

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集汞的影响

孙松¹, 李楚娴¹, 张成^{1,2,3}, 王永敏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: 水体环境中的汞(Hg)容易被鱼体富集。为了研究三峡库区消落带沉积物对鱼体 Hg 含量的影响, 采用不同 Hg 含量的消落带沉积物进行了为期 90 d 的模拟淹水实验。结果表明沉积物淹水后, 水体总汞(THg)和甲基汞(MeHg)含量显著增加, 鱼体肌肉中 THg 和 MeHg 含量不断增加, 而内脏和头部中 THg 和 MeHg 含量前期不断增加, 后期则有轻微减小的趋势。肌肉对 Hg 的富集量大于内脏和头部, 后两者的富集量没有显著性差异。与对照组(无沉积物)相比沉积物的存在明显增加了鱼体富集 Hg 的量, 而且当沉积物中 Hg 含量较高时, 鱼体对 Hg 的富集量也显著增加。鱼体各部位 THg 和 MeHg 含量变化曲线高度相似, 各部位对 MeHg 的富集系数(bioaccumulation factors, BCF)在 $1.93 \times 10^5 \sim 8.89 \times 10^5$ 之间, 对无机 Hg 的 BCF 在 $1.3 \times 10^3 \sim 12.8 \times 10^3$ 之间, 表明鱼体所富集的 Hg 形态上主要为 MeHg。鱼体各部位 MeHg 和 THg 含量均为极显著相关, 线性回归方程表明, 在富集 Hg 的量中, MeHg 占 THg 比例分别为: 肌肉 80.1%、内脏 79.3%、头部 66.7%。消落带沉积物再淹水后会有一定程度的净甲基化现象产生 MeHg, 由于扩散作用使水体 MeHg 浓度在一段时间内升高, 这导致了鱼体对 Hg 的富集量增加。因此对三峡库区大面积消落带可能存在的 Hg 污染风险不可忽视。

关键词: 汞; 甲基汞; 沉积物; 鱼; 三峡库区; 消落带

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1689-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609006

Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area

SUN Song¹, LI Chu-xian¹, ZHANG Cheng^{1,2,3}, WANG Yong-min¹, 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: Mercury (Hg) in the aquatic environment is easy to accumulate in fish. In order to study the effect of the sediments on Hg accumulation in fish in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, we conducted a 90-days simulated flooding experiment by using the sediments with different concentrations of Hg. Our study showed that the concentrations of the total mercury (THg) and methyl mercury (MeHg) in the overlying water increased after flooding, and the concentrations in the muscle of fish kept increasing in the period of experiment, the concentrations in the viscera and head increased in the earlier period but seemingly decreased in the later period. The bioaccumulated Hg content in the fish was higher than that in the viscera and head, between which there was no significant difference. Compared with the control group (no sediment), the presence of sediments obviously increased the content of Hg bioaccumulated in fish, and the bioaccumulated Hg level increased with the Hg concentrations in sediment. The THg and MeHg in different fish parts presented a similar variation trend with the BCF ranging $1.93 \times 10^5 \sim 8.89 \times 10^5$ for MeHg and $1.3 \times 10^3 \sim 12.8 \times 10^3$ for inorganic mercury, indicating that MeHg was more prone to accumulate in fish. The MeHg in fish was significantly related with THg, and accumulated MeHg occupied about 80.1% (muscle), 79.3% (visceral) and 66.7% (head) of increased THg. After the reflooding of the sediment in the water-level-fluctuating zone, net methylation could occur with MeHg as the product, and then MeHg would diffuse to overlay water, further increasing the Hg bioaccumulation in fish. Therefore, the potential pollution risk of Hg in the water-level-fluctuating zone with large area of the Three Gorges Reservoir cannot be ignored.

Key words: mercury; methylmercury; sediment; fish; Three Gorges Reservoir area; water-level-fluctuating zone

环境汞(Hg)对人体的危害自“水俣病”事件以来逐渐被人们深入认识^[1], 作为一种“全球性污染物”, Hg 广泛分布于大气、土壤以及水体环境中^[2]。而在水体环境中, 汞以甲基汞(MeHg)的形式在鱼体富集的现象十分普遍, 这使得食用鱼类成为人类 Hg 暴露的重要途径^[2~5]。野外同位素示踪实验表明^[3]: 大气无机汞沉降进入湖泊水域后, 仅 2 个月内

就会形成 MeHg, 并经过食物链进入鱼体。

Hg 对鱼体的新陈代谢没有价值, 鱼体富集 Hg

收稿日期: 2016-09-01; 修订日期: 2016-10-22

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)

作者简介: 孙松(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 958803835@qq.com

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

属于被动过程,受到沉积物中 Hg 甲基化动力学、Hg 的食物链转移以及水生生态系统的物理化学特征控制^[6]. 由于水生食物链对 MeHg 的生物放大作用,鱼体中的 Hg 含量往往高出其所处水环境许多^[7,8]. 然而目前对于水环境中 Hg 形态的生物地球化学过程仍然缺乏掌握^[9],这也导致对水环境变化影响鱼体富集 Hg 的认识不足.

