

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138)	
《环境科学》征稿简则 (1155)	
信息 (824, 853, 883)	

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响

梁丽¹, 王永敏¹, 张成^{1,2,3}, 余亚伟¹, 安思危¹, 王定勇^{1,2,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 三峡库区消落带落干期植被生长茂盛, 蓄水后消落带被淹没, 土壤-植物系统在长时间淹水情况下, 随着体系内物理化学性质的改变, 汞形态也会发生变化, 从而对库区水生生态系统中汞含量以及形态带来一定的影响。为此, 本研究选取三峡库区 4 种优势植物室内栽培, 再进行室内模拟淹水试验, 研究淹水后土壤、水体中甲基汞 (MeHg) 以及其他形态汞的变化。结果表明, 淹水过程中植物的存在有利于土壤 MeHg 的生成, 同时对上覆水不同形态汞浓度影响显著。狗牙根作为消落带优势种, 由于其体内总汞及甲基汞含量较高, 淹水后对土壤以及上覆水系统中甲基汞以及其他汞形态的影响最为明显。淹水第 90 d, 狗牙根 + 土 + 江水 (B1) 处理土壤 MeHg 的含量最高, 为 $(1\ 135.86 \pm 113.84) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是不加植物的对照处理土 + 江水 (CK2) 中土壤 MeHg 含量的 2 倍左右; 上覆水总甲基汞 (TMeHg)、溶解态甲基汞 (DMeHg)、总汞 (THg)、溶解态汞 (DHg) 和活性汞 (RHg) 均呈峰值偏左的抛物线状变化, 在第 30 d 时达到峰值, 其中 B1 处理上覆水 TMeHg、THg 和 DHg 最高, 分别为 (2.88 ± 0.06) 、 (40.29 ± 2.42) 和 $(35.51 \pm 3.77) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 三者中溶解态汞是其主要存在形式。因此可以推测三峡库区消落带植物淹水后将增加水库汞污染负荷。

关键词: 植物; 汞; 淹水; 形态变化; 三峡水库

中图分类号: X131; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0955-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.021

Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area

LIANG Li¹, WANG Yong-min¹, ZHANG Cheng^{1,2,3}, YU Ya-wei¹, AN Si-wei¹, WANG Ding-yong^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Plentiful plants in the water-level-fluctuation-zone (WLFZ) of Three Gorges Reservoir (TGR) grow vigorously during the non-flooded period, especially the herbaceous ones. Then, the WLFZ is submerged gradually from the end of September. Soil-plant system that under a long time flooded condition may change the form of mercury, thus resulting in a secondary pollution of the water environment in TGR. To understand the characteristics of mercury species in soils and water after submerged, four kinds of typical plants from TGR were tested in the lab under submerged condition. The results indicated that the plants could promote the formation of soil methylmercury (MeHg), and had a significant effect on the different forms of mercury concentrations of the overlying water during inundation. *Cynodon dactylon* as the dominant species in WLFZ, because of its higher content of total mercury (THg) and methylmercury, the effect on MeHg and the other forms of mercury in the soil and the overlying water system was obvious. After 90 days, the soil MeHg level was the highest in *Cynodon dactylon* & soil & water treatment (B1) [$(1\ 135.86 \pm 113.84) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$]. It was approximately 2 times less than that of the soil MeHg in soil & water treatment (CK2). The variation characteristics of total mercury (THg), reactive mercury (RHg), dissolved mercury (DHg), total methylmercury (TMeHg) and dissolved methylmercury (DMeHg) of overlying water all showed a parabolic shape with a peak skewed to the left, and the peak was reached on the 30th day. Meanwhile, TMeHg, THg and DHg in B1 treatment were the highest, which were (2.88 ± 0.06) , (40.29 ± 2.42) and $(35.51 \pm 3.77) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, and TMeHg and THg in the overlying water were mainly in the form of dissolved state. Therefore, it could be inferred that the water consumption of the Three Gorges reservoir would increase the mercury pollution load of the reservoir.

Key words: plant; mercury; flooding; form variation; Three Gorges Reservoir area

收稿日期: 2015-08-17; 修订日期: 2015-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41373113, 41173116); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015C124); 中国博士后科学基金项目(2013M542242)

作者简介: 梁丽(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: swugrace2010@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

汞(Hg)作为对人类和其他生物最具危险的有毒元素之一,进入水生生态系统后能通过微生物的作用转化为甲基汞,即使很低的浓度也会因鱼体和其他动物生物富集作用而引起生物放大效应,通过食物链对食鱼生物及人类健康造成危害,具有强烈的致畸和致突变作用^[1-3]. 三峡水库作为举世瞩目的特大型水库,是典型的“汞敏感生态系统”,水库环境有利于汞的活化和甲基化^[4]. 根据“蓄清排浑”的水库调度方案,三峡水库每年汛期(6~9月)保持低水位 145 m,冬季(10~12月)蓄水至高水位 175 m,在库区形成了冬水夏陆落差达 30 m,总面积为 349 km² 的巨大消落带^[5]. 一方面,消落带是库区径流的汇集地带,自然也成为环境汞等污染物的汇集区;另一方面,消落带土壤作为水库的最后一道缓冲带,它所汇集的汞等污染物又会影响到水体质量,因此,对水库而言,消落带既是汞的汇,又是汞的源.

