

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F_{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放

王晓慧, 毕春娟*, 韩景超

(华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 利用再悬浮模拟 (particle entrainment simulator, PES) 装置模拟了河流底泥在受到上层扰动力后的再悬浮过程. 结果表明, 沉积物性质如粒径组成及 PAHs 含量对沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放影响显著. 再悬浮过程中上覆水体总悬浮颗粒物 (total suspended solids, TSS) 含量与颗粒态 PAHs 之间存在极显著相关关系. 切应力对再悬浮过程中 PAHs 释放的影响体现在两方面. 一方面, 单位体积的颗粒态 PAHs 随切应力增大而增大; 另一方面, 悬浮颗粒上 PAHs 的富集效应随切应力增大而减弱, 是由于切应力强烈导致吸附作用弱的大颗粒进入水体. 上覆水体中的 PAHs 总量在一段时间上升后于 120 min 或 240 min 趋于稳定, 而颗粒态与溶解态之间具有良好响应. 高低环 PAHs 释放行为差异显著, 由于中高环 PAHs 的疏水性, 上覆水体中检测到的多为 3~4 环个体.

关键词: 再悬浮作用; 多环芳烃; 悬浮颗粒物; 释放; 切应力

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2185-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.020

Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension

WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao

(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The resuspension of sediment after being disturbed is simulated by particle entrainment simulator (PES). The conclusions came out as follows. Sediment nature like granulometric composition and sediment PAHs richness markedly affected the release of PAHs. During the resuspension experiment, the total suspended solids (TSS) content of the overlying water showed significant correlation with particulate PAHs. The influence of the shear stress on the release of PAHs was reflected on two aspects. On one hand, its increase was accompanied with the increase of particulate PAHs. On the other hand, the PAHs enrichment effect of TSS decreased with the increase in the shear stress, since the stronger shear stress could draw more coarse particles with fewer PAHs into overlying water. The total PAHs in the overlying water continued to raise before stabilization at 120 min or 240 min. The particulate PAHs and dissolved PAHs answered each other very well. The release behavior among PAHs of different weight varied significantly. Due to the hydrophobic property of heavy weight PAHs, PAHs detected in overlying water were mostly 3-ring or 4-ring.

Key words: resuspension; PAHs; total suspended solids (TSS); release; shear stress

多环芳烃 (PAHs) 是广泛存在的有机污染物之一, 主要来源于不完全燃烧, 具有显著的致畸、致癌、致突变的“三致效应”. 河流沉积物的再悬浮现象常常可以由各种自然活动 (风浪、潮流、潮汐等)、人为干扰活动 (清淤、挖掘采沙、船舶运输、拖网捕鱼等) 以及底栖生物活动 (掘穴、生物灌溉等) 而引起^[1]. 人造煤气时代在沉积物中赋存了大量 PAHs, 且沉积物吸附性较差, 此阶段的沉积物颗粒再悬浮将会对水生生物造成极大的危害, 可使浮游植物发生功能性和结构性的改变^[2,3]. 另有许多研究证实底泥再悬浮对 PAHs 在沉积物-水界面的迁移行为有重要影响, 从再悬浮颗粒物上的解吸是 PAHs 释放的主要途径^[4,5]. 原因在于沉积物中 PAHs 趋于向孔隙水中转移^[6], 一旦有外力作用, 孔隙水中的 PAHs 将更容易释放到上覆水体当中^[7]. 影响沉积物-水界面 PAHs 迁移行为的主要环境因

子包括沉积物本身性质 (如沉积物组成和结构、温度、pH、共存物、胶体等) 和动力学因素 (水动力和生物扰动作用)^[8], 再悬浮颗粒物中有机碳含量和颗粒的比表面积也是重要因素^[9]. 切应力对 PAHs 释放的影响体现在释放量和释放速率两方面, 高切应力可造成在悬浮颗粒吸附更多 PAHs^[10], 且高切应力快速释放效应更明显^[7]. 反映在构成特征上, 切应力增加, 菲及四环的 PAHs 比其他 11 种 PAHs 增幅更大^[10]. 为了进行不同剪应力条件下沉积物再悬浮过程 PAHs 释放的预测, 有研究建立了再悬浮过程中上覆水体 PAHs 浓度预测模型, 预测效果

收稿日期: 2013-10-15; 修订日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271472); 上海市自然科学基金项目 (12ZR1409000); 上海市科委社会发展重点项目 (12231201900); 华东师范大学大型仪器设备开放基金项目

作者简介: 王晓慧 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市地貌与环境, E-mail: manglu2054@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: cjb@geo.ecnu.edu.cn

良好^[11]。

上海地区位于长江中下游平原,坡度较小,因此没有明显的底质推移,又因为位于河口地区,为感潮河流,底质迁移以悬移形式为主,即底泥中的污染物向水相的释放,为污染物向下游迁移时的主要形式^[12]。不同河流的污染状况及沉积物性质有很大差异,而其对再悬浮过程中 PAHs 释放影响的研究还鲜有涉足。本研究旨在探究上海地区典型河流沉积物中 PAHs 在再悬浮过程中的释放行为及扰动力强度、水体及沉积物理化性质等对其释放行为的影响,以期为评测河流中 PAHs 的潜在危害及控制其生物有效性提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

