沉积物中的 TOC 与 PAHs 并无关系. 图 3 显示老龙洞地下河沉积物 TOC 与总 PAHs 质量浓度呈显著正相关,同时分别与低环 PAHs(以 Phe 为例)和高环 PAHs(以 BaP 为例)显著相关,表明了沉积物有机质是影响 PAHs 污染的主要因素,但是 16 种 PAH 化合物中, InP、DaA 以及 BgP 与 PAHs 质量浓度相关系数均小于 0.5,相关性不显著,说明除了有机质

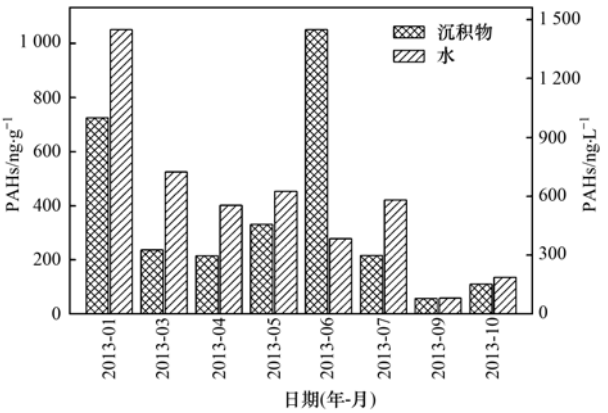


图 2 地下河沉积物和水中的 PAHs 含量比较

Fig. 2 Comparison of PAHs contents between sediment and water

外,可能还有另外的因素在影响沉积物 PAHs 的污染. Zhang 等^[26]发现 PAHs 与 TOC、黏粒、黏粒 + 砂粒有强烈的相关性,指出 TOC、黏粒、黏粒 + 砂粒对沉积物 PAHs 污染有非常重要的影响. 郭建阳等^[16]研究表明 PAHs 主要分布于沉积物的小粒径部分,大粒径中 PAHs 质量浓度较小,并且发现 TOC 含量是决定 PAHs 在不同粒径中分布的主要因素.