消落带春夏季出露成陆,草本植被恢复,生长旺盛,9月蓄水,大量植被淹没进入水库浸泡,植物死亡并逐渐腐烂分解,将营养物质释放到水体中^[6],

并且这个过程会向水体释放溶解性有机质^[7],同时植物分解也会向水体释放自身所含的汞^[8],这些因素都会导致库区水环境压力增加. 国内现有研究主要集中在消落带土壤淹水后养分的释放^[9-11]、重金属分布迁移特征^[12-16]等,对消落带植物-土壤系统淹水后汞的迁移转化则鲜有报道. 因此,本研究通过室内模拟试验分析三峡库区典型消落带优势植物-土壤系统淹水后汞的形态变化特征,以期对三峡水库汞的生物地球化学循环及生态风险提供研究依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

供试土壤、植物及水样于 2014 年 8 月采自三峡库区腹心地带重庆忠县石宝寨新政村干流区域(N30°25'7.5",E108°10'5.5"). 土壤鲜样去除植物残体及砂粒后,一部分用于模拟试验,另一部分用冻干机(LGJ-10C,北京)冻干后,用玛瑙研钵磨细过 100 目筛,测定土壤理化性质(见表 1)、总汞(THg)及甲基汞(MeHg)的含量.

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soils used in this research

pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC ¹⁾ /cmol·kg ⁻¹	机械组成/%			汞含量	
			>0.25 mm	<0.02 mm	<0.002 mm	THg/μg·kg ⁻¹	MeHg/ng·kg ⁻¹
7.475	13.69	16.82	1.47	74.36	15.62	75.26±2.95	417.46±17.55

1) CEC(cation exchange capacity):阳离子交换量

采集的典型草本植物主要包括:狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]、酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium* L.)、苍耳(*Xanthium sibiricum* Patrín ex Widder)和稗草[*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.]. 植物样品一部分用于模拟试验栽培,另一部分用去离子水洗净,将根、茎

和叶剪开,分别用冻干机冻干后,再用微型植物碎样机粉碎过 100 目筛,封装入自封袋中冷冻保存待测定其 THg 及 MeHg. 供试水样取自忠县石宝寨长江干流,其基本性质见表 2. 试验装置由硼硅玻璃制成,尺寸为 L60 cm×W30 cm×H40 cm.

表 2 水样基本性质

Table 2 Properties of water sample in the Yangtze River

pH	DOM ¹⁾ /mg·L ⁻¹	阴阳离子/mg·L ⁻¹					THg/ng·L ⁻¹	MeHg/ng·L ⁻¹
		Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻		
8.12	5.54±0.73	16.25	1.33	5.06	0.14	3.20	23.41±3.67	0.19±0.01

1) DOM(dissolved organic matter):可溶性有机质

1.2 试验设计

称取 10 kg 土壤平铺于硼硅玻璃箱中(除 CK1),按照表 3 所设计的不同处理,在植物+江水以及土+植物+江水处理中栽种已清洗干净的植物鲜样,然后将采集的江水分别缓慢注入玻璃箱中(每个处理加 50 L 江水),在室温为 25℃±2℃条件

下,进行为期 90 d 的模拟淹水试验. 每个处理做 3 个平行,每个样品重复测定 3 次.

1.3 样品采集及分析

分别在淹水的第 1、3、5、10、15、25、35、45、60、90 d,用 Teflon 管虹吸采集上覆水于硼硅玻璃瓶中,然后加浓盐酸酸化至 0.5%(体积分数),4℃冷

藏保存待测. 水样 THg 采用二次金汞齐-冷原子荧光法测定^[17]; 水样中活性汞(RHg)测定需加 SnCl₂ 用金管预富集,测定方法同上^[17]; 溶解态汞(DHg)测定前需过 0.45 μm 滤膜后加 0.5% BrCl 氧化放置 24 h,测定前 30 min 加入 0.02 mL 250 g·L⁻¹的盐酸

羟氨溶液去除游离卤素,用金管预富集后测定,方法同上^[17],该方法的检测限为 0.01 ng·L⁻¹. 水样 TMeHg 按照蒸馏-乙基化-色谱-冷原子荧光(GC-CVAFS)法^[18]测定,水样 DMeHg 测定前需过 0.45 μm 滤膜,其测定方法同上^[18].