选取上海市黑臭河流桃浦河(TP)与六磊塘(LL)沉积物与水样,作为实验材料。

沉积物样品采用 Ekman-Birge 采泥器(HYDRO-BIOS, Germany),样品放入密封袋密封保存;上覆水采用有机玻璃采样器进行采集,放入有机塑料桶避光保存,迅速运回实验室冷藏保存。本研究采用的是在 Mohamed^[13]的颗粒物夹带装置的原理基础上设计并由华东师范大学科教仪器厂加工的一种室内再悬浮模拟装置 (particle entrainment simulator, PES),详情见文献[14]。

样品运回实验室后,将沉积物样立即置于内径为 127 mm、高 280 mm 的有机玻璃管中,高度为 100 mm,小心注入当地水样 1.4 L。为了使沉积物和上覆水之间的物质达到交换平衡,样品放好后静置过夜。

Lavelle 等^[15]研究指出 0.2、0.3、0.4 和 0.5 $N \cdot m^{-2}$ 的水平大致相当于 375、500、600 和 750 $r \cdot min^{-1}$ 。考虑到大部分海洋和湖泊沉积物的临界力在 0.01 ~ 0.1 $N \cdot m^{-2}$,上海市河流沉积物生物膜较薄,且主要受风浪以及航运等人类活动影响,研究过程中将样品分为 150 $r \cdot min^{-1}$ 、220 $r \cdot min^{-1}$ 不同动力条件下,大致相当于临界力 0.02 $N \cdot m^{-2}$ 、0.07 $N \cdot m^{-2}$,取样间隔为 0、10、30、60、120、240、360、480、600、720 min。取样点设置在距沉积物上方 30 mm 处,以便充分反映界面的交换情况。再悬浮过程持续时间为 12 h,取样量为 200 mL,之后重新注入 200 mL 水样以维持水样体积保持恒定。水样取出后,立即用玻璃纤维滤膜过滤,作为悬浮颗粒物样品。实验过程中,同时监测上覆水中

溶解氧(DO)、酸碱度(pH)、悬浮颗粒物(TSS)等指标,其中 DO 参数测定使用溶氧仪(YSI55),pH 参数测定使用 pH 计(IQ150pH/mV Dual Technology),TSS 参数测定采用 GF/F 玻璃纤维滤膜(Waterman, UK)过滤冻干称重减去滤膜质量再除以过滤体积的方法。

1.2 样品预处理与分析

将收集到的水样过滤,然后使用 HLB 固相萃取小柱(Waters, 美国),在 SPE 装置(Supelco)上进行固相萃取。过柱前,小柱经 5 mL 正己烷、二氯甲烷、甲醇、超纯水淋洗活化平衡,萃取后用 10 mL 二氯甲烷和正己烷混合液(体积比为 3:7)洗脱 SPE 小柱。洗脱液使用定量浓缩仪(DryVap, LabTech)进行浓缩,浓缩到大约 2 mL 将溶剂转换为正己烷,继续浓缩定量至 0.9 mL 后,加入 0.1 mL 十氯联苯作为内标,使用气相色谱质谱联用仪(7890A5975C, GCMS)分析测试。

滤膜样品经冷冻干燥机(CHRIST, 德国)冻干,准确称量滤膜质量,使用加速溶剂萃取仪 ASE300(Dionex, 美国)萃取。萃取条件为:萃取溶剂丙酮和二氯甲烷(体积比 1:1),加热温度 100℃,萃取压力为 1 500 psi(1 psi = 6.895 kPa),静态循环 3 次。收集萃取液,经定量浓缩液浓缩后,溶剂转换为正己烷,然后用层析柱进行层析净化。配制 70 mL 二氯甲烷和正己烷(体积比 3:7)的洗脱液,洗脱净化柱上 PAHs 组分,收集洗脱液。洗脱液经定量浓缩仪浓缩至约 2 mL 时,将溶剂转换为正己烷,继续浓缩至 0.9 mL,加入 0.1 mL 十氯联苯作为内标,使用 GC/MS 分析测试。

PAHs 分析使用配有 CTC 自动进样器的气质联用仪 GC/MS(Agilent7890GC/5975MSD, 美国)。GC/MS 工作条件为 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm HP-5MS 毛细管色谱柱,载气为 He 气,流速为 1 mL · min⁻¹。色谱柱升温程序为柱始温 80℃,保持 2 min,以 10℃ · min⁻¹程序升温至 235℃,不停留再以 4℃ · min⁻¹升温至 300℃,恒温 4 min。质谱电离方式:EI 源,离子源温度 230℃,离子化能量 70 eV,扫描范围(m/z) 50 ~ 500。在 Scan 模式下,使用谱库检索和保留时间定性,在 SIM 模式下保留时间和内标法定量。

以氘代 PAHs: 萘-d8、苊-d10、菲-d10、蒽-d12 和 芘-d12 作为回收率指示物,每 10 个样品加做空白实验和平行样实验,实验结果符合实验要求。其中水样中指示物的回收率为 69.4% ~ 83.0%,颗粒态和沉积物样品中指示物的回收率为 62.6% ~

95.9%.