水库作为一种特殊的水环境,由于人为调控水位周期性变化,淹水期洪水携带的泥沙等形成的沉积物,枯水期这些沉积物会落干,致使库区产生大面积的消落带. 消落带是库区径流的汇集地带,也成为环境 Hg 等污染物的汇集区,当淹水发生时消落带会成为水体的 Hg 污染源^[10]. 三峡水库作为特大型年度调节水库,年度水位落差达 30 m,消落带面积约 400 km²^[11]. 这些大面积消落带在落干期有可能接受来自地表径流和大气沉降 Hg 的污染,再次淹水必然会对水体环境和生物产生影响.

许多研究考察了鱼体自身条件对其富集 Hg 的影响^[12~15],主要结论有:体长、体重或年龄是影响鱼体 Hg 含量种内差异的重要因素,鱼体 Hg 含量与体长、体重具有正相关性;而食性、营养级水平和体重增长率是影响 Hg 生物累积种间差异的重要因素,肉食性鱼类或营养级较高的鱼类,体内汞含量通常比较高,而较大的体重增长率意味着生长稀释作用较强,会导致鱼体汞浓度降低. 大量研究调查了

不同水环境中鱼体的 Hg 富集情况^[6,12,15,16]. 然而,有关水环境变化对鱼体富集 Hg 的过程研究比较少见,对于水库这样特殊的水环境更是鲜见报道. 同时,由于 Hg 的甲基化过程主要在水-沉积物界面区域进行^[17],因此研究库区消落带沉积物 Hg 对水生系统和鱼类的影响尤为重要.

本研究以三峡库区重庆段消落带沉积物和江水为材料,进行室内模拟淹水环境实验,考察了不同 Hg 含量的沉积物,对水体以及鱼体不同部位的影响.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试沉积物和水均来自三峡库区重庆段,忠县石宝寨新政村(N30°25'7.5", E108°10'5.5")消落带. 消落带落干时采集沉积物样品和水样带回实验室,沉积物经风干、研磨、过 2 mm 尼龙筛,最后混匀. 沉积物基本性质如表 1 所示. 取 20 kg 已过筛的沉积物制备高汞沉积物样品,加入一定量 10 mg·L⁻¹ 的 HgCl₂ 溶液,再加入去离子水调节含水率达饱和状态,搅拌混合均匀后放入 1.2 m×0.6 m、内衬为 Teflon 材料的木缸内,密闭条件下陈化 1 个月,期间定期搅拌混合 2 次. 陈化后的沉积物经风干,作为高汞沉积物备用,其总汞 (THg) 和甲基汞的含量分别为 (878.74 ± 19.87) μg·kg⁻¹ 和 1.22 μg·kg⁻¹. 水样基本性质见表 2.

表 1 供试沉积物的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sediments used in this research

pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	机械组成/%			THg /μg·kg ⁻¹	MeHg /ng·kg ⁻¹
			>0.25 mm	<0.02 mm	<0.002 mm		
7.97	12.43	15.51	1.44	75.38	23.18	80.39 ± 7.39	489.82 ± 34.39

表 2 供试水样的基本性质

Table 2 Properties of water in the Yangtze River

pH	DOC /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 ₃ ⁻		
8.53	3.80 ± 0.23	17.58	1.10	5.35	0.20	2.29	20.51 ± 3.71	0.156 ± 0.033

供试鱼为斑马鱼,体重 (0.38 ± 0.03) g,体长 (3.90 ± 0.51) cm,实验前用供试水样驯化 30 d,期间每 2 d 喂食一次,饲料购自北京三友创美饲料科技有限公司,THg < 3.57 ng·kg⁻¹,MeHg < 2.63 ng·kg⁻¹,喂食量为斑马鱼体重的 2%. 实验容器由硼硅玻璃制成,尺寸为 L 60 cm × W 30 cm × H 40 cm.

1.2 实验设计与方法

设置 3 组不同处理,A: 对照组,只加入 40 L 水

样; B: 原沉积物组,加入 6.5 kg 原沉积物样品和 40 L 水样; C: 高汞沉积物组,加入 6.5 kg 高汞沉积物样品和 40 L 水样. 每组处理均设置 3 个平行. 在 B 组和 C 组的沉积物上方 2 cm 处固定一张 Teflon 网,防止鱼与沉积物直接接触. 最后每个处理中各放入 60 尾斑马鱼. 实验温度控制在 (24 ± 1) °C,实验总时长为 90 d,期间不给斑马鱼喂食 (根据三峡库区年度水位调节惯例,每年淹水时长 90 d 的位置对应于海拔 172 m 左右的消落区,而消落区海拔高度在

145 ~ 175 m 之间,上部消落区由于落干时间更长,沉积物受环境污染的可能性也更大)。本实验所使用的玻璃器皿均经过超净处理,用硝酸(25%,体积分数)浸泡 24 h 以上,超纯水清洗后经马弗炉 500℃ 灼烧 30 min,冷却后再使用。操作环境保持清洁。