表 3 试验设置处理

Table 3 Treatments of experimental setting				
处理分类	1(狗牙根)	2(酸模叶蓼)	3(苍耳)	4(稗草)
对照(CK1)	江水(CK1)			
土+江水(CK2)	土+江水(CK2)			
植物+江水(A)	狗牙根+江水(A1)	酸模叶蓼+江水(A2)	苍耳+江水(A3)	稗草+江水(A4)
植物+土+江水(B)	狗牙根+土+江水(B1)	酸模叶蓼+土+江水(B2)	苍耳+土+江水(B3)	稗草+土+江水(B4)

同时,用微型管状采样器采集土样于自封袋中,然后经冻干机(LGJ-10C,北京)冻干、磨细并过 100 目筛,−20℃ 冷冻保存. 土壤及植物 THg 含量用 DMA-80 固体进样自动测汞仪(MA122, ITALY)直接测定; 土壤 MeHg 采用硝酸和硫酸铜溶液浸提,二氯甲烷萃取并结合水相乙基化等温气相色谱-冷原子荧光法(GC-CVAFS)测定^[19]; 植物 MeHg 用溶剂萃取-水相乙基化衍生-色谱与冷原子荧光检测器(GC-CVAFS)联用的方法测定^[20]; 水体 pH 用 PT-10(Sartorius, Germany)测定; DOM 采用 Sievers InnovOx Laboratory TOC Analyzer(GE, USA)测定.

1.4 质量控制及数据处理

试验所使用的玻璃器皿在使用前均在硝酸(25%,体积分数)溶液中浸泡 24 h 以上,然后经超纯水清洗后,在 500℃ 下灼烧 30 min 后,在洁净无汞的环境下冷却后使用. 分析过程中采用空白试验、平行试验和标准物质测定进行质量控制,试验药品均为优级纯或色谱纯. 所采用的土壤和植物样品总汞标准物质分别为 GBW07405(GSS-5)和 GBW10016(GSB-

7),测定过程中其加标回收率为 94% ~ 107%; 甲基汞测定加标回收率为 86% ~ 116%.

数据分析使用 Origin 8.0 以及 SPSS 18.0.

2 结果与讨论

2.1 上覆水 pH 值和 DOM 的变化特征

从图 1 可以看出,除了对照江水(CK1)处理外,其余处理在淹水初期水体 pH 值下降,随着淹水时间增加,水体 pH 值逐渐升高,至淹水第 90 d 时,水体的 pH 值均高于试验水体初始值,不同植物淹水后水体 pH 值差异不明显. 且通过对比发现,植物+江水(A)处理中水体 pH 值达到最低峰值的时间较植物+土+江水(B)处理早,这可能是由于淹水初期土壤对植物衰亡的缓冲作用所致. 除对照 CK1 外,淹水过程水体 DOM 浓度均呈先上升随后略有下降至平稳的变化趋势(见图 2),且植物+土+江水(B)处理水体 DOM 浓度高于相对应植物+江水(A)处理. 淹水第 90 d 时,在添加植物的处理中,狗牙根+土+江水(B1)处理水体 DOM 浓度最高,为