2 结果与分析

2.1 沉积物理化性质

两处河流沉积物在理化性质上存在较大差异,

桃浦河沉积物相对六磊塘来说,有机质和炭黑含量较高,且黏粒比例较大,达到 19.6% (表 1); 在实际检测过程中,由于采样点附近有垃圾场,污染物可能随径流流入河流并累积在沉积物中,六磊塘沉积物中 PAHs 含量要远高于桃浦河.

表 1 沉积物理化性质

Table 1 Physicochemical properties of different sediments

采样点	简称	位置	\sum PAHs /g·L ⁻¹	OC/%	SC/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
桃浦河	TP	N30°18'32" E121°23'45"	1 429.31	1.76	0.83	5.6	74.8	19.6
六磊塘	LL	N31°04'36" E121°24'36"	6 221.58	1.11	0.31	13.6	77.9	8.5

2.2 模拟再悬浮过程中上覆水理化性质变化

图 1 为再悬浮实验过程中,上覆水体包括 pH、

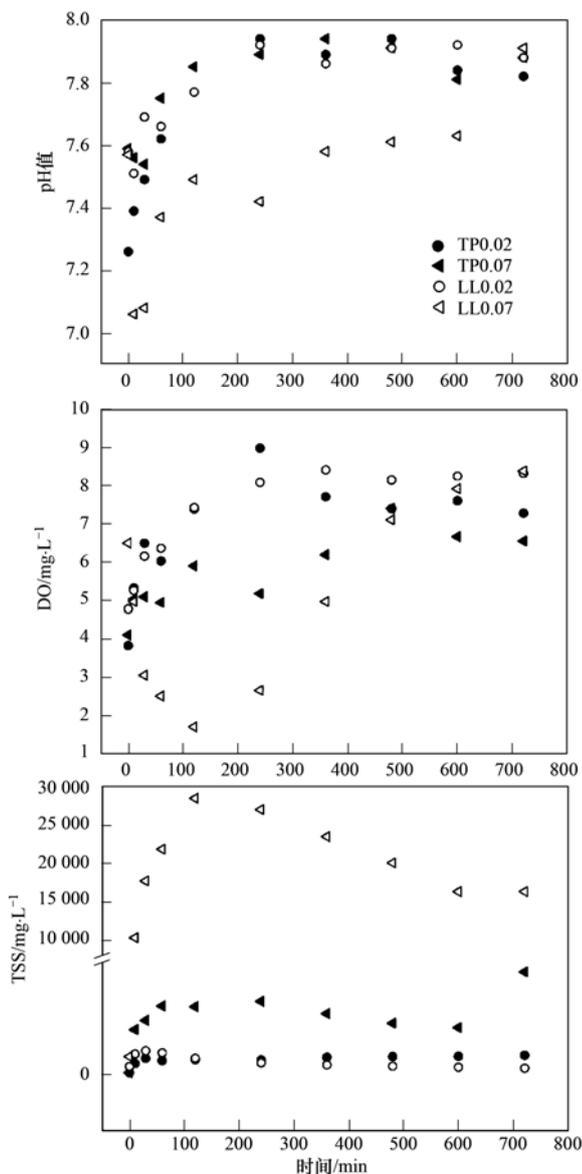


图 1 再悬浮过程中上覆水体中理化性质变化特征

Fig. 1 Changes of physicochemical properties in overlying water during resuspension

DO、TSS 在内的主要理化指标的变化情况. 用 TP0.02、TP0.07、LL0.02、LL0.07 分别表示 0.02 N·m⁻²及 0.07 N·m⁻²切应力作用下的桃浦河样品和六磊塘样品的指标值,下同.

再悬浮过程中,上覆水理化性质发生剧烈变化,各项理化指标均呈现较大幅度波动,与前人的研究相同^[16]. 上覆水 pH 值在 7.06 ~ 7.94 之间变化,呈现碱性特征. 整个实验过程中表现为阶段性上升的趋势,原因有二:一是上覆水体强大的缓冲能力^[17],二是上翻的悬浮颗粒物中携带有部分偏碱性物质^[18],而 120 ~ 240 min 0.07 N·m⁻²作用下六磊塘实验中 pH 下降,这是由于硫化物及金属硫化物上翻至水体,其氧化过程势必使得 pH 降低. 另外,pH 值受到扰动强度和沉积物性质的很大影响. DO 值呈现出先降低再上升的趋势,4 次实验数据在 1.71 ~ 8.98 之间,变化幅度较大,主要原因在于再悬浮过程中的曝气作用. DO 值在整体的上升过程中也出现了暂时的回落现象,也是由于在再悬浮的过程中,有还原性的物质如硫化物或金属硫化物发生了再悬浮^[19],其氧化过程消耗掉水中的溶氧,使其处于不饱状态. 在初始阶段,扰动动力从 0 突变上升,TSS 含量发生了极大的跃变. 0.07 N·m⁻²切应力下,桃浦河在 60 min 时就已经从 91.43 mg·L⁻¹增加到 3 045.46 mg·L⁻¹,六磊塘在 120 min 时从 799.11 mg·L⁻¹升高到 21 852.86 mg·L⁻¹. 到达峰值后,TSS 含量出现了明显的降低,并在实验中后期趋于稳定. TSS 浓度在中后期也有明显的下降过程,主要原因有二:一是模拟再悬浮过程中水体振荡对于沉积物的压实作用,二是较高水体 pH 环境利于金属胶体的絮凝,从而加剧颗粒物聚集并发生沉降.