实验期间定期采集鱼样、水样以及沉积物样。以放入斑马鱼的时间点开始计时,于第 7、14、28、45、60、75、90 d 采集鱼样及沉积物样;于第 3 h、12 h、1 d、3 d、7 d、14 d、21 d、28 d、45 d、60 d、75 d、90 d 采集水样。对于每个处理,采集鱼样 5 尾,立即在冰袋上解剖,去除鱼皮,分离头部、内脏和肌肉于自封袋中,放入冷冻真空干燥机干燥,用玛瑙研钵磨成细粉,冷冻保存待测;采用自制的管装采样器在玻璃缸四周及中间多点采集沉积物于自封袋,真空冷冻干燥,研磨并过 0.149 mm 尼龙筛,冷冻保存待测;采用 Teflon 管虹吸采集 150 mL 水样于硼硅玻璃瓶中,加入 0.75 mL 优级纯浓盐酸酸化,冷藏保存待测。

1.3 样品分析与质量控制

对于鱼样及沉积物样品,采用 DMA-80 固体进样自动测汞仪测定 THg 含量。按照何天荣等建立的方法^[18]测定沉积物样品 MeHg,按照阎海鱼等^[19]建立的方法测定鱼样 MeHg。对于水样,按照 USA EPA Method 1631^[20]、Method 1630^[21] 分别测定 THg 和 MeHg。

采用空白实验、平行样品控制及标准物质测定加标回收率进行质量控制。土样标准物质为 GBW07405 (THg 含量: 290 ng·g⁻¹),鱼样标准参考物质为干鱼样 NRCC-TORT-2。本实验对于固体样品、水样 THg 测定加标回收率分别为 93% ~ 112%、88% ~ 109%; MeHg 测定加标回收率则分别为 86% ~ 109%、89% ~ 113%。

2 结果与讨论

2.1 沉积物 Hg 含量变化

实验开始后两组沉积物中的 THg 开始向水体中迁移,沉积物 THg 含量逐渐降低,并在第 45 d 趋于稳定,如图 1(a) 所示。实验结束时,原沉积物(B 组) THg 含量下降了 43.13 ng·g⁻¹ (降幅 38.0%),而高汞沉积物(C 组)则下降了 137.61 ng·g⁻¹ (降幅 15.7%),C 组沉积物 THg 释放量远高于 B 组。由于 C 组 THg 初始含量很大,虽然其 THg 含量落差比 B 组大很多,但其下降幅度却小于 B 组。通常认为,沉积物间隙水与上覆水中的 Hg 浓度梯度是 Hg 在沉积物-水体界面迁移的重要动力^[22]。本实验在初期时,由于 THg 浓度梯度的存在,沉积物 THg 会先进入沉积物间隙水,再沿浓度梯度方向扩散进入上覆水,从而导致沉积物 THg 含量降低,后期随着浓度梯度逐渐减小,沉积物 THg 的迁移也减缓,最终达到稳定。

C 组沉积物 MeHg 的初始含量接近于 B 组的 3 倍,见图 1(b),表明 C 组沉积物在进行陈化时发生了明显的甲基化作用。在实验开始后第 7 d,两组沉积物的 MeHg 含量均明显升高(独立样本 T 检验: B 组 $P < 0.05$ 、C 组 $P < 0.10$),表明了沉积物中发生了净甲基化作用。这种甲基化作用主要是由于微生物引起的^[23],淹水形成的厌氧环境有利于厌氧微生物(主要为硫酸盐还原菌和铁还原菌)对 Hg 的甲基化^[24]。然而由于第一次采样间隔时间较长,本研究推测实际净甲基化作用发生的时间可能小于 7 d。Zhang 等^[23]曾发现加入外源 HgCl₂ 的沉积物,在 4℃ 下经历 4 h 就会发生明显的微生物甲基化作用。实验 7 d 之后沉积物 MeHg 含量基本稳定(T 检验结果: $P > 0.10$),最终 B 组沉积物 MeHg 含量升高 1.190 ng·g⁻¹ (涨幅 320.7%),C 组升高 0.385

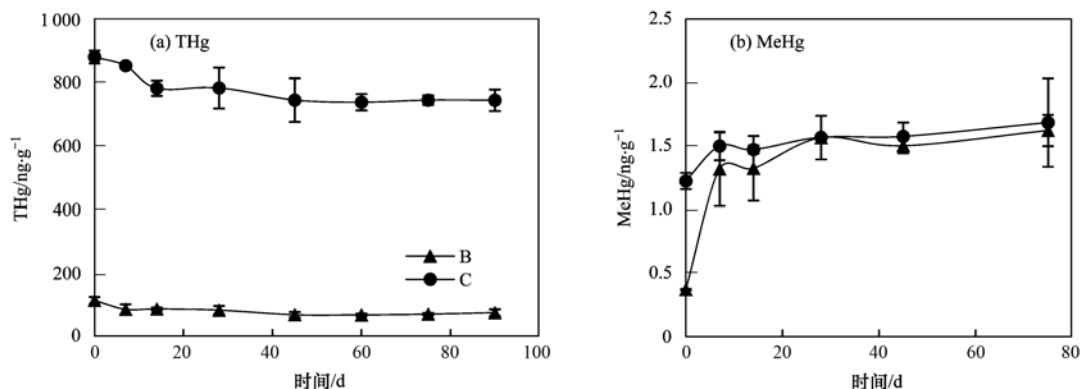


图1 沉积物 Hg 含量变化

Fig. 1 Variations of Hg levels in sediments

$\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (涨幅 31.5%), B 组的增长幅度远大于 C 组。

