

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制
..... 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成
..... 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ¹⁸O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例
..... 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征
..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化
..... 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因子分析 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 (5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律

郭攀¹, 孙涛¹, 杨光¹, 马明^{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: 森林生态系统的汞产量可以用森林湖泊或水库的动态变化来表征. 而且, 下游汞浓度的变化也可以在一定程度上反映森林生态系统汞的输出. 通过对四面山大洪湖上游、中游、下游丰水期与枯水期汞的分布与沉积物剖面的分析发现: 大洪湖上覆水中总汞浓度在丰水期显著增加(丰水期平均值 $4.33 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 枯水期 $1.85 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 在下游尤为明显, 其总汞和甲基汞的含量明显高于其他类型湖泊, 但小于受到污染的湖泊, 说明四面山常绿阔叶林具有一定“汞源”的特征, 同时沉积物也是大洪湖上覆水中甲基汞和无机汞的输入源; 甲基化过程主要发生在沉积物的表层, 丰水期时甲基化过程更活跃; 在丰水期时, 更有利于汞和甲基汞从沉积物固相进入沉积物液相, 从而进入上覆水中.

关键词: 汞; 丰水期; 枯水期; 大洪湖; 底泥/水界面

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5473-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804067

Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains

GUO Pan¹, SUN Tao¹, YANG Guang¹, MA Ming^{1,2,3*}

(1. College of Resource 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: The mercury production in forest ecosystems can be characterized by dynamic changes in forest lakes or reservoirs. Moreover, changes in the downstream mercury concentrations can also reflect the mercury output from forest ecosystems. Based on the analysis of distribution patterns and sediment profiles of mercury in DH1, DH2, DH3, and DH4 during the wet and dry seasons in the Dahong Lake Reservoir, the total mercury concentration of the Dahong Lake Reservoir increases significantly during the wet season (the average of the wet season is $4.33 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, the average of the dry season is $1.85 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), especially in the downstream. The content of total mercury and methylmercury in the water column of the Dahong Lake Reservoir is significantly higher than that of background lake levels, but it is much lower than that of contaminated lakes, indicating that evergreen broad-leaved forest in the Simian Mountains has characteristics of Hg sources and the sediments are also sources of methylmercury and inorganic mercury in the water column of the Dahong Lake Reservoir. The methylation process mainly occurs in the surface layer of sediments and the methylation process is more active during the wet season. During the wet season, it is more favorable for mercury and methylmercury to enter the sediment liquid phase from the sediment solid phase and thus the water column.

Key words: mercury; wet season; dry season; Dahong Lake Reservoir; sediment-water interface

自 20 世纪 50 年代日本水俣病事件之后, 汞作为一种持久的、生物累积的、有毒的污染物^[1], 受到越来越多的关注. 汞及其化合物污染范围广、危害大、难治理, 一个重要的原因是汞在环境中易发生迁移转化. 无机汞和有机汞能够通过生物累积和食物链大大提高汞的危害性. 通常, 食鱼是人体甲基汞暴露的主要途径之一^[2], 并且, 甲基汞在水生生物体中有很强的富集放大效应, 鱼体对水体中甲基汞的生物富集系数通常在 $10^4 \sim 10^7$ 内^[3], 因此甲基汞成为了全球重点关注的污染物^[4,5]. 森林生态系统是陆地上十分重要的生态系统, 系统中的枝叶、树干、根系能够吸收环境中的汞^[6~8], 枯枝落叶是主要的汞的输入途经, 随着枯枝落叶在地表的

积累、分解, 这部分汞被富含高浓度溶解性有机物的表层固定在土壤层中^[9]. 枯枝落叶在降解的过程中容易释放出富集在体内的汞, 从而导致森林流域水资源存在潜在汞污染泄漏风险^[7]. 由陆地径流输入的甲基汞在沿海沉积物中的生物累积速率显著高于原位形成的甲基汞^[10], 因此由陆地地表径流输入的汞对水环境影响很大. 森林生态系统的汞产量可以用森林湖泊或水库的动态变化来

收稿日期: 2018-04-09; 修订日期: 2018-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573105); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502303); 重庆市自然科学基金项目(cstc2016jcyjA1643)

作者简介: 郭攀(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 947814816@qq.com

* 通信作者, E-mail: maming8312@163.com

表征. 而且, 下游汞浓度的变化也可以反映森林生态系统汞的输出. 本文通过对位于中国西南亚热带森林四面山大洪湖的汞污染问题的研究, 揭示水源涵养地与森林湖泊中汞的迁移转化的关系, 以期为制定减少甲基汞对森林水生生态系统影响的措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在距离重庆市区约 200 km 的国家级自然保护区 (E106°22' ~ 106°25', N28°35' ~ 28°39',

图 1) 的四面山进行. 该地区气候以亚热带湿润季风为主, 年平均气温 13.7℃, 降水量 1 127 mm, 6 ~ 9 月雨量充沛. 大洪湖位于四面山国家级自然保护区核心区, 其流域面积 28.97 km², 流域容积 345 × 10⁶ m³, 海拔 1 380 m.