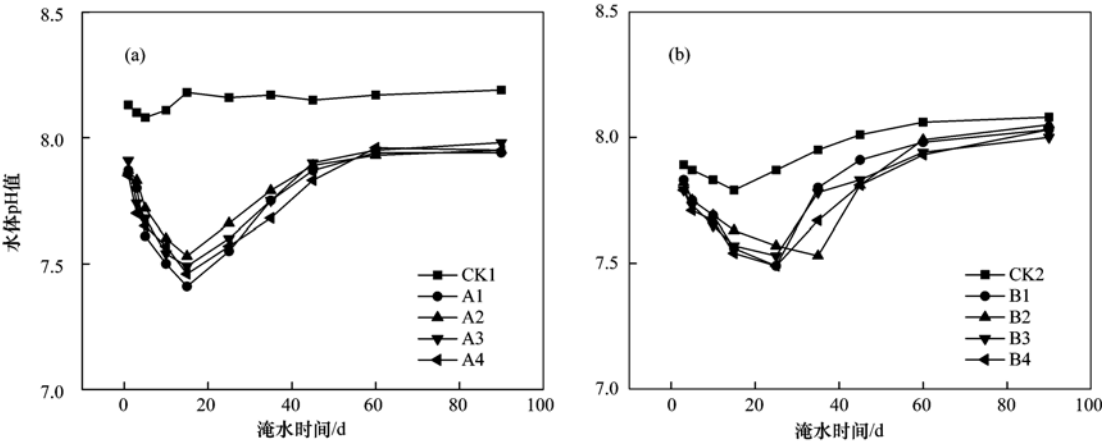


图 1 水体 pH 值的变化特征
Fig. 1 Trends of variations for pH in water

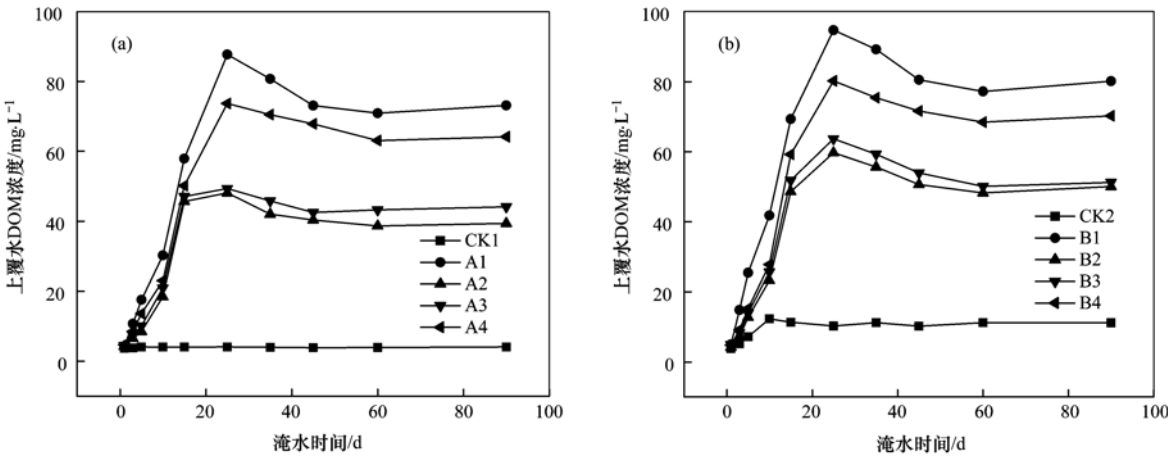


图 2 水体 DOM 的变化特征
Fig. 2 Trends of variations for DOM in water

80.16 mg·L⁻¹, 酸模叶蓼 + 江水 (A2) 处理水体 DOM 浓度最低, 为 39.39 mg·L⁻¹, 而对照 CK1 和 CK2 水体的 DOM 浓度分别为 4.10 mg·L⁻¹ 和 11.16 mg·L⁻¹, 这说明土壤淹没后会向水体释放有机质, 而植物腐解释放的 DOM 则是水体 DOM 浓度增加的重要来源^[21].

2.2 淹水条件下植物对土壤甲基汞的影响

淹水期间, 不同处理土壤 MeHg 含量均呈逐渐升高的趋势, 30 d 左右趋于平衡 (图 3), 添加植物的处理在淹水过程中土壤中 MeHg 含量均明显高于对照 CK2 ($P < 0.05$), 可见植物对土壤 MeHg 的含量有显著影响. 当淹水至第 90 d 时, B1 处理土壤中 MeHg 含量最高, 为 $(1\,135.86 \pm 113.84) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, CK2 处理最低, 为 $(550.57 \pm 57.78) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$. CK2、B1、B2、B3 和 B4 处理中 MeHg 含量较淹水第 1 d 分别增加了 0.23、1.10、0.79、1.17 和 1.23 倍, 各处理土壤 MeHg 水平大小依次为 B1 > B4 > B3 > B2 > CK2. 这一方面是由于因淹水形成的厌氧环境, 有利于汞从被淹没土壤中溶解出来, 从而为甲基化反应提供充裕的、可供甲基化的无机汞^[22-24]. 另外, 由于被淹没的土壤有机质及植物分解产生的有机质为微生物提供了丰富的食物来源, 使硫酸盐还原菌等甲基化细菌大量繁殖, 促进无机汞向甲基汞

转化, 从而提高了甲基汞的含量^[25,26]. 同时, 由于淹水初期水体 pH 值降低, 有利于甲基汞的生成^[27].

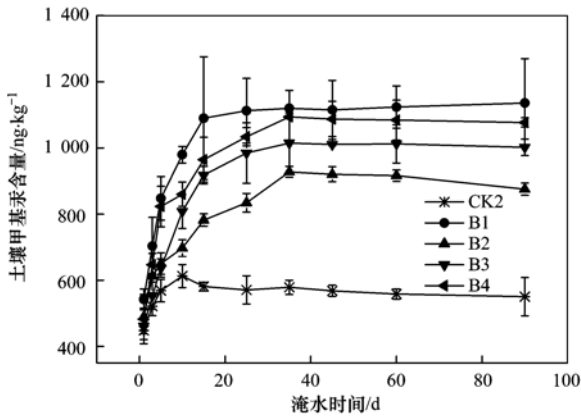


图 3 土壤甲基汞的变化特征
Fig. 3 Trends of variations for MeHg content in soil

按照一级动力学方程对土壤甲基汞拟合发现 (表 4), CK2 处理的土壤甲基汞净增加速率常数 k 最大为 1.674 ± 0.126 , 明显高于其他处理, 而 CK2 处理达到平衡后土壤甲基汞含量却远低于其他处理, 这可能是由于 CK2 处理中可被甲基化的汞是有限的, 而对于其他处理, 淹水过程中植物会释放其体内赋存的汞, 同时还能活化土壤汞, 为甲基化提供充足的汞源, 导致平衡后添加植物的处理土壤甲基汞

表 4 不同处理淹水条件下土壤 MeHg 含量一级动力学拟合结果

Table 4 Fitting results and parameters of mercury complexation in soil for the treatments with different plants				
拟合方程	处理	参数		相关系数 R
		a	k	
$y = a(1 - e^{-kt})$	CK2	551.111 ± 1.496	1.674 ± 0.126	0.934
	B1	$1\,115.699 \pm 9.661$	0.558 ± 0.110	0.928
	B2	867.127 ± 27.723	0.400 ± 0.045	0.904
	B3	$1\,009.286 \pm 7.461$	0.216 ± 0.026	0.952
	B4	$1\,051.353 \pm 28.363$	0.376 ± 0.068	0.922