值得注意的是,虽然两组沉积物初始 THg 和 MeHg 含量差异很大,但实验结束时两组沉积物的 MeHg 水平并无显著性差异 ($P > 0.10$),实验过程中 B 组表现出更高的 MeHg 增长率,这说明沉积物中 THg 含量并不是 MeHg 含量的决定性因素,这一点印证了以往的结论^[25]。已有研究认为:甲基化作用主要依赖于厌氧微生物的新陈代谢^[23],同时也需要无机 Hg 具有生物可利用性,底泥厌氧环境中的 HgS 沉淀往往会降低生物可利用性^[25]。在本研究中,受实验条件控制,两组沉积物环境基本一致,因此其微生物数量和活性差异不大,且生物可利用态 Hg 的水平可能基本一致,最终导致 MeHg 水平并没有很大的差异。然而沉积物环境的改变有可能会促使微生物活性和数量,以及 Hg 生物可利用性情况发生变化,导致更多的无机 Hg 甲基化或者 MeHg 去甲基化,这需要进行进一步的实验来验证。

2.2 水体 Hg 含量变化

对照组 (A 组) 水体 THg 浓度基本稳定,两实验组水体 THg 浓度总体上呈先增后减的趋势,如图 2 (a) 所示。在实验刚开始的 1 d 内,两实验组水体 THg 浓度均异常升高后又回落,这可能是由于淹水

初期水体悬浮的沉积物颗粒较多,导致水样颗粒态 THg 较高所致,随时间推移悬浮颗粒物沉降而相应的颗粒态 THg 也回到沉积物中,水体 THg 浓度又降低。沉积物在淹水过程中,水力扰动会导致沉积物释放颗粒态 Hg 加剧,且沉积物 Hg 含量越高影响越大,环境风险也越大。在三峡水库水位涨落的过程中,沉积物坡面容易发生侵蚀作用,沉积物颗粒会进入并悬浮于水体^[26],这可能导致库区水位上涨时水体颗粒态 Hg 的升高,高 Hg 污染的沉积物更易对水体产生这种影响。

实验开始 1 d 后,两实验组水体 THg 浓度开始增加,表明沉积物 THg 会向上覆水体中扩散,沉积物是上覆水体重要的 THg 源。值得注意的是:C 组的沉积物 THg 含量约为 B 组的 11 倍,但总体来看其上覆水体 THg 浓度却并未高出 B 组许多,在实验结束时两组水体 THg 浓度甚至无显著性差异 ($P > 0.10$),这表明陈化后的高汞沉积物所结合的 Hg 大部分比较稳定,不易迁移进入水体,反映出沉积物作为水生系统的 Hg 库对 Hg 的长期固定作用。Harris 等^[3]的野外实验也证实了:当外源 Hg 以大气沉降方式进入湖泊时,大部分最终会稳定地存在于湖底沉积物中。

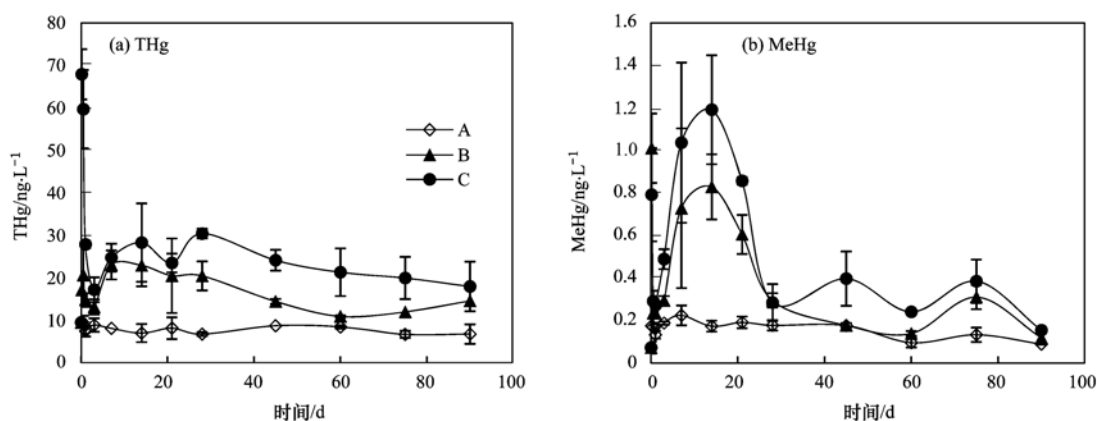


图2 水体 Hg 浓度变化

Fig. 2 Variations of Hg levels in water

水体 MeHg 浓度的动态变化见图 2(b)。整个实验周期内,对照组 MeHg 浓度没有发生显著变化 ($P > 0.10$)。对于实验组,第 1 d 内水体含较多悬浮沉积物颗粒,致使 MeHg 浓度偏高。1 d 之后,实验组 MeHg 浓度均呈现先升高再降低的趋势,45 d 后 MeHg 浓度均达到稳定 ($P > 0.10$)。MeHg 浓度峰值出现在 14 d 左右, B 组达 $(0.828 \pm 0.153) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, C 组达 $(1.191 \pm 0.256) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,二者无显著性差异 ($P > 0.10$)。第 28 d 时,两实验组水体 MeHg 浓度均大