2.3 再悬浮过程中溶解态与颗粒态 PAHs 的变化特征

桃浦河样品上覆水体中溶解态 \sum PAHs 和颗

粒态 \sum PAHs 变化范围分别是 $833.754 \sim 1\,982.129 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\,847.019 \sim 9\,617.466 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 六磊塘样品上覆水体中溶解态 \sum PAHs 和颗粒态 \sum PAHs 变化范围分别是 $897.659 \sim 1\,875.093$

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3\,654.115 \sim 370\,331 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2). 两个样品的再悬浮实验中,上覆水体溶解态 PAHs 浓度相当,而颗粒态 PAHs 浓度六磊塘样品达到桃浦河样品的 38.5 倍之多.

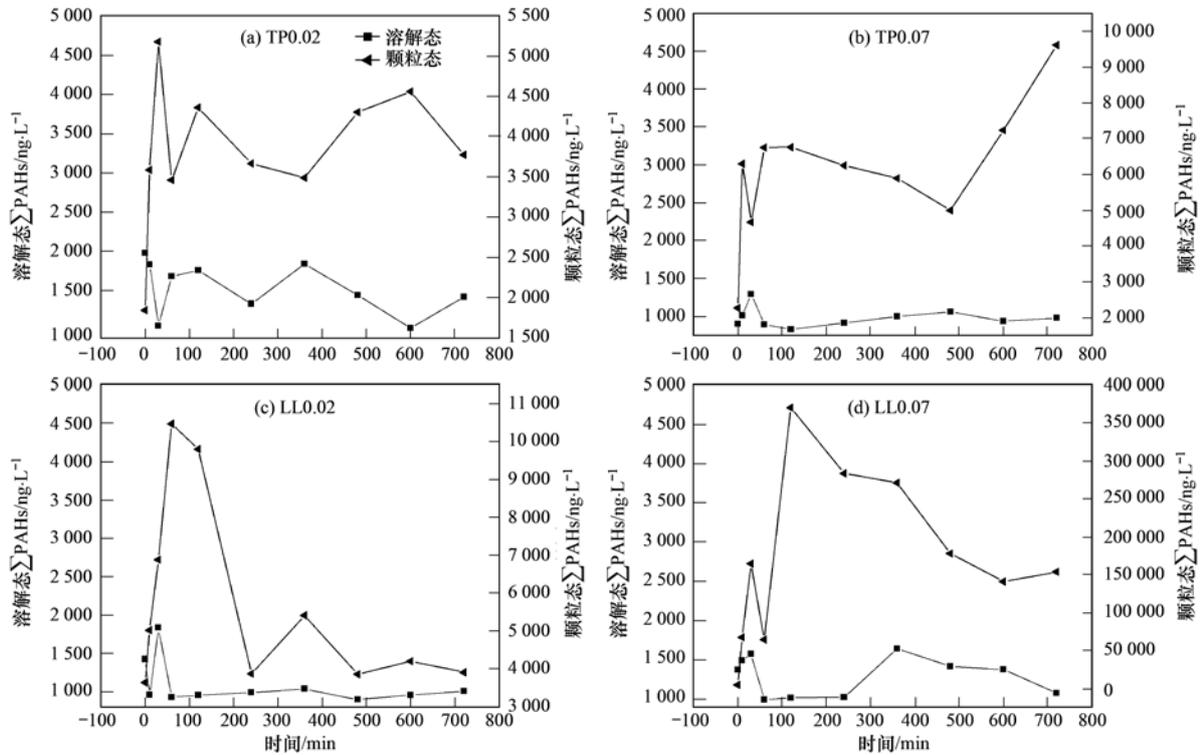


图 2 溶解态与颗粒态 \sum PAHs 的变化特征

Fig. 2 Changing feature of dissolved PAHs and particulate PAHs

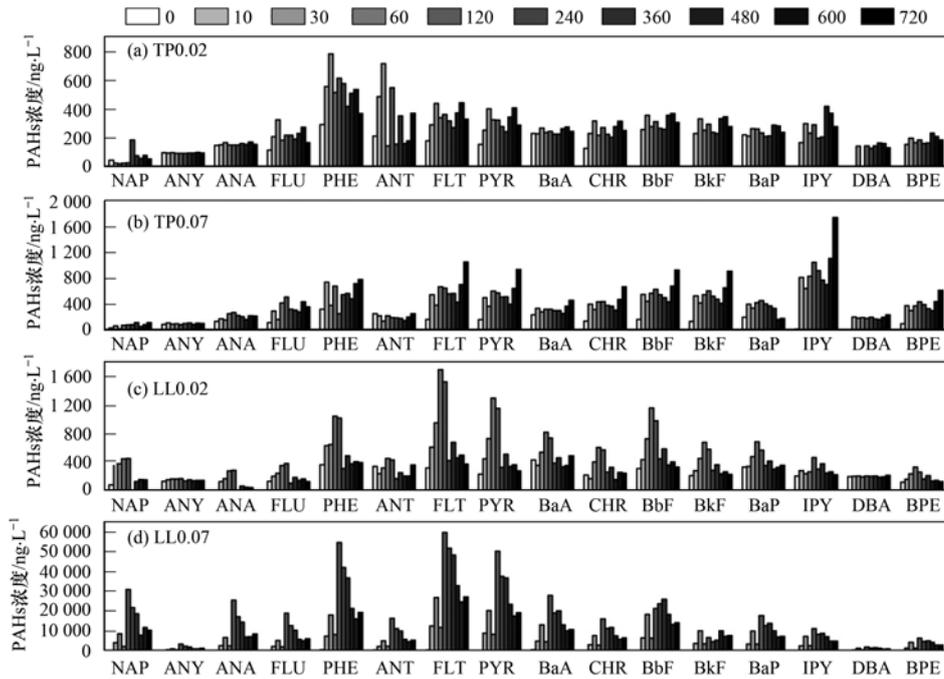
从变化特征上看,4组实验过程均出现颗粒态 \sum PAHs 在实验开始至 60 min 或 120 min 内持续上升的趋势,之后 TP 样品波动仍较大,而 LL 样品下降趋平显著.与颗粒态 \sum PAHs 向上凸起的峰形相比,溶解态 \sum PAHs 曲线中向下凹陷的部分十分明显,即有一个明显的浓度下降再回升过程.颗粒态 \sum PAHs 与溶解态 \sum PAHs 相互之间有良好的响应关系:初期二者浓度均呈现上升的变化(30 min 以内),而后颗粒态 PAHs 持续上升而溶解态 \sum PAHs 出现下降(30 ~ 60 min),在颗粒态 \sum PAHs 出现下降(60 ~ 120 min)之后,溶解态 \sum PAHs 反而出现上升趋势(240 ~ 360 min),最后二者均达到相对平衡.

