

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	崔海, 张亚红 (1507)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究

刘小红^{1,2}, 司友斌^{1,2*}, 郭子薇¹, 杜成竹¹, 朱聪聪¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 农业部合肥农业环境科学观测实验站, 合肥 230036)

摘要: 汞对环境的危害已经成为研究热点之一, 尤其是水体底泥作为污染物的主要储蓄库, 其对水质以及生物的影响研究非常重要. 本文以合肥市景观水体为研究对象, 调查分析底泥中无机汞和甲基汞的污染现状, 并采用微宇宙试验模拟“底泥-水草-鱼”生态系统中无机汞和甲基汞的转化过程及其甲基汞的富集机制. 结果表明, 合肥市景观水体 10 个底泥样品中无机汞和甲基汞含量范围分别在 $11.74 \sim 13.12 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.37 \sim 2.23 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 微宇宙模拟试验显示, 随着培养时间增加, 底泥中无机汞含量逐渐减小, 甲基汞含量先增加后递减至平衡; 水体中无机汞和甲基汞含量均呈递增趋势; 水蕴草和草金鱼中无机汞的含量呈先增长后下降趋于平衡趋势, 但总量较小, 而水蕴草和草金鱼对甲基汞均具有较高的富集能力, 其中, 草金鱼(身)对甲基汞富集能力最强, 其富集系数也最大.

关键词: 甲基汞; 无机汞; 景观水体; 微宇宙; 转化

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1330-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.04.018

Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City

LIU Xiao-hong^{1,2}, SI You-bin^{1,2*}, GUO Zi-wei¹, DU Cheng-zhu¹, ZHU Cong-cong¹

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Hefei Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hefei 230036, China)

Abstract: Mercury is harmful to the environment, which has gradually become one of the research hotspots. Sediments, as a main repository of pollutants, have an important impact on water quality and the internal organisms, which deserves our research. In this paper, we focused on Hefei landscape water sediment and tried to investigate the status of inorganic mercury and methylmercury pollutions in the sediment. To study the conversion process from inorganic mercury to methylmercury and their enrichment levels and mechanism, we established the ecological chain of “sediment-water-grass-fish” through analog microcosm examination. The results were as follows: from ten water and sediment samples in Hefei landscape water sediment, we found that the contents of inorganic mercury and methylmercury ranged $11.74\sim13.12 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.37\sim2.23 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The microcosm examination showed that: with increasing culture time, inorganic mercury in sediments gradually decreased. There was a phenomenon that the content of methylmercury increased at first and then decreased to reach the balance later. Both the inorganic mercury and methylmercury in water change showed an increasing trend. The enrichment contents of inorganic mercury in *Egeria densa* Planch. and golden mandarin fish (*Siniperca scherzeri* Steindachner) were low while their enrichment of methylmercury could be great. In addition, we found that both the bioaccumulation ability and the enrichment coefficient of methylmercury in the body of golden mandarin fish were the maximum during the same period.

Key words: methylmercury; inorganic mercury; landscape water; microcosm; transformation

21 世纪以来汞成为许多工业以及理化实验室里十分重要的材料, 因此对其毒性和有害性的研究也越来越广泛^[1]. 汞是唯一在常温下以液态形式存在的重金属, 它主要是以无机汞、甲基汞的形式存在于自然界中^[2,3]. 无机汞在自然条件下迁移运输到地球的各个角落并可以与微生物和化学物质发生生物和非生物的甲基化反应, 从而转变成毒性更强的二甲基汞或甲基汞, 然后通过食物链富集进入人体中, 逐渐累积在人体大脑里, 对人体的神经系统产生毒害作用, 严重时危及生命^[4-6].

目前, 很多城市景观水常用于人民娱乐、休闲和养殖等方面, 然而受到污染的景观水在潜移默化

中危害着人类的健康, 一方面通过直接接触含有微量重金属的水造成重金属蓄积中毒而损害人体健康; 另一方面是间接污染水产品, 水体中的重金属被微生物吸收, 通过食物链富集到各类鱼和水草中, 进一步对人体健康构成威胁^[7]. 已有报道我国江湖库底质的重金属的污染率高达 80% 以上, 沉积物中汞的背景值为 $69 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 黄浦江干流表层沉积

收稿日期: 2015-08-18; 修订日期: 2015-11-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B04); 公益性行业(农业)科研专项(201303101-06); 国家自然科学基金项目(40971182)

作者简介: 刘小红(1979~), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为环境生物修复技术, E-mail: liuxiaohong@ahau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