含量高于 CK2 处理,但是由于不同植物基质有差异导致平衡后土壤甲基汞含量也不同。

2.3 上覆水甲基汞的变化特征

水生生态系统汞可以通过食物链传递、积累、富集和放大。水环境中的痕量汞,特别是甲基汞主要通过食物链逐级传输,从而对人类健康构成威胁。通过模拟试验发现,淹水期间,除对照 CK1 外,其余处理上覆水总甲基汞(TMeHg)浓度呈峰值偏左的抛物线状变化(见图4)。约在第35~40 d时达到峰值,随后 TMeHg 浓度变化速率减缓,并逐渐稳定,这是由于淹水初期,土壤、植物产生的甲基汞向水体释放,而随着淹水时间延长,水体去甲基化反应的进行以及土壤再吸附过程等,使得水体中甲基汞浓度随淹水时间增加呈现先增后减的趋势。淹水第90 d时,无论是在无土(A)或者是有土(B)的处理中,A1和B1上覆水 TMeHg 浓度均为最高,分别为 $(2.62 \pm 0.16) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(2.88 \pm 0.06) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,是淹水第1d

的13.01倍和17.86倍,而A2和B2在每组中均为最低,分别为 $(1.58 \pm 0.24) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(1.91 \pm 0.15) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,是淹水第1d的7.90倍和8.35倍,而对照CK1和CK2上覆水 TMeHg 浓度分别是 $(0.12 \pm 0.02) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.53 \pm 0.07) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,均低于其他处理。添加植物使得有机质输入较为丰富、厌氧环境下硫酸盐还原菌活性较高等因素都是造成上覆水甲基汞浓度升高的原因。统计分析发现,水体 pH 值与水体 TMeHg 含量呈负相关关系,但相关性并不显著,这可能是由于 pH 的变化并不直接影响汞的甲基化率,而是增大环境中甲基汞或其他形态汞的溶解度,使得水体中甲基汞的浓度升高^[28]。

上覆水 DMeHg 浓度变化趋势与 TMeHg 基本一致(见图5)。淹水中期至淹水结束,植物+江水(A)和植物+土+江水(B)水体中 DMeHg 占 TMeHg 的比例均值大于50%,总体看来,DMeHg 主导着 TMeHg 的分配比例,同时也控制 TMeHg 的浓