2.4 上覆水体中 PAHs 的构成特征及其变化

上覆水体中颗粒态 PAHs 覆盖了全部 16 种

PAHs. 颗粒态 PAHs 呈现出先增加后下降的趋势,这种趋势在 LL 样品中更加明显.各环 PAHs 最低值往往出现在实验初期,而最高值出现时间有所不同:TP0.02 出现在中后期,TP0.07 出现在实验结束时;LL0.02 出现在 60 min 时,LL0.07 出现在 120 min 时.二环 PAHs 在总 PAHs 中比例最小(1% ~ 7%),其他几环比例相当,切应力的加强可使其差别增大,例如 TP0.07 中 5、6 环比比例较 TP0.02 多 26.4%,LL0.07 中 4 环比比例较 LL0.02 多 11.8%.随再悬浮实验进行,TP 样品中 2 和 5、6 环增长较 3、4 环明显(6 ~ 8 倍和 2 ~ 4 倍);LL 样品在切应力 $0.07 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 作用下,各环颗粒态 PAHs 浓度可增长到 43.5% ~ 174.7%.在所有模拟再悬浮实验过程中,随时间进行浓度发生显著变化的 PAHs 单体有 PHE、FLT、PYR、BbF(图 3).

在再悬浮实验中,上覆水体溶解态 PAHs 可检测到的 PAHs 单体多为 3 ~ 4 环,而 5、6 环 PAHs 除



图例单位: min

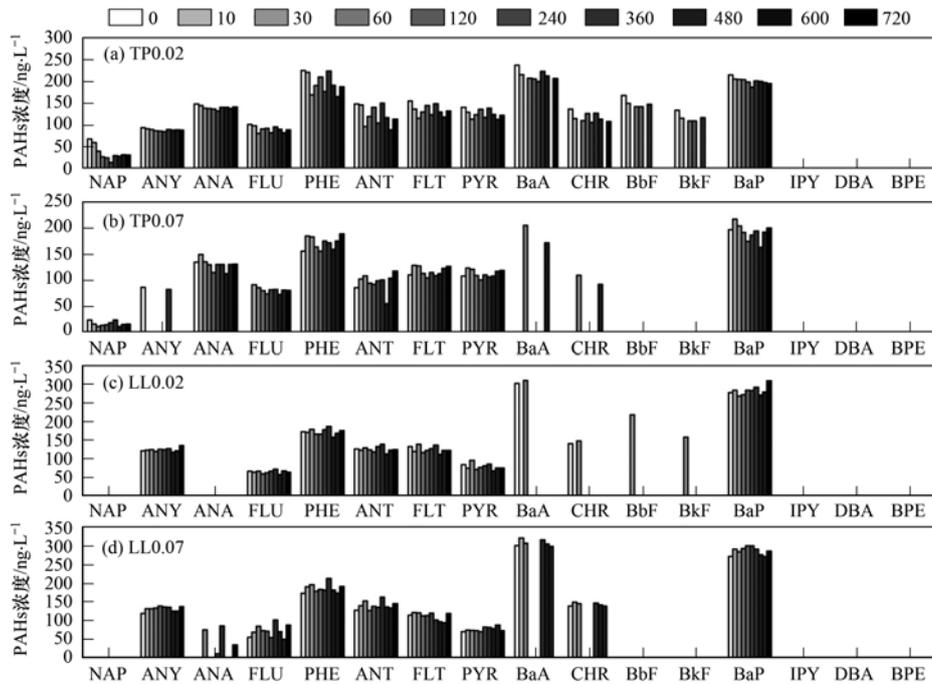
图 3 各单体颗粒态 PAHs 动态变化

Fig. 3 Changes of PAHs with different weight in particulate phase

BaP 检出率较高外,其他单体由于极低的浓度和有限的体积空间检出浓度极小或无法检出(图 4). 除此之外,LL 样品中 NAP、ANA 也出现无法检出的现象. $\lg K_{ow} < 5$ 的高环单体,水溶性较差,极易吸附在

悬浮起来的颗粒上,而不易溶解到水中. 有研究发现 2~3 环单体 PAHs 释放快于 4 环 PAHs^[7,20].