2.3 地下河中沉积相-水相多环芳烃的分配

利用野外实测沉积物、水中多环芳烃化合物质量浓度,由于高环 PAHs 在水中的检测率很低或者

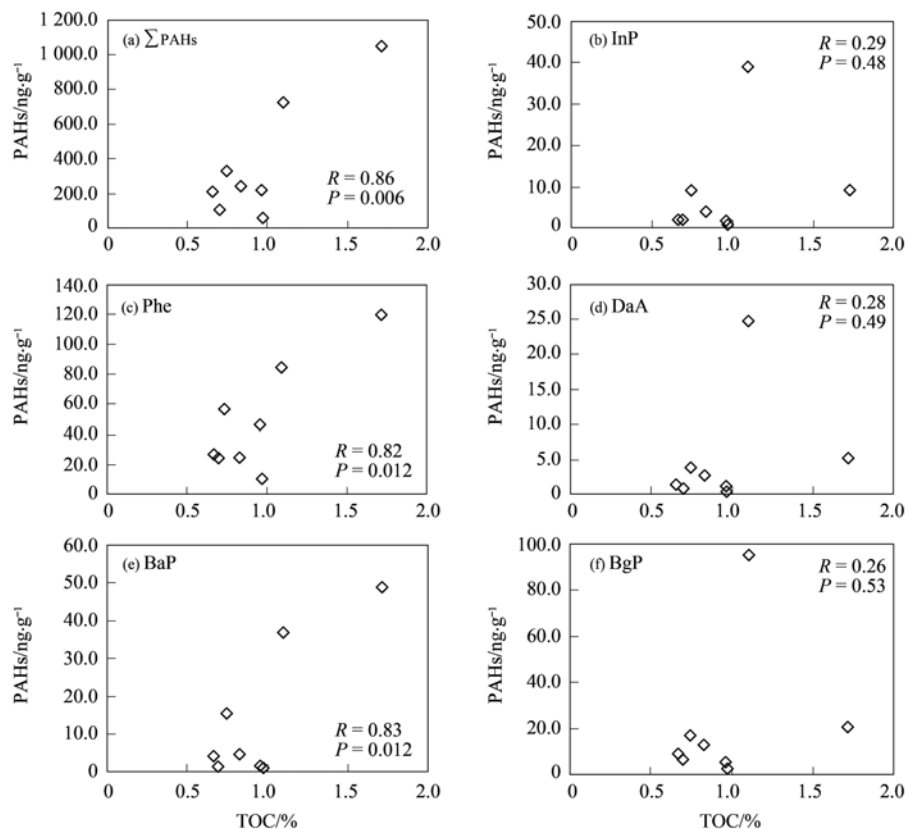


图3 地下河沉积物 TOC 与 PAHs 关系

Fig. 3 Relationship between PAHs and TOC in underground sediments

没有检测到,只计算图4所列的PAHs化合物 K_p 值.老龙洞地下河多环芳烃化合物沉积物-水相 K_p 值分布在 $55.74 \sim 46067 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, K_p 值较大,并且基本上随PAHs化合物环数的增加而增大,说明沉积物富集了大量PAHs,环数越大的更趋向于吸附在沉积物中.

许多研究发现利用这种关系预测的 K_p 值与现

场直接测定有较大差异^[6,20,27],原因主要是野外并不像室内那么理想,而是受到多种环境因素的影响,还存在着诸如胶体有机质或溶解态有机质和碳黑(SC)这类物质影响分配系数.从表2可以看出,除了DaA外,老龙洞沉积物中实测的有机碳分配系数都比预测值高,低环PAHs更加富集于沉积物中,这可能是沉积物中PAHs组成以2~3环为主的原因.

$\lg K_{ow}$ 值见表2,将 K_p 值有机碳归一化处理,所得 K_{oc} 值取常用对数与正辛醇-水分配系数 K_{ow} 作图,发现两者存在显著相关关系(图5),由此计算得到线性自由能方程:

$$\lg K_{oc} = 0.57 \lg K_{ow} + 2.33 \quad (R^2 = 0.75)$$

图5中虚线为Seth等^[30]在室内平衡状态下测得的多环芳烃颗粒物-水相间有机碳标准化分配系数的上下限范围(上限: $\lg K_{oc} = 1.08 \lg K_{ow} - 0.41$; 下限: $\lg K_{oc} = 0.99 \lg K_{ow} - 0.81$).从中可以看出,地下河PAHs的 $\lg K_{oc}$ 值大部分超过预测值上限,少数分布在预测值范围之内. PAHs化合物明显高于预测值上限,说明多环芳烃强烈吸附在颗粒物上,低于预测值下限则表明其分配受溶解性有机质的影响.样品中实测 K_{oc} 值均高于预测值,同样的结果在其他

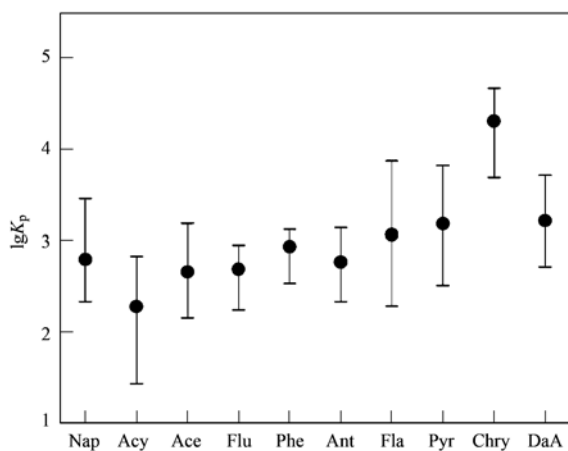


图4 PAHs在地下河沉积物-水相分配系数

Fig. 4 Partitioning coefficients of PAHs in sediment-water interface of underground river

表 2 研究区 PAHs 有机碳吸附平衡常数与预测值比较¹⁾

Table 2 Comparison of observed $\lg K_{oc}$ and predicted $\lg K_{oc}$ in the study area