物中汞含量明显增加,苏州河中汞超标率为 62.5%,而城市河流有 35.11% 的河段出现总汞超过地表水Ⅲ类水体标准^[8,9]。但是针对城市景观水体的汞污染现状的研究目前还没有报道。底泥是水体生态系统中的重要部分,经过长期生命活动,水体中各类营养物质、污染物主要聚集在此^[10]。通过大气沉降、废水排放、雨水淋浴和冲刷等各种方式,大量的污染物从各个地方汇入水体,其中一部分沉积到底泥中逐渐富集,长期积累使底泥受到污染^[11]。作为污染物的主要储蓄库,底泥不仅可以向上释放各种重金属污染物,另一方面,底泥又是底栖生物的主要生活场所和食物来源,累积其中的污染物物质可直接或间接地对水生生物产生致毒致害作用,并通过生物富集、食物链放大等过程进一步影响陆地生物和人类^[12]。所以,即便是污染外源得到控制后,底泥作为污染内源,持续向水体释放污染物还是会造成水体重金属污染^[13]。因此,对城市景观水底泥中重金属汞污染状况的调查及对汞的甲基化过程研究是解决治理景观水体汞污染的关键问题。先叙述城市景观水体的汞污染现状,再引入底泥在水生生态系统中对污染物的消纳、转化作用,再后是其他要素的作用以及影响转化富集的因素等。

微宇宙不仅可以了解污染物对生态系统的影响,而且可以合理地将结果外推到自然生态系统,近年来,微宇宙技术已得到越来越广泛的应用^[14]。中国科学院动物所和植物所曾成功地运用实验室循环水生微宇宙、池塘微(中)宇宙、水陆生中宇宙和陆

生中宇宙研究了农药及其它污染物对生态系统结构与功能的影响^[15]。本文以合肥市景观水体底泥为研究对象,调查了底泥中无机汞和甲基汞的污染现状,并采用模拟微宇宙试验建立底泥-水-草-鱼生态链模式来研究底泥中无机汞到甲基汞的转化过程,及其在鱼和草中的富集程度和富集速度。

1 材料与方法

1.1 供试材料

氯化汞 (MC, 纯度 95% 以上), 氯化甲基汞 (MMC, 纯度 95% 以上), 均购于 Merck 公司。四丁基溴化铵 (TBABr), 纯度 ≥99%; 甲醇, 色谱纯; 其他试剂均为分析纯。

供试生物: 水蕴草 (*Elodea densa* Planch.) ; 草金鱼 (*Siniperca scherzeri* Steindachner), 长约 4 ~ 5 cm, 重量约为 10 g 左右; 生物样品均购自合肥市裕丰花鸟市场。微宇宙模拟试验之前, 先采用平均体长为 5 cm 健康无病的草金鱼, 在纯水中进行两天的驯养, 驯养期间不投饵, 微宇宙试验期间草金鱼以水蕴草为饵料。

1.2 底泥样品采集

分别于 2013 年 1 月、5 月和 10 月 3 次对合肥市区内的十处较大景观水底泥进行样品采集, 这十处景观水附近常有大型广场, 或者是游玩公园, 是合肥市民经常聚集进行娱乐、休闲的地方, 其具体采样点位置如图 1 所示。采样时使用 ETC-200 型蚌式抓斗采样器采集底泥表层 5 ~ 10 cm, 各采样点均取样 2 ~ 3 个, 充分混匀后取 2 kg 左右带回实验室,



图1 合肥市区景观水采样点位置示意
Fig. 1 Landscape water sampling position in Hefei City

去除植物残体、瓦砾及较大砾石,冷冻干燥,碾磨过筛,放入已贴标签的广口瓶保存^[16],无机汞和甲基汞含量待测。

1.3 “底泥-水-水蕴草-草金鱼”生态系统中无机汞和甲基汞转化的微宇宙模拟试验

根据上述调查结果,另取甲基汞含量较低的典型样点(植物园)景观水底泥,放在不同生态缸(60 cm × 30 cm × 40 cm)内,每个缸加入 20 kg 底泥,并在底泥中分别加入不同量的 HgCl_2 溶液,使得底泥中 HgCl_2 浓度分别达 1、2、4、6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,培养 3 d 平衡后,加入 50 L 纯水,同时每个缸内加入 25 条草金鱼(已由纯水养殖 3 d)、24 株水蕴草。然后分别在第 1、3、5、7、10、15、20、30 d 对微宇宙模拟生态系统进行采样。每次采样:草金鱼 2 条、水蕴草 2 棵、底泥 10 g、水 10 mL。水样和泥样放进冰箱冷藏保存;鱼体和水草样品用去离子水洗,搅拌机匀浆,冷冻干燥后保存,其中鱼体将鱼头和鱼身分开。所有样品留待测定无机汞和甲基汞浓度^[17,18]。