再悬浮过程中,除未检测到的单体外,桃浦河样品各单体 PAHs 的溶解态浓度变化幅度在 9.0 ~



图例单位: min

图 4 各单体溶解态 PAHs 的动态变化

Fig. 4 Changes of PAHs with different weight in dissolved phase

62.2 ng·L⁻¹ 之间,六磊塘样品为 12.3 ~ 46.5 ng·L⁻¹,波动较小. 其中,TP0.02 样品中,ANY、ANA、FLU、BaP 较为稳定,其他单体在前 30 min 持续下降,120 min 内上升,至 360 min 发生短期下降后又持续上升. TP0.07 除 NAP、FLU 先下降外,其他可检测 PAHs 在 10 min 内上升,120 min 内下降,至 480 min 上升,随后下降. LL0.02 中实验过程各单体溶解态 PAHs 总体波动较小. LL0.07 中各单体在 30 min 内呈现上升态势,60 min 时迅速下降、之后有所波动,变化较小. 总体来说,溶解态 PAHs 浓度变化较为活跃的是 3、4 环的某些个体,如 PHE、ANT、FLT、PYR 等.

3 讨论

3.1 不同切应力对 PAHs 再悬浮行为的影响

再悬浮实验中切应力大小对 PAHs 的释放影响巨大,可从实验数据上表现出来. 六磊塘样品在 0.02 N·m⁻² 作用力下,PAHs 的释放为 0 ~ 1 693.43 ng·L⁻¹,在 0.07 N·m⁻² 作用力下,释放量为 0 ~ 59 800.53 ng·L⁻¹,后者是前者的 35 倍之多. 水动力作用是影响水体沉积物中污染物释放的重要因素,它决定着沉积物中污染物经孔隙水的传质速度、沉积物悬浮状态、以及再悬浮颗粒吸附污染物状态^[8]. 另外,水体中 TSS 的含量对 PES 装置的切应力有很强依赖性,切应力越强,所夹带进入水体的沉积物越多,TSS 含量越高^[20],从而使得进入上覆水体的 PAHs 增多,本研究将上覆水中颗粒态 PAHs 含量与相应的悬浮颗粒物浓度进行相关分析可知,TP0.02、TP0.07、LL0.02、LL0.07 的相关系数分别是 0.783、0.876、0.688、0.848 ($P < 0.05$),进一步验证了该结论. 因此,切应力越大,造成上覆水体中 PAHs 含量越大. 现实中水动力条件强烈的河流湖泊 PAHs 释放则更为显著,尤其底泥中储存了大量 PAHs 污染物的情况下^[5].

PAHs 在水体再悬浮颗粒物的质量分数与沉积物本底相比,表现出明显的富集现象. TSS 中 PAHs 与沉积物中 PAHs 含量比可以表征 TSS 中 PAHs 的富集程度,现引入富集系数(enrichment factor, EF):

$$EF = \frac{PAHs_{TSS}}{PAHs_{沉积物}} - 1$$

式中,PAHs_{TSS} 是 TSS 中 PAHs 含量 (ng·g⁻¹), PAHs_{沉积物} 是沉积物中 PAHs 的含量 (ng·g⁻¹).

经过一段时间的再悬浮模拟实验,不同沉积物在不同切应力下的 TSS 中 PAHs 的 EF 值分别为:

TP0.02 (2.92)、TP0.07 (1.41)、LL0.02 (1.04)、LL0.07 (0.38). 桃浦河上覆水体中颗粒物相对六磊塘更加有富集 PAHs 的能力. 而 0.02 N·m⁻² 切应力下上覆水体的 EF 值明显高于 0.07 N·m⁻² 切应力,这是由于 0.07 N·m⁻² 的切应力夹带了更多颗粒大面比表面积小的沉积物进入上覆水体中,由于比表面积小造成 PAHs 的吸附点位较少且单位比表面积内包含更少可以吸附 PAHs 的 TOC^[5],先前的研究也有结论表明随着切应力增加悬浮物中值粒径发生了从 5.1 ~ 17.3 的跃升^[21]. 因此颗粒态 PAHs 存在明显的再悬浮粒径效应,即一定程度内,细颗粒物的优先悬浮使再悬浮颗粒物中 PAHs 表现出富集现象,而随着切应力增大,富集现象减弱最终与沉积物中本底值相近^[22],EF 值趋近于 0. Latimer 等^[23] 的研究中 K_d 随切应力和 TSS 水平的增大出现减小的趋势,归因于随切应力增加悬浮颗粒物吸附能力的逐渐降低,根本原因在于悬浮颗粒物中 TOC 的降低和比表面积的减小.

再悬浮过程中 PAHs 从 TSS 到水体中释放的主要途径是 PAHs 从 TSS 上的解吸过程^[5],高切应力下夹带出更多大颗粒悬浮颗粒物一方面对于 PAHs 向水体的释放有一定的抑制作用,另一方面其比表面积较小的特性也减弱了对水中 PAHs 的吸附. 从整体来看,高切应力对 PAHs 释放的影响取决于二者的综合作用.