PAHs	$\lg K_{ow}$	$\lg K_p^{obs}$	$\lg K_{oc}^{obs}$	$\lg K_{oc}^{pred}$	$\lg K_{oc}^{obs} - \lg K_{oc}^{pred}$
Nap	3.37	2.79	4.79	2.99	1.80
Acy	4.00	2.28	4.27	3.61	0.66
Ace	3.92	2.66	4.65	3.53	1.12
Flu	4.18	2.69	4.68	3.79	0.89
Phe	4.57	2.93	4.92	4.17	0.75
Ant	4.54	2.77	4.76	4.14	0.62
Fla	5.22	3.06	5.05	4.82	0.23
Pyr	5.18	3.18	5.17	4.78	0.39
Chry	5.86	4.30	6.32	5.50	0.82
DaA	6.75	3.21	5.30	5.45	-0.15

1) $\lg K_{ow}$ 值来自于文献 [28]; $\lg K_{oc}^{pred} = 0.989 \lg K_{ow} - 0.346$ [29]

研究中都有发现^[4,6,11]。造成这种现象的主要原因为颗粒物中黑碳类等聚合态有机质的强烈吸附及溶解相中低浓度的 PAHs^[31]。线性自由能方程的斜率用来表征颗粒物的亲脂性,斜率为 1 认为颗粒物与正辛醇有一致的亲脂性,斜率 < 1,相对正辛醇来说,颗粒物亲脂性能较低,颗粒物对 PAHs 化合物的亲和力较差,即老龙洞地下河沉积物对 PAHs 化合物的弱亲合力。

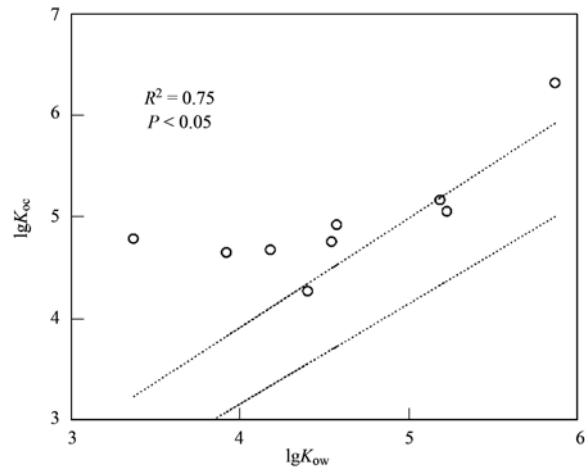


图 5 $\lg K_{oc}$ 与正辛醇-水分配系数 $\lg K_{ow}$ 之间的关系

Fig. 5 Relationship between $\lg K_{oc}$ and $\lg K_{ow}$ in sediment-water interface

3 结论

(1) 相对于溶解态 PAHs, 沉积物内中、高环 PAHs 的比重相对富集,但仍以低环 PAHs 为主。这主要是因为随着分子量的增大,PAHs 化合物水溶性越低,亲脂性越强,越容易吸附在颗粒物上。

(2) 老龙洞地下河沉积物 TOC 与总 PAHs 质量浓度呈显著正相关,表明了 TOC 是影响沉积物 PAHs 污染的主要因素,但 InP、DaA 以及 BgP 与

TOC 相关性不显著。说明除了有机质外,还有另外的因素在影响沉积物 PAHs 的污染。

(3) 老龙洞地下河多环芳烃化合物沉积物-水相 K_p 值分布在 55.74 ~ 46 067 L·kg⁻¹ 范围内, K_p 值较大,并且基本上随 PAHs 化合物环数的增加而增大而趋向于吸附在沉积物中。PAHs 的 $\lg K_{oc}$ 值几乎高于预测值,大部分高于预测值上限,多环芳烃强烈吸附在颗粒物上。线性自由能方程的斜率 < 1,表明地下河沉积物的亲脂性较差。

致谢: 感谢西南大学地理科学学院师阳、梁作兵、王尊波等人在野外采样和室内实验中的帮助!

参考文献:

[1] Tao S, Cao H Y, Liu W X, *et al.* Fate modeling of phenanthrene with regional variation in Tianjin, China [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(11): 2453-2459.