1.4 无机汞和甲基汞的测定

1.4.1 样品前处理

将样品进行冷冻干燥后,称取 1.0 g 样品加入 25% 的 KOH/甲醇(1:1)提取液 5.0 mL,底泥样品进行微波消解,生物样品采用振荡提取。提取液先加入 2.0 mL 浓盐酸中和过量的碱,再加入 10.0 mL CH_2Cl_2 ,水平振荡 30 min, 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min,下层再用 CH_2Cl_2 重复提取,合并两次萃取的有机相,加入 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液 2.0 mL,振荡 1 h, 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min。取 1.0 mL 上层清液,加入 1 mL 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TBABr 溶液衍生成络合物,经 0.45 μm 滤膜过滤,于 10.0 mL 容量瓶中定容, HPLC 测定^[19,20]。

1.4.2 HPLC 测定条件

Agilent1200 高效液相色谱仪,配可变波长紫外检测器和 HP 化学工作站, C18 Hypersil ODS 色谱柱 4.6 mm × 150 mm, 5 μm 。流动相为含 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 四丁基溴化铵和 0.025 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的水溶液: 甲醇 = 45: 55 (体积比), 柱温 35℃, 流速 1.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测波长 225 nm, 进样量 20 μL (手动进样)^[19]。在测定每批样品时,同时测一空白值,并随机抽取 5% ~ 10% 的样品做双平行测定,符合率在 95% 以上。

1.5 数据处理

微宇宙模型中不同物相中甲基汞的转化系数计算方法:

转化系数 =

$$\frac{\text{不同物相中的甲基汞(底泥和水相)含量}}{\text{底泥中汞含量}} \times 100\%$$

微宇宙模型中不同生物对甲基汞的富集系数计算方法:

富集系数 =

$$\frac{\text{不同生物中的甲基汞(水蕴草和草金鱼)含量}}{\text{底泥中甲基汞含量}} \times 100\%$$

数据分析采用 SPSS 11.0 统计软件进行统计学分析,组间两两比较采用秩和检验。

2 结果与分析

2.1 合肥市景观水体底泥中无机汞和甲基汞含量变化

通过对合肥市景观水体及底泥样品进行采集,测定其中无机汞和甲基汞的含量。结果如表 1 所示,在 10 个取样点中,无机汞含量均远大于甲基汞含量,这与其它学者的调查结果一致^[21~23]。但与《土壤环境质量标准(GB 15618-1995)》相比较,各采样点汞含量均在一级土壤环境质量标准值(0.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 范围内。

由表 1 可知,无机汞含量范围在 11.74 ~ 13.12 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中,黑池坝底泥中的无机汞较高,但总体含量变化幅度不大,这可能是因为本次取样的点都围绕在合肥市区,取样点距离较近,景观水体汞污染来源相似导致不同样点之间无机汞含量变化不大。Young 等^[24]认为表层沉积物中汞的富集归因于近代或现代汞污染的加重,他认为由于颗粒物对汞有很强的吸附性,故一旦沉降,在成岩过程中汞就不会再发生迁移和重新分布,后来的一些研究也表明,沉积物确实真实地反映了汞的沉降^[25,26]。

合肥市景观水体底泥甲基汞的含量范围为 0.37 ~ 2.30 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中,含量最高的是杏花公园,含量较低的是琥珀潭和植物园,底泥中的甲基汞的含量变化幅度比无机汞大。环境中汞的甲基化主要是一个微生物活动的过程,在这个过程中甲基钴胺素是主要的环境甲基供给者,此外,环境中甲基化速率除了受到细菌(如硫酸盐还原细菌)活性的影响外,还与很多物理、化学和生物因素有关,如总汞浓度、活性汞浓度、氧化还原条件、pH、温度、有机物含量、硫化物含量和铁锰循环等^[27,28],因此,在不同的采样点中均检测出甲基汞的含量,这说明这些景观水体底泥中存在着不同程度的汞甲基化作用。本次调查中合肥市植物园采样点靠近董铺水库,因为饮用水源地保护政

策,周边少有污染源,所以植物园景观水底泥中的甲基汞含量处在较低水平,为了透彻了解底泥中汞的迁移转化作用,降低背景的影响,后序模拟试验的供试底泥采集的是植物园景观水体底泥.