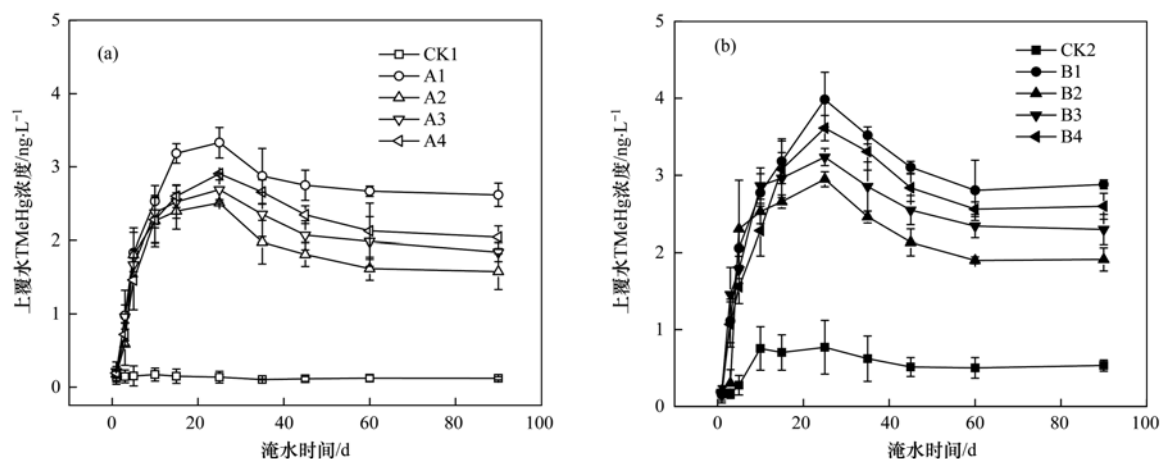


图4 水体甲基汞的变化特征

Fig. 4 Trends of variations for TMeHg content in water

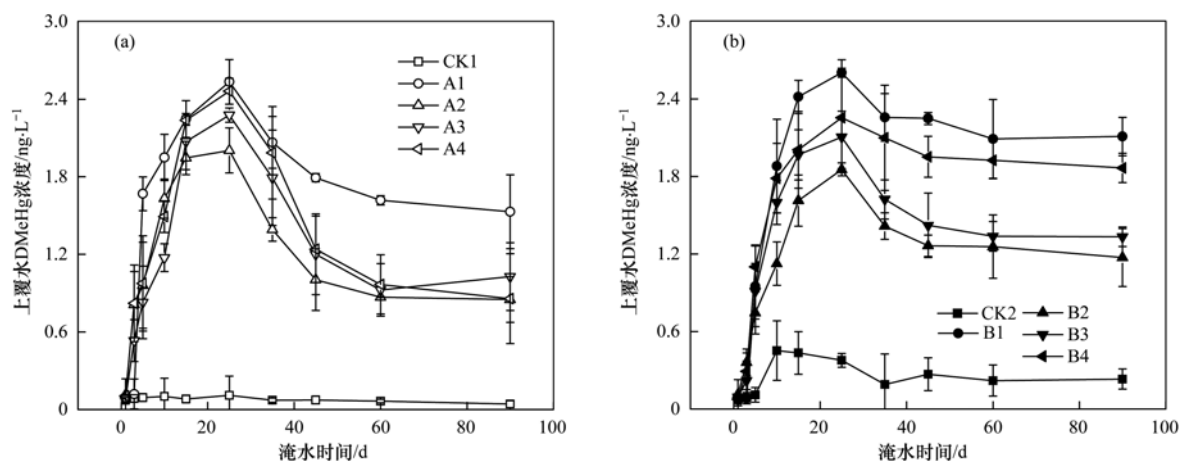


图5 水体可溶性甲基汞的变化特征

Fig. 5 Trends of variations for DMeHg content in water

度变化. 淹水期间, DOM 与上覆水 DMeHg 含量呈显著性正相关关系 ($P < 0.05$), 且已有研究证明 DOM 对 Hg 的溶解性、存在形态有明显的影响, 能促进汞的溶解^[29].

2.4 上覆水总汞及其他形态汞的变化特征

水生系统中汞的迁移及其吸附解吸、氧化还原和甲基化去甲基化等过程受多种因素的影响, 不同价态的汞均可在适宜的环境条件相互转化, 其中无机汞向甲基汞转化的过程是汞在水环境中最受关注的地球化学行为, 而汞的存在形态会直接影响汞的环境化学行为, 从而决定水体中汞的迁移转化过程, 对汞在水体的生物可用性起到重要影响^[30].

由图 6 看出, 对照 (CK1) 上覆水总汞 (THg) 浓度随淹水时间略有下降, 而其余水体 THg 浓度均明显升高, 并呈现先增后减的趋势. 淹水第 90 d 时, A1 和 B1 处理其上覆水 THg 浓度在同类型处理中最高, 分别为 $(26.35 \pm 1.87) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(40.29 \pm 2.42) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 是淹水第 1 d 的 2.12 倍和 3.56 倍, 而最低的则是 A2 和 B2, 分别为 $(20.65 \pm 1.05) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(28.28 \pm 0.24) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 是淹水第 1 d 的 1.34 倍和 2.09 倍, 这可能是由于植物狗牙根本身

所含 THg 较高, 为 $(49.63 \pm 2.78) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且狗牙根其根、茎和叶细小, 较其他植物更容易腐解, 酸模叶蓼所含 THg 为 $(31.16 \pm 1.24) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且每株酸模叶蓼叶片生物量较少, 根、茎较粗, 难以分解, 而其他两种植物稗草及苍耳总汞含量较低, 分别为 $(11.73 \pm 3.24) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(17.59 \pm 1.27) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

对于同类型植物而言, 植物 + 江水 (A) 处理上覆水 THg 浓度均低于相应植物 + 土 + 江水 (B) 处理, 可见, 土壤在淹水过程中对汞的迁移起到了重要作用, 这可能是由于土壤-植物系统对汞的迁移起到了协同作用. 一方面, 土壤对汞再吸附, 也会因淹水或植物根系分泌物而增加汞的溶解性; 另一方面, 植物在生长过程中会吸收土壤汞, 也会因长时间淹水腐解而向水体释放汞^[8,27]. 淹水结束时, 上覆水的 THg 浓度呈 $B1 > B4 > B3 > B2 > A1 > A4 > A3 > A2 > CK2 > CK1$, 这可能是植物分解的汞、土壤中的汞向水体释放所致^[8,26]. 淹水初期, 不同处理上覆水 THg 浓度变化差异较大, 而后期变化则较为缓慢. 这是由于淹水初期受到基质的影响, 而后期由于植物残体一些难分解物质的积累和外界微生物的作用, 使植物的进一步分解受到抑制, 分解速率明显减慢, THg 浓度变化减缓趋于一致.