[2] Haitzer M, Höss S, Traunsperger W, *et al.* Effects of dissolved organic matter (DOM) on the bioconcentration of organic chemicals in aquatic organisms-A review [J]. Chemosphere, 1998, **37**(7): 1335-1362.

[3] Shi Z, Tao S, Pan B, *et al.* Partitioning and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers in Tianjin, China [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(2): 492-500.

[4] 罗孝俊, 陈社军, 余梅, 等. 多环芳烃在珠江口表层水体中的分布与分配[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2385-2391.

[5] Ya M L, Wang X H, Wu Y L, *et al.* Enrichment and partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sea surface microlayer and subsurface water along the coast of Xiamen Island, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **78**(1-2): 110-117.

[6] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 多环芳烃在长江口滨岸颗粒物-水相间的分配[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1126-1132.

[7] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 广西大石围天坑群地下水水中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1081-1087.

[8] 孔祥胜, 祁士华, Oramah I T, 等. 大石围天坑群地下水沉积物中 PAHs 的污染特征[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(8):

- 42-48.
- [9] 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 等. 岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3722-3730.
- [10] 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 等. 岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 855-861.
- [11] 邓红梅, 陈永亨, 常向阳. 多环芳烃在西江高要段水体中的分布与分配[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3276-3282.
- [12] 朱樱, 吴文婧, 王军军, 等. 小白洋淀水-沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 637-646.
- [13] Li H Y, Lu L, Huang W, *et al.* In-situ partitioning and bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons among water, suspended particulate matter, and fish in the Dongjiang and Pearl Rivers and the Pearl River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **83**(1): 306-316.
- [14] Qin N, He W, Kong X Z, *et al.* Distribution, partitioning and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water-SPM-sediment system of Lake Chaohu, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **496**: 414-423.
- [15] 李海燕, 段丹丹, 黄文, 等. 珠江三角洲表层水中多环芳烃的季节分布、来源和原位分配[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 2963-2972.
- [16] 郭建阳, 王静, 朱元荣, 等. 滇池沉积物中多环芳烃赋存状态及其再分配的初步研究[J]. 地球与环境, 2014, **42**(1): 11-16.
- [17] 押森磊, 王新红, 吴玉玲, 等. 珠江下游至伶仃洋水体中多环芳烃的相态分布和传输特征[J]. 海洋环境科学, 2014, **33**(4): 525-530.
- [18] 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 等. 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1297-1303.
- [19] 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.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] Karickhoff S W, Brown D S, Scott T A. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments [J]. Water Research, 1979, **13**(3): 241-248.
- [22] McGeoddy S E, Farrington J W. Sediment porewater partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in three cores from Boston Harbor, Massachusetts [J]. Environmental Science & Technology, 1995, **29**(6): 1542-1550.
- [23] Fernandes M B, Sicre M A, Boireau A, *et al.* Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, **34**(11): 857-867.
- [24] Yan W, Chi J S, Wang Z Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Daya Bay, South China [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(6): 1823-1830.
- [25] Wu Y, Zhang J, Zhu Z J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Yalujiang Estuary, North China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(5): 619-625.
- [26] Zhang J, Cai L Z, Yuan D X, *et al.* Distribution and sources of polynuclear aromatic hydrocarbons in Mangrove surficial sediments of Deep Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, **49**(5-6): 479-486.
- [27] Mitra S, Dickhut R M. Three phase modeling of polycyclic aromatic hydrocarbon association with pore-water-dissolved organic carbon [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(6): 1144-1148.
- [28] Mackay D, Shiu W Y, Ma K C. Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. Volume II. Polynuclear aromatic hydrocarbons, polychlorinated Dioxins, and Dibenzofurans [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1992. 62-238.
- [29] Karickhoff S W. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils [J]. Chemosphere, 1981, **10**(8): 833-846.
- [30] Seth R, Mackay D, Muncke J. Estimating the organic carbon partition coefficient and its variability for hydrophobic chemicals [J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(14): 2390-2394.
- [31] Booij K, Hoedemaker J R, Bakker J F. Dissolved PCBs, PAHs, and HCB in pore waters and overlying waters of contaminated Harbor sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(18): 4213-4220.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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