表 1 合肥市市区景观水底泥中无机汞和甲基汞的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

采样位置	无机汞				甲基汞			
	最小值	最大值	平均值	标准偏差	最小值	最大值	平均值	标准偏差
琥珀潭	10.48	12.54	11.74	1.1	0.30	0.43	0.37	0.06
包河公园	11.1	12.56	11.88	0.74	1.80	2.00	1.89	0.11
杏花公园	10.78	12.54	11.84	0.94	1.99	2.42	2.23	0.22
雨花潭	11.38	12.04	11.76	0.34	1.36	2.02	1.77	0.36
逍遥津公园	12.38	13.78	13.12	0.7	1.19	1.92	1.67	0.41
黑池坝	13.12	13.38	13.4	0.3	1.09	1.86	1.61	0.44
南淝河(潜山北路)	11.86	13.92	12.78	1.06	1.25	1.96	1.69	0.38
南淝河(长丰路)	12.18	13.14	12.7	0.48	1.09	1.73	1.47	0.34
植物园	12.18	13	12.56	0.42	0.43	1.09	0.68	0.36
安农大校内池塘	11.92	13.52	12.6	0.84	0.76	1.17	0.97	0.21

2.2 城市景观水体生态系统中无机汞和甲基汞的形态转化

2.2.1 底泥中无机汞和甲基汞的转化

微宇宙试验中,当在底泥中添加不同含量初始汞浓度时,底泥中无机汞和甲基汞含量的变化见图 2. 从中可知,底泥中无机汞呈递减趋势,特别是前期,下降明显,但随着时间的变化逐渐趋向平衡,而且,汞添加浓度越大,无机汞含量减少得越多. 而底泥中的甲基汞随着时间的增加逐渐增加,并最终趋

于平衡,并且汞浓度越大的甲基汞量越高. 这主要是因为,在微宇宙试验中,加入的水、水蕴草、草金鱼均不含汞,在不间断的培养过程中,底泥中的无机汞会释放出来,并通过食物链向高级生物流动,所以,随着时间的增加,底泥中的汞含量逐渐降低,此外,由于底泥中微生物甲基化作用,使底泥中部分无机汞转化为甲基汞,所以甲基汞浓度会逐渐增加. 最终,水体中水、鱼和草所富集的无机汞、甲基汞的总量形成一个动态平衡.

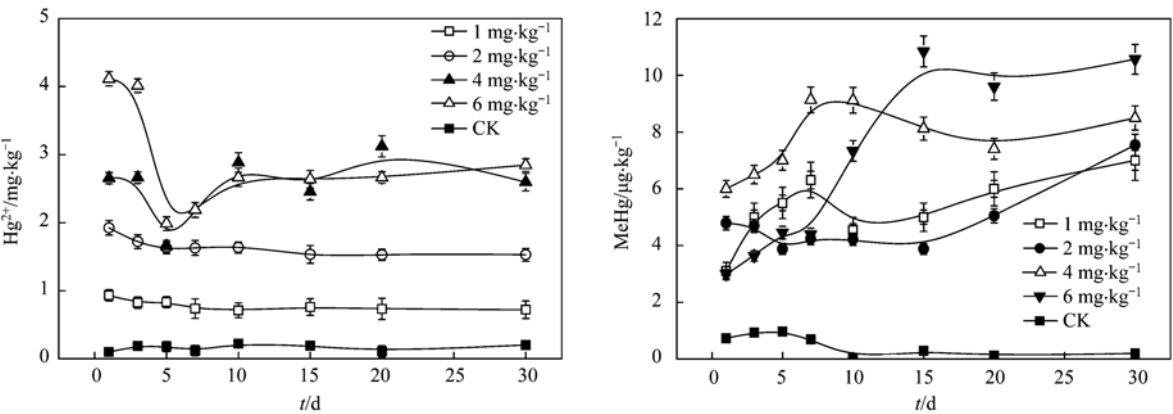


图 2 不同初始汞浓度条件下底泥中无机汞和甲基汞含量变化

Fig. 2 Content variation of inorganic mercury and methylmercury in sediments at different initial concentrations of mercury

2.2.2 水体中无机汞和甲基汞的转化

微宇宙试验中水体中的无机汞和甲基汞含量的变化如图 3 所示. 从中可知,水体中无机汞和甲基汞在培养初期呈递增趋势,然后逐渐趋于平衡,但无机汞变化趋势大于甲基汞,这是由于底泥中的无机汞和甲基汞释放进入水体,引起水体中的汞含量增加,但是试验用水是纯水,水中的微生物较少,所以甲基汞的转化率较小. 但是相对于其他物相中,水中的汞变化总量较小,这可能是因为,一方面,通过

底泥而转化至水中的汞更多地被水体的生物相所吸收,所以残留在水体中的汞总量较少;另一方面,底泥中的汞释放到其他物相中的速度非常缓慢,李永华等^[10]也提出,表层水底部的沉积物是重要的汞贮存库,以沉积物结合态存在的汞重新释放进入水生生态系统往往需要数十年甚至更长的时间.