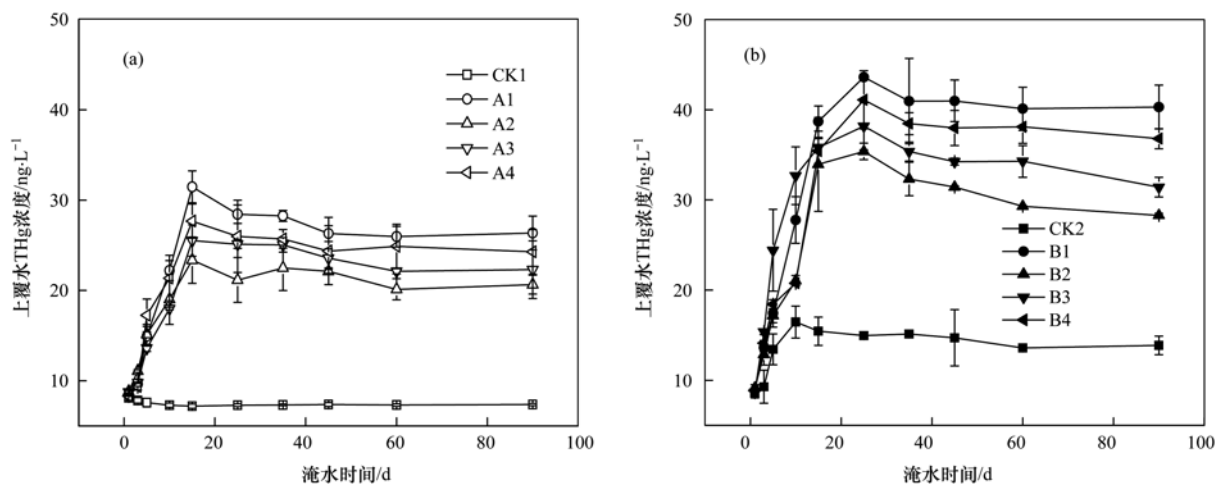


图 6 水体 THg 的变化特征

Fig. 6 Trends of variations for THg content in water

上覆水中 DHg 浓度变化趋势基本与 THg 一致, 且水体中 DHg 与 THg 浓度变化呈显著性正相关 ($P < 0.05$) (见图 7). 植物 + 江水 (A) 与植物 + 土 + 江水 (B) 处理其上覆水 DHg 明显高于对照 CK1 与 CK2 ($P < 0.01$), 在淹水第 40 d 左右达到峰值, 之后保持平稳. 淹水结束时, 植物 + 江水 (A) 处理中上覆水 DHg 浓度增幅最大的是 A1 处理, 为 2.71 倍 (从 $6.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加 $22.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$

$\pm 0.36 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 最小的是 A2 处理, 为 1.14 倍 (从 $6.07 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.28 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加 $12.98 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.89 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$); 植物 + 土 + 江水 (B) 处理中上覆水 DHg 浓度增幅最大的是 B1 处理, 为 4.05 倍 (从 $7.03 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.19 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $35.51 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 3.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), 最小的是 B2 处理, 为 1.80 倍 (从 $7.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.21 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $20.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.25 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). 淹水第 90 d 时, A 与 B 处理中 DHg

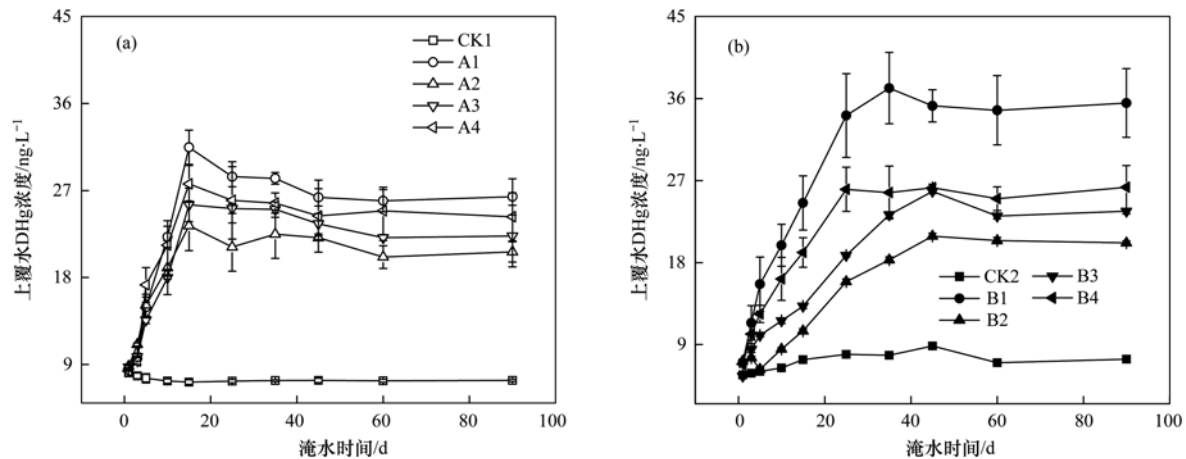


图7 水体 DHg 的变化特征

Fig. 7 Trends of variations for DHg content in water

占 THg 的百分比 (DHg: THg) 范围在 62.86% ~ 93.61%, 说明上覆水中 THg 主要以溶解态形式存在, 这可能是由于淹水造成的厌氧环境使得含汞有机颗粒经过厌氧不完全降解, 形成交替形态有机质, 使得颗粒相的汞进入溶解相中^[31], 此外, 在还原环境中水体和土壤表层铁锰氧化物溶解也可能使水体溶解态汞比例增加^[32].

活性汞 (RHg) 在环境中最容易发生形态的改变, 水体中 RHg 含量的高低会直接反映水体中汞的活化性能和甲基化的能力. 在淹水过程中, 上覆水 RHg 浓度变化趋势基本与 THg 一致, RHg 浓度变化范围在 $(0.42 \pm 0.11 \sim 1.39 \pm 0.17) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $(0.98 \pm 0.37) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于 RHg 主要以游离 Hg^{2+} 形态存在, 淹水过程中, Hg^{2+} 在光照下易生成原子态汞, 使水中原子态汞达到过饱和状态, 并不断进入大气环境中, 也进一步加速了水体中离子态 Hg^{2+} 的光致还原反应, 导致水体活性汞浓度逐渐降低.