3.2 上覆水体与沉积物理化性质对 PAHs 再悬浮行为的影响

将实验过程中实测的 pH、DO、TSS 这 3 种理化性质与再悬浮过程中上覆水体溶解态 PAHs、颗粒态 PAHs 及水相总 PAHs 做相关性分析. 结果显示,pH、DO 与三态 PAHs 均无显著相关性,说明这两种理化性质并没有对再悬浮过程中 PAHs 的赋存迁移起到关键作用. 相反,四组实验过程中,TSS 与颗粒态 PAHs、水体总 PAHs 之间均存在显著相关或极显著相关关系,其中 TP0.07 实验过程中相关性最强,与颗粒态 PAHs 和水相总 PAHs 均达到极显著相关,分别为 $r = 0.876$, $r = 0.884$ ($P < 0.05$).

六磊塘与桃浦河两个样品的实验结果出现明显差别说明沉积物性质对再悬浮过程中 PAHs 释放有重要影响. 沉积物中 PAHs 是上覆水体 PAHs 最主要的来源. 六磊塘的两组实验因为河流底泥本底值较高,因此上覆水体中 PAHs 含量远远高于桃浦河. 沉积物中 PAHs 与沉积物中黏粒含量呈正相关关系 ($R^2 = 0.756$)^[6],细颗粒往往会比粗颗粒更能富集

PAHs^[24]。另外,沉积物性质尤其是粒径组成对发生再悬浮所需要的临界切应力有重要的影响^[25]。这一点从 $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 切应力下桃浦河(含砂粒 5.6%、粉粒 74.8%、黏粒 19.6%)最高 TSS 为 $3\ 166.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,六磊塘(含砂粒 13.6%、粉粒 77.9%、黏粒 8.5%)最高为 $27\ 697.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可以看出,黏粒有增强沉积物黏结力的作用,使得沉积物发生再悬浮的临界切应力更高。再悬浮实验中,六磊塘样品颗粒态 PAHs 很快达到最大值而桃浦河样品在实验中后期仍有大幅波动,也与沉积物的粒径组成有关。

切应力由 $0.02 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 增大到 $0.07 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,桃浦河样品 PAHs 释放减少,而六磊塘样品释放增加。除去桃浦河样品沉积物 PAHs 远远低于六磊塘样品的原因,沉积物的理化性质也是很重要的影响因素。桃浦河样品中 SC 含量高于六磊塘样品,桃浦河粒径组成中黏粒高于六磊塘而砂粒低于六磊塘。这两个原因均可造成随切应力产生的悬浮颗粒物的吸附点较多而使吸附作用大于释放作用。3 个原因综合影响底泥中 PAHs 的释放,并发生与切应力变化相悖的结果。

3.3 再悬浮过程中 PAHs 的释放过程与特征

颗粒态各环 PAHs 在再悬浮的过程中含量变化较为一致,呈现先升高后降低的趋势,峰值出现的时间分别为: TPO.02 是 30 min, TPO.07 是 60 min, LLO.02 是 60 min, LLO.07 是 120 min。对两个样品来说,在上升过程中, $0.07 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 切应力作用下颗粒态 PAHs 比 0.02 的多一个下降的阶段,因此峰值出现时间拖后一个阶段。与溶解态 PAHs 变化趋势相反,溶解态 PAHs 在颗粒态 PAHs 升高的时间段有明显的降低,而在后期颗粒态 PAHs 降低的阶段有明显的升高。颗粒态 PAHs 与溶解态 PAHs 之间有明显的相互响应。因此,本模拟实验中,在前一阶段随实验进行进入到上覆水体的颗粒态 PAHs 呈上升趋势,而后一阶段转变为以 PAHs 的解吸为主,且由于与颗粒物一起进入上覆水体的胶体强大的吸附能力^[8],表现为 PAHs 向水体的释放。再悬浮作用可促进 PAHs 由沉积物向水体的释放,另一方面,当再悬浮颗粒上空白吸附点位增多的时候,对溶解态的 PAHs 又产生吸附作用,这一结论与重金属的研究类似^[19]。

恒定扰动作用一段时间后,上覆水中颗粒态 PAHs 与溶解态 PAHs 的总和开始统一于一稳定范围。达到相对稳定的时间, TPO.02、TPO.07、LLO.07 分别为 120 min, LLO.02 为 240 min。随着悬

浮颗粒物对 PAHs 的吸附解吸,仍存在着溶解态与颗粒态 PAHs 的互相迁移转化。综上所述,野外的河流在常见稳定扰动力作用下可达到上覆水 PAHs 总量的平衡,一旦受到意外的扰动,上覆水中 PAHs 将增加,生态风险由此增大。

4 结论

(1) 六磊塘与桃浦河样品在再悬浮过程中 PAHs 释放行为的不同之处强烈的表现在上覆水体中颗粒态 PAHs 的浓度范围和变化情况上:六磊塘浓度变化大且达到峰值快于桃浦河。沉积物 PAHs 本底对 PAHs 的释放有着决定性的作用,黏粒含量可影响到沉积物再悬浮的临界切应力,且其中所含 TOC 对于 PAHs 的吸附也起到重要作用。