2.2.3 水蕴草对无机汞和甲基汞的转化

水蕴草对汞的吸收转化作用结果见图 4 所示. 从中可知,水蕴草对无机汞富集量较小,呈现先增长

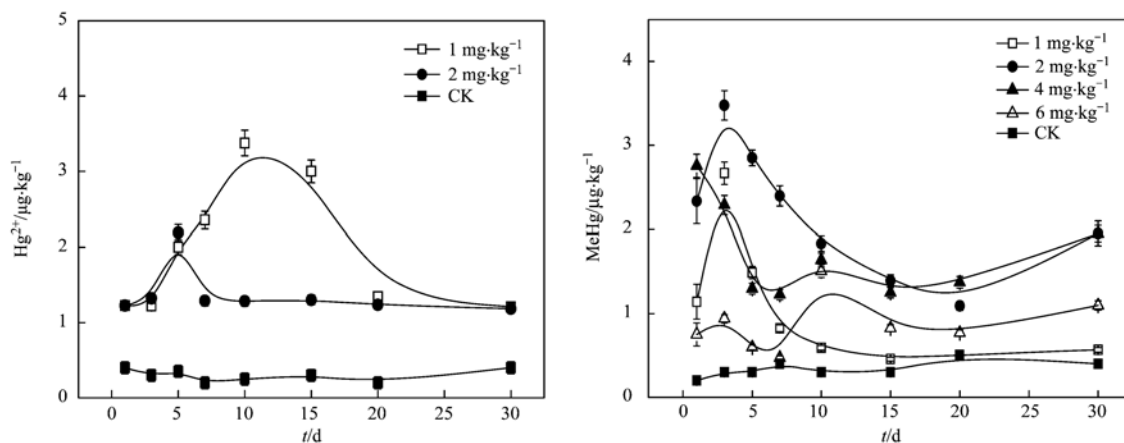


图3 不同初始汞浓度条件下水体中无机汞和甲基汞的含量变化

Fig. 3 Content variation of inorganic mercury and methylmercury in water at different initial concentrations of mercury

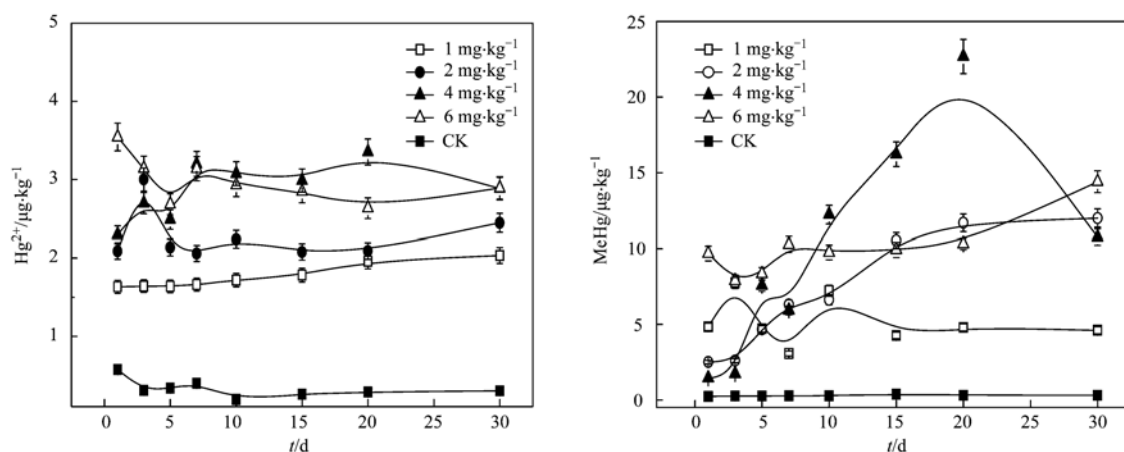


图4 不同初始汞浓度条件下水蕴草体内无机汞和甲基汞的含量变化

Fig. 4 Content variation of inorganic mercury and methylmercury in *Egeria densa* at different initial concentrations of mercury

后下降趋于平衡,但总量上下波动幅度不大.而水蕴草对甲基汞有较好的富集能力,并且能维持在较高的水平上,随着培养时间和初始汞浓度的增加,水蕴草中甲基汞的含量呈增加趋势,在初始汞浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,富集能力最大,水蕴草中甲基汞含量达 $22.7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 这可能是因为,水蕴草的根是生长在底泥中的,它既通过根对底泥中的汞进行吸收,又能对水中的汞进行富集,也可能是因为汞在植物体内更容易甲基化.