1.2 采样点的选择及样品的采集

本文选取位于常绿阔叶林中的大洪湖为研究对象, 在四面山大洪湖从上游到下游选取 4 个采样点, 分别为 DH1、DH2、DH3、DH4 (图 1). 于 2014 年丰水期和枯水期对四面山大洪湖内分层水样、沉积物、沉积物间隙水进行采样分析.

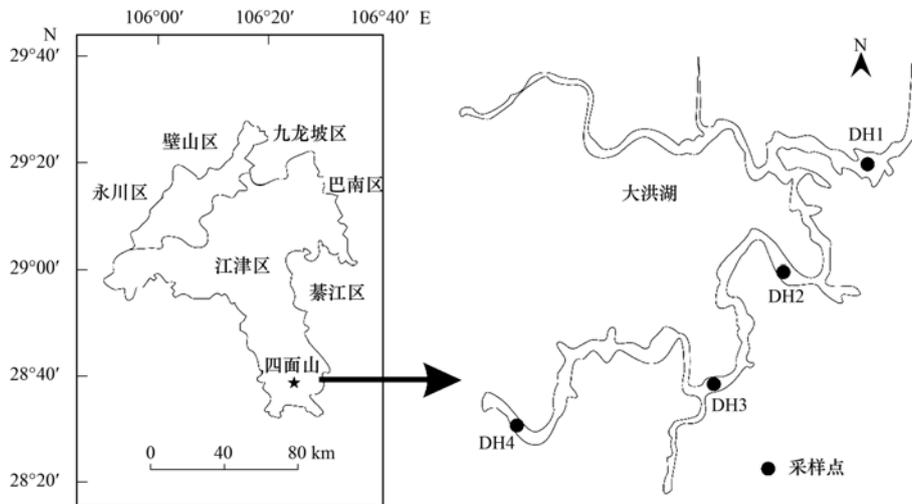


图 1 大洪湖采样点分布示意

Fig. 1 Four sampling sites of the Dahong Lake Reservoir

用 SWB-1 型便携式不扰动湖泊沉积物采样器采集沉积物柱^[11], 确保界面水清澈, 沉积物未被扰动. 抽取界面水后, 沉积物样品在氮气氛围的厌氧条件下现场分割. 按 1 cm 或 2 cm 的间距分割, 将样品装入经过预处理的聚乙烯离心管, 用 parafilm® 密封, 再将其装入密封袋保存. 沉积物样品带回实验室后, 在 48 h 内用离心方式提取间隙水, 提取条件为 4℃ 恒温、离心 30 min, 转速 3 000 r·min⁻¹. 间隙水在氮气氛围的厌氧条件下用一次性注射器提取后, 用 0.45 μm (Millipore) 滤膜头过滤, 装入经过预处理的 10 mL 比色管中, 所有间隙水样品均按体积比 0.5% 的比例立即加入工艺超纯 HCl 溶液, 然后用 parafilm® 密封, 放入冰箱低温保存 (4℃). 提取间隙水后的沉积物样品用真空冷冻干燥仪 (FDU-1100) 干燥, 干燥后的沉积物样品研磨至 100 目后装入 2 号密封袋以备分析.

1.3 样品中汞形态的测定

对于 THg 和 DHg, 采用两次金汞齐-冷原子荧

光光谱法^[12], 所用仪器为加拿大生产的测汞仪 (Tekran model 2500). 对于 MeHg 和 DMeHg, 蒸馏-乙基化结合 GC-CVAFS 法^[13] (Tekran model 2500). 沉积物中的 THg 通过酸 (HCl:HNO₃ = 3:1) 消化然后进行 CVAFS 检测^[14]. 采用硝酸浸出/二氯甲烷提取, 乙基化, Tenax 捕集, 等温 GC 分离和 CVAFS 检测方法^[15] 测定沉积物中甲基汞. 沉积物样品中有机质的浓度通过 KCr₂O₇ 氧化耦合体积技术测定^[16].