(2) 二者的共性反映在:切应力越高,上覆水体中 PAHs 浓度越高,悬浮颗粒物上 PAHs 的富集程度反而降低,切应力增加可使原本的各环 PAHs 的比例差异进一步加大。高切应力可导致 PAHs 在初期的释放。

(3) 上覆水体的几种理化性质对 PAHs 释放产生综合作用,其中 TSS 影响最为明显,与上覆水体总 PAHs 及颗粒态 PAHs 呈现极显著正相关。

(4) 综观整个再悬浮过程,本研究中水体(颗粒态 + 溶解态) PAHs 浓度呈现逐步上升至平衡的过程,而颗粒态与溶解态呈现明显呼应的上升和下降,再悬浮过程中,仍存在着颗粒态与溶解态 PAHs 相互转化的过程。

致谢:在采样及实验过程中得到的韩景超、王薛平、郭雪同学给予的帮助,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Je C H, Hayes D F, Kim K S. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model [J]. *Chemosphere*, 2007, **70** (2): 187-195.
- [2] Arp H P H, Villers F, Lepland A, *et al.* Influence of historical industrial epochs on pore water and partitioning profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in Oslo Harbor, Norway, sediment cores [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **30** (4): 4843-851.
- [3] Lafabrie C, Garrido M, Leboulanger C, *et al.* Impact of contaminated-sediment resuspension on phytoplankton in the Biguglia lagoon (Corsica, Mediterranean Sea) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **130**: 70-80.
- [4] Viana P Z, Yin K, Rockne K J. Field measurements and modeling of ebullition-facilitated flux of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from sediments to the water column [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**

- (21): 12046-12054.
- [5] Feng J, Yang Z F, Niu J F, *et al.* Remobilization of polycyclic aromatic hydrocarbons during the resuspension of Yangtze River sediments using a particle entrainment simulator [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **149**(2): 193-200.
- [6] Yu Y, Xu J, Wang P, *et al.* Sediment-porewater partition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from Lanzhou Reach of Yellow River, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 494-500.
- [7] Yang Z F, Feng J L, Niu J F, *et al.* Release of polycyclic aromatic hydrocarbons from Yangtze River sediment cores during periods of simulated resuspension[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **155**(2): 366-374.
- [8] 戴国华, 刘新会. 影响沉积物-水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 224-230.
- [9] Wang L L, Yang Z F. Simulation of polycyclic aromatic hydrocarbon remobilization in typical active regions of river system under hydrodynamic conditions [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(7): 1380-1387.
- [10] 冯精兰, 沈珍瑶, 牛军峰, 等. 再悬浮持续时间对沉积物中 PAHs 释放的影响[J]. *科学通报*, 2008, **53**(9): 1045-1050.
- [11] 冯精兰, 祁巧艳, 孙剑辉. 长江武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 释放的预测模型[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 2065-2070.
- [12] 方宇翹, 姚振淮, 孙为民, 等. 城市河流中底泥再悬浮释放重金属的研究[J]. *环境科学学报*, 1987, **7**(3): 289-296.
- [13] Mohamed M F. Response to gradient prolonged-intervals of irrigation under heat-stress conditions and interspecific hybridization for five tepary bean lines [J]. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 1996, **27**(4): 107-123.
- [14] 钱嫦萍, 陈振楼, 胡玲珍, 等. 崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 114-119.
- [15] Lavelle J W, Davis W R. Measurement of benthic sediment credibility in Puget Sound, Washington [A]. In: NOAA Technical Memorandum ERL-PMEL- 72 [C]. 1987, Pacific Marine Environmental Laboratory. Seattle, WA.
- [16] 李猛, 毕春娟, 张晶晶, 等. 再悬浮作用对长江口潮滩 Hg 释放影响的实验室模拟研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3318-3325.
- [17] Simpson S L, Apte S C, Batley G E. Effect of short-term resuspension events on the oxidation of cadmium, lead, and zinc sulfide phases in anoxic estuarine sediments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**(21): 4533-4537.
- [18] 沈军. 物理扰动再悬浮作用下长江口近岸水体中汞的迁移与转化[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [19] 毕春娟, 陈振楼, 沈军, 等. 再悬浮作用下长江河口沉积物中 Hg 的迁移与释放[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3256-3261.
- [20] 冯精兰, 王丽霞, 翟梦晓, 等. 长江水系武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2240-2245.
- [21] Wang L L, Shen Z Y, Wang H Y, *et al.* Distribution characteristics of phenanthrene in the water, suspended particles and sediments from Yangtze River under hydrodynamic conditions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 441-446.
- [22] Kalnejais L H, Martin W R, Signall R P, *et al.* Role of sediment resuspension in the remobilization of particulate-phase metals from coastal sediments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(7): 2282-2288.
- [23] Latimer J S, Davis W R, Keith D J. Mobilization of PAHs and PCBs from in-place contaminated marine sediments during simulated resuspension events[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **49**(4): 577-595.
- [24] Lee B C, Shimizu Y, Matsuda T, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different size fractions in deposited road particles (DRPs) from Lake Biwa area, Japan[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(19): 7402-7409.
- [25] Amos C L, Daborn G R, Christian H A, *et al.* *In situ* erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy [J]. *Marine Geology*, 1992, **108**(2): 175-196.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行