2.2.4 草金鱼对汞的转化富集作用

草金鱼作为该试验中的最高营养级生物,可通过食用水草、呼吸以及皮肤吸附等方式富集汞,无机汞和甲基汞分别在鱼身(FB)和鱼头(FH)部分的富集程度如图5所示.从中可知,草金鱼身中的无机汞随着培养时间的增加先增加后减小,而且随着初始汞浓度的增加,鱼身中无机汞的含量增加,但是鱼身中的无机汞总量不高,最高仅为 $7.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

草金鱼的鱼头和鱼身中甲基汞的浓度变化趋势均和无机汞一致,都是先增加后减小至平衡,同时,随着底泥中初始汞浓度增加,甲基汞含量增加,而与上述水蕴草的结果相比,鱼对甲基汞富集能力更大,这可能是因为草金鱼在该微宇宙试验中营养级别最高,草金鱼的主要食饵是水蕴草.另外,图5的结果也显示鱼头中所含有的甲基汞浓度含量比鱼身甲基汞含量较低,特别是在培养前期更明显,而且草金鱼中甲基汞的含量较无机汞高出很多倍,这说明,草金鱼对甲基汞的富集能力比无机汞大,特别是鱼身.有研究表明,大部分鱼类对低浓度的甲基汞富集能力较强,鱼类通过食物链可以将水体中的 ng 级甲基汞富集 $10 \sim 20$ 万倍之间^[29],而且汞主要积累在鱼类的肝脏、鳃和脑部^[30].

2.3 城市景观水体中甲基汞的富集转化系数

将微宇宙试验中不同物相中的 CH_3Hg 含量与汞的初始添加浓度相比较得出不同物相对汞的转化

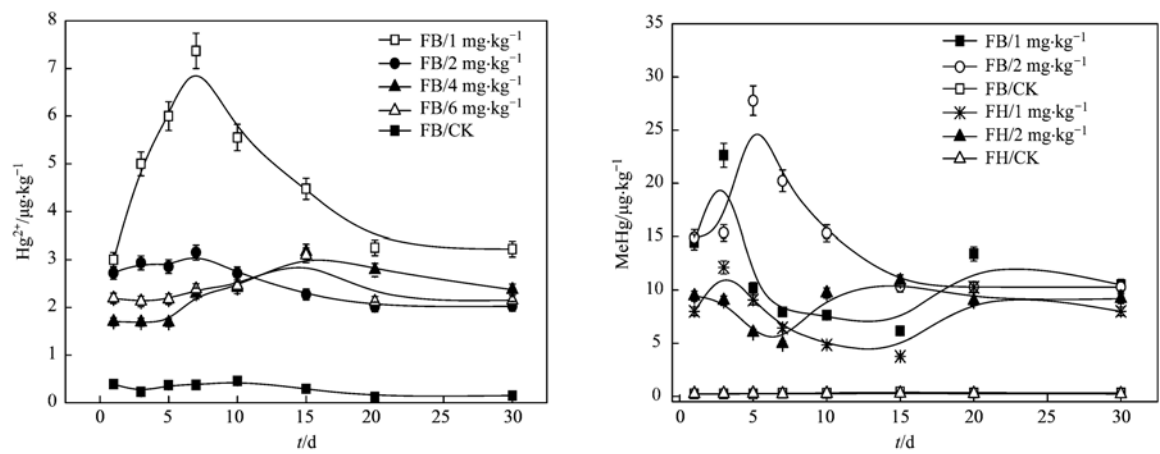


图5 不同初始汞浓度条件下草金鱼体和鱼头内无机汞和甲基汞的含量变化

Fig. 5 Content variation of inorganic mercury and methylmercury in the golden mandarin fish body and the goldfish head at different initial concentrations of mercury

系数如表2所示,从中可知,当添加不同初始汞浓度时,底泥和水对无机汞均有一定的转化能力,其中,水的转化系数较低,这可能是因为试验中加入的水是纯水,水中的微生物数量较少,其转化能力较弱,而试验中采用的底泥是实际环境中所采集的,其中的微生物数量较多,对汞的甲基化能力较强.也有研究人员发现汞在沉积物中8个月后,<1%的同位素富集汞转化为甲基汞^[31].而在当添加汞浓度为1 mg·kg⁻¹时,底泥的转化系数较汞浓度为2 mg·kg⁻¹时大,这可能是因为底泥中添加较多汞时对环境中的微生物有一定的毒害作用,反而阻止了汞的转化.