幅降低,这可能主要与水体中的 MeHg 光降解作用^[27]以及鱼体富集有关。实验结束时 B 组和 C 组水体 MeHg 浓度无显著性差异 ($P > 0.10$)。

在第 14 d 左右时沉积物 THg 含量达到较高水平,表明此期间 Hg 从沉积物向水体的扩散作用较强,同时沉积物 MeHg 含量在第 7 d 后已达到较高水平的稳定状态,能够作为水体 MeHg 的源。因此本研究推测水体 MeHg 浓度的升高主要是由于表层沉积物中的 MeHg 扩散所致,同时也可以认为实验

组沉积物 MeHg 含量差异不显著导致了上覆水体 MeHg 浓度差异也不显著。以往研究也认为: 水体自身的 Hg 甲基化作用较弱^[28], 而表层沉积物具有较强的 Hg 甲基化能力, 同时也是上覆水体重要的 MeHg 源^[29]。

2.3 鱼体 Hg 含量变化

食用鱼肉是人类暴露于汞的重要途径, 因此笔者将鱼体肌肉作为研究对象。另外, MeHg 可通过食物链放大, 所以摄食是鱼体暴露于 Hg 的重要途径, 因此考察了作为消化系统的内脏。MeHg 具有神经毒性, 为了考察 Hg 通过鱼体血脑屏障进而影响脑部的能力, 笔者也将头部纳入研究范围。实验周期中不喂食, 鱼体体重增加量微小, 不对 Hg 含量分析构成影响。

图 3 展示了各组处理条件下鱼体各部位 THg 和 MeHg 含量的动态变化。总体来看, 鱼体不同部位 THg 和 MeHg 含量的变化规律基本一致。实验结

束时, 实验组鱼体各部位的 THg 和 MeHg 含量均显著升高 ($P < 0.01$), 而对照组除了内脏 MeHg 没有显著变化 ($P > 0.10$) 以外, 其它部位 THg 和 MeHg 含量也均有明显升高 ($P < 0.05$), 内脏 THg 含量有所升高 ($P < 0.10$)。这表明鱼体各部位对 Hg 均有富集作用, 而对照组鱼体 Hg 含量升高可能是由于其水体本身含有一定量的 Hg 所致。实验结束时, 不同处理条件下, 肌肉对 THg 和 MeHg 的富集量 (最终含量减去初始含量) 均显著高于头部和内脏 ($P < 0.05$), 而头部和内脏对 THg 和 MeHg 的富集量均没有显著性差异 ($P > 0.10$)。表明鱼体中肌肉对 Hg 的富集作用最强。而有关三峡库区鱼体肌肉和内脏的调查也发现了此规律^[30]。

本实验结束时, 考察肌肉对 THg 的富集量, 呈现 C 组 > B 组 > A 组 ($P < 0.01$); 肌肉对 MeHg 的富集量也具有同样差异性。内脏对 THg 的富集量, 呈现 C 组 > B 组 > A 组 (A 与 B、A 与 C, $P < 0.01$; B