3 结论

(1) 消落带植物淹水后将使得上覆水汞浓度升高, 淹水第 30 d 左右达到峰值, 因此可以推测三峡水库在蓄水一个月左右水库汞污染负荷较大, 蓄水前对消落带植物回收处理可以降低水库汞的二次污染.

(2) 植物对水体及土壤汞含量影响较大, 且与植物汞的含量呈显著正相关. 狗牙根作为消落带优势种, 总汞及甲基汞含量较高, 淹水后对汞在水体、土壤迁移转化更为明显. 因此, 消落带生长茂盛的植物, 在淹水后可能会成为水库的潜在污染源并增

加汞在水体的生物可利用性.

(3) 水体中较高的 DHg 为无机汞的甲基化过程提供了丰富的无机汞源, 淹水条件下水体 pH 值降低, DOM 含量升高为无机汞的甲基化提供了有利条件, 植物腐解产生丰富的内源性有机质也是导致甲基化活跃的主要原因.

参考文献:

- [1] Morel F M M, Kraepiel A M L, Amyot M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1998, **29**(1): 543-566.
- [2] Mergler D, Anderson H A, Chan L H M, et al. Methylmercury exposure and health effects in humans; a worldwide concern[J]. Ambio, 2007, **36**(1): 3-11.
- [3] Wheatly B, Wheatley M A. Methylmercury and the health of indigenous peoples; a risk management challenge for physical and social sciences and for public health policy[J]. Science of the Total Environment, 2000, **259**(1-3): 23-29.
- [4] Lucotte M, Schetagne R, Thérien N, et al. Mercury in the biogeochemical cycle: natural environments and hydroelectric reservoirs of Northern Québec (Canada) [M]. Heidelberg, Berlin: Springer, 1999. 1-334
- [5] 冯大兰, 刘芸, 黄建国. 三峡库区消落带土壤不同含水量条件下芦苇的氮素与生物量动态变化[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 2003-2009.
- [6] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1144-1151.
- [7] McIntyre A M, Guéguen C. Binding interactions of algal-derived dissolved organic matter with metal ions [J]. Chemosphere, 2013, **90**(2): 620-626.
- [8] 张翔, 张成, 孙荣国, 等. 三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4560-4566.
- [9] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J]. 土壤肥料, 2004, (1): 40-42, 44.

- [10] 王里奥, 黄川, 詹艳慧, 等. 三峡库区消落带淹水-落干过程土壤磷吸附-解吸及释放研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 593-597.
- [11] 林玉海, 王楠, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河流域消落区土壤氮磷释放研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 131-134, 140.
- [12] 王业春, 雷波, 杨三明, 等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 612-617.
- [13] 张成, 宋丽, 王定勇, 等. 三峡库区消落带甲基汞变化特征的模拟[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 499-504.
- [14] 林俊杰, 刘丹, 何立平, 等. 三峡库区消落带农作区镉污染特征研究[J]. 生态科学, 2011, **30**(6): 586-589.
- [15] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [16] 王定勇, 朱金山. 三峡库区消落带沉积物中汞的赋存形态及生物可利用性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, **35**(11): 1-7.
- [17] USA EPA-821-R-02-019, Method 1631, Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [18] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琰, 等. 蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法测定天然水体中的甲基汞[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 568-571.
- [19] 何天容, 冯新斌, 戴前进, 等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定沉积物及土壤中的甲基汞[J]. 地球与环境, 2004, **32**(2): 83-86.
- [20] 仇广乐, 冯新斌, 梁琰, 等. 溶剂萃取-水相乙基化衍生 GC-CVAFS 联用测定苔藓样品中的甲基汞[J]. 分析测试学报, 2005, **24**(1): 29-32.
- [21] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 等. 滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3458-3466.
- [22] Johnson T A, Bodaly R A, Mathias J A. Predicting fish mercury levels from physical characteristics of boreal reservoirs [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1991, **48**(8): 1468-1475.
- [23] Laing G D, Rinklebe J, Vandecasteele B, *et al.* Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(13): 3972-3985.
- [24] Paterson M J, Rudd J W M, St Louis V. Increases in total and methylmercury in zooplankton following flooding of a peatland reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(24): 3868-3874.
- [25] St Louis V L, Rudd J W M, Kelly C A, *et al.* The rise and fall of mercury methylation in an experimental reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(5): 1348-1358.
- [26] 任家盈, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖营养状态对沉积物中总汞和甲基汞分布特征的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1290-1297.
- [27] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2721-2727.
- [28] Lee Y H, Hultberg H. Methylmercury in some swedish surface waters[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, **9**(7): 833-841.
- [29] Ravichandran M. Interactions between mercury and dissolved organic matter—a review [J]. Chemosphere, 2004, **55**(3): 319-331.
- [30] 冯新斌. 乌江流域水库汞的生物地球化学过程及环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 17-25.
- [31] Coquery M, Cossa D, Sanjuan J. Speciation and sorption of mercury in two macro-tidal estuaries [J]. Marine Chemistry, 1997, **58**(1-2): 213-227.
- [32] Regnell O, Hammar T, Helg   A, *et al.* Effects of anoxia and sulfide on concentrations of total and methyl mercury in sediment and water in two Hg-polluted lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, **58**(3): 506-517.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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

国内外公开发刊