表3所示的是水蕴草和草金鱼对甲基汞的富集系数,结果表明,水蕴草和草金鱼对CH₃Hg均有一定的生物富集作用,而草金鱼对CH₃Hg的富集系数较大,特别是鱼(身)对甲基汞的富集系数最大,这说明随着食物链的级别增大,越高级的生物对底泥中的汞的富集系数越大,这一方面有可能是因为鱼体自身存在甲基化作用^[32],另一方面有可能是因为生物对甲基汞的生物放大作用,与无机汞相比,甲基汞更易于生物利用,能生物放大食物链,因此,处于食物链较高位置的鱼体内会含有高浓度的甲基汞,其浓度可能比它们生活环境中的甲基汞浓度高100万倍^[33].Kainz等^[34]对不同体积的浮游生物体内甲基汞的生物积累性做了对比分析并发现,相对于细菌和藻类而言,甲基汞的生物积累性在浮游生物的食物链中比较高,而在营养丰富的湖泊中,处于浮游生物食物链顶端的鱼类,其体内的甲基汞含量也比其他生物高得多.但也有研究指出,在鱼肠和鱼肝中可以发生汞的甲基化反应,但鱼类体内自身合成

表2 景观水体不同物相的甲基汞转化系数/%

Table 2 Conversion coefficient of methylmercury in different medium/%					
汞添加浓度 /mg·kg ⁻¹	物相	最小值	最大值	平均值	标准偏差
1	底泥	0.31	0.70	0.53	0.12
	水	0.05	0.27	0.10	0.08
2	底泥	0.19	0.37	0.24	0.06
	水	0.05	0.17	0.11	0.04

表3 水蕴草和草金鱼对甲基汞的富集系数/%

Table 3 Enrichment coefficient of methylmercury in <i>Egeria densa</i> and golden mandarin fish/%					
汞添加浓度 /mg·kg ⁻¹	项目	最小值	最大值	平均值	标准偏差
1	水蕴草	48.7	159.1	104.5	45.0
	草金鱼(身)	123.0	468.1	237.1	141.6
	草金鱼(头)	75.2	258.6	154.5	67.5
2	水蕴草	52.2	271.0	149.5	76.3
	草金鱼(身)	136.3	716.3	350.2	180.0
	草金鱼(头)	117.2	280.3	184.0	54.6

的甲基汞仅占总甲基汞含量的很小一部分,外部输入仍是主要的甲基汞来源^[35].

3 结论

(1)通过对合肥市区10个景观水底泥样品进行调查得出,底泥中无机汞含量范围在11.74~13.12 μg·kg⁻¹之间,其中黑池坝底泥含量最高,但总体变化较小;甲基汞含量在0.37~2.23 μg·kg⁻¹之间,甲基汞含量最高是杏花公园.各采样点内底泥汞含量均在一级土壤环境质量标准值(0.15 mg·kg⁻¹)范围内.

(2)通过微宇宙试验,模拟研究了“底泥-水-水蕴草-草金鱼”生态系统中无机汞和甲基汞的转化过程,结果表明:底泥中无机汞的含量呈先递减后逐渐平衡趋势;而底泥中甲基汞含量变化呈先增加后递减至平衡。水体中无机汞和甲基汞呈先递增后逐渐趋于平衡,无机汞变化趋势大于甲基汞,但是水中的汞变化总量较小。水蕴草和草金鱼对无机汞富集量均较小,呈先增长后下降趋于平衡趋势;而水蕴草和草金鱼对甲基汞均有较好的富集能力,并且能维持在较高的水平上,随着培养时间和汞初始浓度的增加,甲基汞呈增加趋势。其中,草金鱼(身)对的甲基汞富集能力最大,这可能与食物链级别相关。

(3)通过甲基汞的富集转化系数的计算结果可得出,相比于水而言,底泥对汞的甲基化作用更明显;而存在于食物链顶端的鱼对甲基汞的生物富集和生物放大作用最大。

参考文献:

- [1] 覃东立,姜秋隍,付友生,等. 全球汞污染回顾与分析[J]. 环境保护科学, 2009, **35**(4): 75-78.
- [2] 白薇扬,冯新斌,何天容,等. 阿哈水库沉积物总汞及甲基汞分布特征[J]. 生态学报, 2011, **30**(5): 976-980.
- [3] 郑徽,金银龙. 汞的毒性效应及作用机制研究进展[J]. 卫生研究, 2006, **35**(5): 663-666.
- [4] 刘永懋,瞿平阳. 地面水甲基汞环境质量标准研究概述[J]. 水资源保护, 1996, (2): 1-8.
- [5] 李咏梅. 甲基汞的分离和测定[J]. 厦门科技, 1998, (3): 19-20.
- [6] 梁立娜,江桂斌,胡敬田. 冷蒸气发生-原子荧光光谱法测定化工废水中的无机汞和总有机汞[J]. 分析化学, 2001, **29**(4): 403-405.
- [7] 范文宏,陈静生,洪松,等. 沉积物中重金属生物毒性评价的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(1): 36-39, 48.
- [8] 文雪琴,迟清华. 中国汞的地球化学空间分布特征[J]. 地球化学, 2007, **36**(6): 621-627.
- [9] 李宏伟,阎百兴,徐治国,等. 松花江水中总汞的时空分布研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 840-845.
- [10] 李永华,王五一,杨林生,等. 汞的环境生物地球化学研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, **23**(6): 33-40.
- [11] 苏秋克,祁士华,蒋敬业,等. 武汉城市湖泊汞的环境地球化学评价[J]. 地球化学, 2006, **35**(3): 265-270.
- [12] Zhang M K, Ke Z X. Heavy metals, Phosphorus and some other elements in Urban soils of Hangzhou City, China [J]. Pedosphere, 2004, **14**(2): 177-185.
- [13] 陈林华,陈英旭. 污染底泥修复技术进展[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(2): 179-182.
- [14] 杜秀英,竺乃恺,夏希娟,等. 微宇宙理论及其在生态毒理学研究中的应用[J]. 生态学报, 2001, **21**(10): 1726-1733.
- [15] 徐晓白,戴树桂,黄玉瑶. 典型化学污染物在环境中的变化及生态效应[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 399-414.
- [16] 陈业材,冯新斌,王战平,等. 土壤和沉积物汞(Hg)的相态研究[J]. 环保科技, 1995, **17**(2): 38-44.
- [17] Goulet R R, Lalonde J D, Chapleau F, et al. Temporal trends and spatial variability of mercury in four fish species in the Ontario segment of the St. Lawrence River, Canada [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, **54**(4): 716-729.
- [18] 张磊,王起超,邵志国. 第二松花江鱼及蚌汞含量现状及演变规律[J]. 生态环境, 2005, **14**(2): 190-194.
- [19] 颜雪,司友斌,邹嫣,等. 碱消解-HPLC 同时测定土壤中的无机汞和甲基汞[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(9): 89-93.
- [20] 彭德姣,侯娟,陈琳,等. 无机汞在鲤鱼体内生物富集规律的研究[J]. 毒理学杂志, 2007, **21**(2): 129-131.
- [21] Hao W, Zhen H D, Liu Y, et al. Methylmercury and sulfate-reducing bacteria in mangrove sediments from Jiulong River Estuary, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(1): 14-21.
- [22] Gilmour C C, Riedel G S, Riedel G, et al. Activated carbon mitigates mercury and methylmercury bioavailability in contaminated sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(22): 13001-13010.
- [23] 王荔娟,胡恭任. 土壤/沉积物中汞污染地球化学及污染防治措施研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, **26**(5): 453-461.
- [24] Young D R, Johnson J N, Soutar A, et al. Mercury concentrations in dated varved marine sediments collected off southern California[J]. Nature, 1973, **244**(5414): 273-278.
- [25] Lockhart W L, Wilkinson P, Billeck B N, et al. Fluxes of mercury to lake sediments in central and northern Canada inferred from dated sediment cores[J]. Biogeochemistry, 1998, **40**(2-3): 163-173.
- [26] Engstrom D R, Swain E B. Recent declines in atmospheric mercury deposition in the upper Midwest [J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(4): 960-966.
- [27] 何天容,冯新斌,郭艳娜,等. 红枫湖沉积物中汞的环境地球化学循环[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1768-1774.
- [28] Ullrich S M, Tanton T W, Abdrashitova S A. Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, **31**(3): 241-293.
- [29] 阎海鱼,冯新斌,LIANG L,等. GC-CVAFS 法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究[J]. 分析测试学报, 2005, **24**(6): 78-80.
- [30] 阮晓,郑春霞,王强,等. 重金属在罗非鱼淡水白鲢和鲤鱼体内的蓄积[J]. 农业环境保护, 2001, **20**(5): 357-359.
- [31] Renner R. Linking atmospheric mercury to fish advisories[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(19): 5828.
- [32] 蔺玉华,张冰艳,卢建民,等. 鱼体汞的甲基化及其甲基汞的吸收与代谢[J]. 水产学报, 1994, **18**(4): 326-329.
- [33] 蔡文洁,江研因. 甲基汞暴露健康风险评价的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2008, **25**(1): 77-80.
- [34] Kainz M, Mazumder. Effect of algal and bacterial diet on methylmercury concentrations in zooplankton [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(6): 1666-1672.
- [35] Hall B D, Bodaly R A, Fudge R J P, et al. Food as the dominant pathway of methylmercury uptake by fish[J]. Water, Air, and Soil Pollutant, 1997, **100**(1-2): 13-24.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the CaoFeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	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