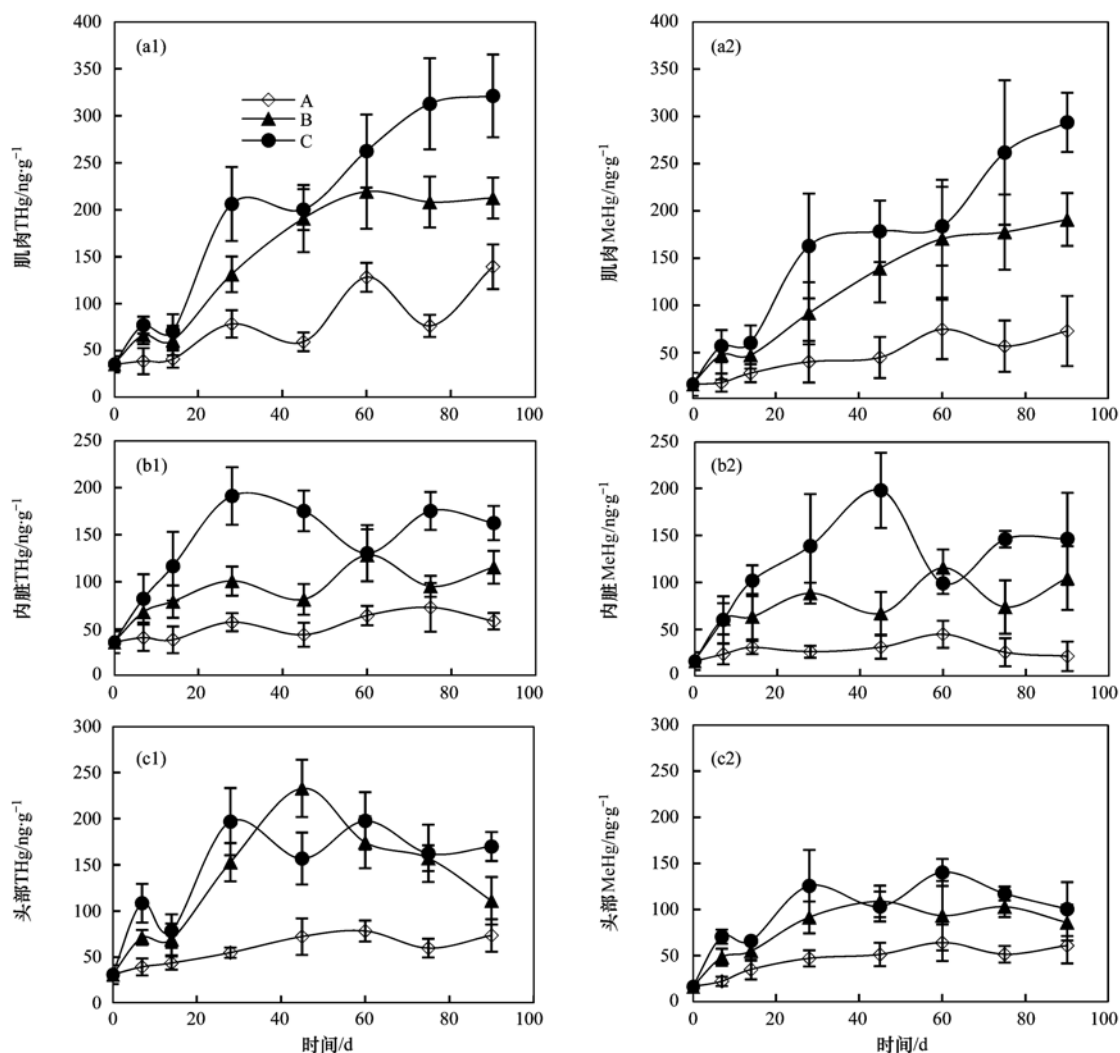


图 3 鱼体各部位 Hg 含量变化

Fig. 3 Variations of Hg levels in different parts of zebrafish

与 C, $P < 0.05$); 内脏对 MeHg 的富集量, 有 B、C 组 $> A$ 组 (A 与 B、 A 与 C, $P < 0.05$; B 与 C, $P > 0.10$). 头部对 THg 的富集量, 有 C 组 $> A$ 、B 组 (C 与 A, $P < 0.01$; C 与 B, $P < 0.05$; A 与 B, $P > 0.10$); 而头部对 MeHg 的富集量, 3 组之间没有显著性差异. 由此可见: 含有 Hg 的沉积物确实会增强鱼体对 Hg 的富集, 并且沉积物 Hg 含量越高这种加剧鱼体 Hg 富集的作用越强. 但是沉积物 Hg 含量对鱼体不同部位富集 Hg 的影响强度不一, 具体表现为: 对肌肉的影响最为强烈, 内脏次之, 而对头部最弱.

除了最终结果显示出的差异性外, 鱼体各部位富集 Hg 的过程也有所差异. 图 3(a1) 与 3(a2) 显示出, 在整个实验周期中, 肌肉 THg 和 MeHg 含量几乎一直处于增长中; 而头部[图 3(c1) 与 3(c2)] 和内脏[图 3(b1) 与 (b2)] 似乎具有先增后减的趋势, 且这种趋势在头部中更为明显. B 组头部 THg 含量的最大值(45 d) 与最终 THg 含量具有极显著性差异值($P < 0.01$), 这确实证明 45 d 后 B 组头部 THg 含量在降低. 而这种降低趋势与鱼体不同部位代谢 Hg 的能力有关, 有研究表明: 鱼体不同部位代谢 Hg 的能力呈现腮 $>$ 脑 $>$ 内脏 $>$ 肌肉^[31], 头部 THg 含量的显著降低可能主要是由于腮和脑的代谢作用造成的, 同时由于肌肉对 Hg 的代谢能力最弱, 所以肌肉中 THg 和 MeHg 水平一直在增长.

在整个实验周期中, 不考虑各组处理的差异, 鱼体 3 个部位的 MeHg 和 THg 含量均呈极显著相关, 不同部位 MeHg 占 THg 的比例均比较高, 并呈现肌肉 $>$ 内脏 $>$ 头部, 如表 3 所示. 实际上, 各部位 THg 和 MeHg 含量高度相似的变化规律(如图 3) 已经反映出这种强相关性和高 MeHg 比例. 这些现象表明鱼体所富集的 Hg 形态上主要是 MeHg, 而对于不同部位, 线性方程系数 k (表 3) 越大表明富集 Hg 的过程中, MeHg 所占的比例越大. 许多调查也发现鱼体肌肉 MeHg 和 THg 含量具有极强相关性($r > 0.9$), 且 MeHg 比例很高(45% ~ 100%)^[25,30,32,33], 这与本研究结果相同. 而有关内脏和头部的报道较少甚至没有发现, 靳立军等^[30] 调查三峡库区鱼类时发现鱼

体肝、肾、脾中 MeHg 和 THg 含量也具有极强相关性, 且 MeHg 比例达 40% ~ 50%.

生物富集系数(bioaccumulation factors, BCF) 可以表征鱼体对 Hg 的富集能力, 鱼体对水体 Hg 的 BCF 一般用下式来计算^[34]:

$$BCF = \frac{\text{鱼体 Hg 含量}(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})}{\text{水体 Hg}(\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1})}$$

以实验结束时鱼体 Hg 含量和最后两次测定的水体 Hg 浓度均值为基准, 分别计算鱼体各部位对 MeHg 和无机 Hg [鱼体和水质含其它有机 Hg 形态极少, 因此定义无机 Hg 含量(浓度) = THg - MeHg] 的 BCF, 结果如表 4 所示.

表 4 生物富集系数对比

Table 4 Comparison of the BCFs

组别	MeHg 富集系数 $\times 10^3$			非 MeHg 富集系数 $\times 10^3$		
	肌肉	内脏	头部	肌肉	内脏	头部
A	656.0	193.4	471.9	9.8	3.8	5.6
B	889.4	487.7	400.8	1.6	6.7	3.8
C	828.5	412.8	283.5	1.3	12.8	5.4

可见鱼体对 MeHg 的富集系数总体上要比其他形态的高两个数量级, 说明鱼体各部位对 MeHg 的富集能力都远远超过其他形态的 Hg. 综上表明, MeHg 是导致鱼体富集 Hg 的直接且最重要原因. 不同处理组之间 MeHg 的富集系数有所差异, 但从范围上来看, 内脏和头部对 MeHg 的富集系数在同一个等级, 而肌肉则远大于前两者, 这表明肌肉是鱼体蓄积 Hg 的主要部位. 本研究的 THg 富集系数在 $7.42 \times 10^3 \sim 2.05 \times 10^4$ 之间, 这与一些针对水库鱼类的调查结果^[34] 相符, 没有发现有关 MeHg 富集系数的调查结果.

有研究发现鱼体中确实存在自身甲基化作用, 可将吸收的无机 Hg 转化为 MeHg^[31], 但是目前普遍认为鱼体内甲基化作用十分微弱可以忽略, 鱼体 MeHg 主要是通过食物链富集以及从水体环境中直接吸收而来^[30,35~37]. 从水体环境直接吸收的 MeHg 主要通过鱼鳃进入血液, 然后进入其他部位^[31]. 本研究中鱼体 Hg 应该主要来自于水体吸收, 同时水体中的悬浮颗粒物、细小有机体或浮游生物也可能作为鱼的食物, 摄食富集可能也占一小部分.

3 结论

(1) 消落带沉积物再淹水后, 会增加水体 THg 水平, 并在初期致使水体 MeHg 水平升高, 之后又降回初始水平. 含 Hg 沉积物的存在会明显增加鱼体对 Hg 的富集量.

表 3 各部位 MeHg 与 THg 含量相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analyses of MeHg and THg concentrations in each part

参数	肌肉	内脏	头部
r	0.975 **	0.952 **	0.955 **
k	0.801	0.793	0.667

1) r 表示皮尔逊积矩相关系数, 线性方程为 $c_{\text{MeHg}} = k \times c_{\text{THg}}$; * * 表示 $P < 0.01$

(2) 当沉积物 THg 含量更高时, 鱼体对 THg 和 MeHg 的富集量将显著增加, 而水体最终 THg 和 MeHg 浓度没有显著增加。

(3) 肌肉对 Hg 的富集能力最强, 而内脏和头部相对较弱且水平相当。鱼体富集的 Hg 形态主要是 MeHg, 占 THg 富集量的比例分别为: 肌肉 80.1%、内脏 79.3%、头部 66.7%。

参考文献:

- [1] Rice K M, Walker E M, Wu M Z, *et al.* Environmental mercury and its toxic effects[J]. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, 2014, **47**(2): 74-83.
- [2] 冯新斌, 陈玖斌, 付学吾, 等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, **32**(5): 503-530.
Feng X B, Cheng J B, Fu X W, *et al.* Progresses on environmental geochemistry of mercury [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, **32**(5): 503-530.
- [3] Harris R C, Rudd J W M, Amyot M, *et al.* Whole-ecosystem study shows rapid fish-mercury response to changes in mercury deposition[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**(42): 16586-16591.
- [4] Bravo A G, Cosio C, Amouroux D, *et al.* Extremely elevated methyl mercury levels in water, sediment and organisms in a Romanian reservoir affected by release of mercury from a chlor-alkali plant[J]. *Water Research*, 2014, **49**: 391-405.
- [5] Driscoll C T, Mason R P, Chan H M, *et al.* Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(10): 4967-4983.
- [6] Donald D B, Wissel B, Anas M U M. Species-specific mercury bioaccumulation in a diverse fish community[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, **34**(12): 2846-2855.
- [7] Lavoie R A, Jardine T D, Chumchal M M, *et al.* Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13385-13394.
- [8] Wang X, Wang W X. Physiologically based pharmacokinetic model for inorganic and methylmercury in a marine fish [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(16): 10173-10181.
- [9] Chételat J, Amyot M, Arp P, *et al.* Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: recent advances on its cycling and fate[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **509-510**: 41-66.
- [10] 梁丽, 王永敏, 张成, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 955-962.
Liang L, Wang Y M, Zhang C, *et al.* Effect of soil and dominant plants on mercury speciation in soil and water system of water-level-fluctuation zone in the three gorges area[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 955-962.
- [11] 牛志明, 解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. *科技导报*, 1998, **16**(4): 61-62, 6.
- [12] 朱艾嘉, 许战洲, 柳圭泽, 等. 黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 764-769.
- [13] Zhu A J, Xu Z Z, Liu G Z, *et al.* Inner-and inter-species differences of mercury concentration in common fishes from the yellow sea [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 764-769.
- [14] Chumchal M M, Hambright K D. Ecological factors regulating mercury contamination of fish from Caddo Lake, Texas, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, **28**(5): 962-972.
- [15] Power M, Klein G M, Guiguer K R R A, *et al.* Mercury accumulation in the fish community of a sub-Arctic lake in relation to trophic position and carbon sources [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, **39**(5): 819-830.
- [16] Kwon S Y, McIntyre P B, Flecker A S, *et al.* Mercury biomagnification in the food web of a neotropical stream [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 92-97.
- [17] Olejníčková Z, Holešovsky J, Vávrová M, *et al.* Methylmercury in tissues of the fish from the Svratka river, Czech republic [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, **23**(12B): 3319-3324.
- [18] 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.
- [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.
He T R, Feng X B, Dai Q J, *et al.* Determination of methyl mercury in sediments and soils by GC-CVAFS after aqueous phase ethylation [J]. *Earth and Environment*, 2004, **32**(2): 83-86.
- [20] 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.
Yan H Y, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methyl mercury in fish using GC-CVAFS [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, **24**(6): 78-80.
- [21] EPA-821-R-02-019 Method 1631, Revision E: mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [22] EPA-821-R-01-020 Method 1630: methyl mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and CVAFS [S].
- [23] 贺春风. 三峡库区消落带土壤淹水过程汞释放与甲基化特征的模拟研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [24] Zhang L, Planas D. Biotic and abiotic mercury methylation and demethylation in sediments [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, **52**(5): 691-698.
- [25] Barkay T, Wagner-Döbler I. Microbial transformations of mercury: potentials, challenges, and achievements in controlling mercury toxicity in the environment [J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2005, **57**: 1-52.
- [26] Kannan K, Smith R G Jr, Lee R F, *et al.* Distribution of total mercury and methyl mercury in water, sediment, and fish from south Florida estuaries [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, **34**(2): 109-118.
- [27] 李萍. 三峡库区典型消落带水体中汞的时空分布[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [28] 孙荣国, 毛雯, 马明, 等. 水体中甲基汞光化学降解特征研

- 究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4329-4334.
- Sun R G, Mao W, Ma M, *et al.* Characteristics of monomethylmercury photodegradation in water body [J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4329-4334.
- [28] 白薇扬. 阿哈水库中不同形态汞迁移转化规律的初步探讨[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2006.
- [29] 何天容. 贵州红枫湖汞的生物地球化学循环[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2007.
- [30] 靳立军, 徐小清. 三峡库区地表水和鱼体中甲基汞含量的分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 1997, **6**(4): 324-328.
- Jin L J, Xu X Q. Methylmercury distribution in surface water and fish in the Three-Gorge Reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1997, **6**(4): 324-328.
- [31] 蔺玉华, 张冰艳, 卢健民, 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.
- Lin Y H, Zhang B Y, Lu J M, *et al.* Methylation of mercury and methylmercury metabolism in fish body[J]. Journal of Fisheries of China, 1994, **18**(4): 326-329.
- [32] Grieb T M, Bowie G L, Driscoll C T, *et al.* Factors affecting mercury accumulation in fish in the upper michigan peninsula [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, **9**(7): 919-930.
- [33] Kim J P. Methylmercury in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) from Lakes Okareka, Okaro, Rotomahana, Rotorua and Tarawera, North Island, New Zealand[J]. Science of the Total Environment, 1995, **164**(3): 209-219.
- [34] 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 等. 汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 121-129.
- Cheng L, Mao Y X, Ma B J, *et al.* Speciation and spatial-temporal variation of mercury in the Xiaolangdi Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 121-129.
- [35] Wiener J G, Cope W G, Rada R G. Mercury accumulation in yellow perch in wisconsin seepage lakes: relation to lake characteristics [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, **9**(7): 931-940.
- [36] Watras C J, Back R C, Halvorsen S, *et al.* Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs[J]. Science of the Total Environment, 1998, **219**(2-3): 183-208.
- [37] 于常荣, 张美昭. 鱼体甲基汞来源及半衰期的研究[J]. 水产科技, 1994, (2): 36-38.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)