2 结果与讨论

2.1 大洪湖上覆水中总汞和甲基汞的浓度分布

丰水期时位于大洪湖上游的 DH1 和中游的 DH2、DH3 处的总汞浓度都在水深 5 ~ 10 m 的范围内到达最大值, 分别为 8.59、9.33 和 7.29 ng·L⁻¹. 与之相反, 位于下游的 DH4 处总汞的浓度在水深 15 m 有增大的趋势; 枯水期时, DH1、DH2 和 DH3 处总汞浓度的变化大致相同, 但是位于下游 DH4

处的总汞浓度明显高于上游和中游, 可能由于枯水期时沉积在下游底泥中的枯枝落叶开始腐解, 在其降解的过程中容易释放出富集在体内的汞(图2). 在湖泊水体5~10 m处藻类等微生物数量大, 由于藻类对汞具有高度的吸附作用^[17], 汞可能大量吸附在藻类等悬浮颗粒物上导致上覆水中汞的浓度显著升高^[18]. 因此, 由于雨量的增加, 四面山部分枯枝落

叶以及泥沙汇入大洪湖, 而且降雨导致沉积物的再悬浮, 大洪湖上覆水总汞的含量明显增加, 一部分汞被藻类等悬浮颗粒物吸附, 致使上游 DH1 和中游 DH2、DH3 在水深5~10 m范围总汞浓度出现最大值, 一部分汞沉积在上游, 中游的底泥中, 一部分汞随着湖泊水体的移动, 迁移到下游 DH4 的上覆水底层, 致使 DH4 处上覆水底层总汞浓度增加.

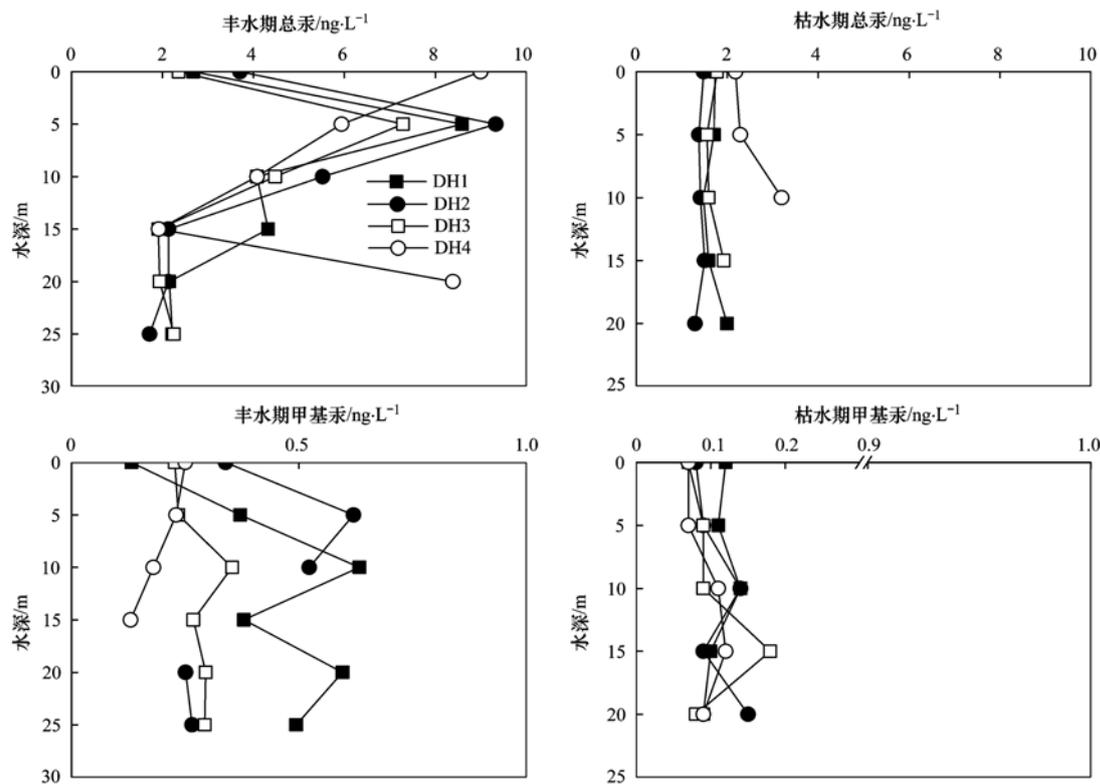


图2 大洪湖上覆水总汞和甲基汞含量分布

Fig. 2 Distribution of THg and MeHg in the water column of the Dahong Lake Reservoir

丰水期时位于上游的 DH1 和中游的 DH2、DH3 处的甲基汞浓度在水深5~10 m范围内出现了最大值分别为0.37、0.62和0.24 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 而在水深15~25 m, 上游、中游和下游的甲基汞浓度无明显的变化; 枯水期, 上游、中游和下游在水深0~10 m无明显的变化, 而在水深15~25 m出现波动. 这表明丰水期时, 湖泊水体中甲基汞的增加可能主要受到泥沙和枯枝落叶汇入的影响; 枯水期时, 由于丰水期沉积湖泊底泥中枯枝落叶的分解, 湖泊水体中甲基汞可能主要受到湖泊底泥的影响. 丰水期和枯水期甲基汞占总汞的百分比分别为10%和6%. 湖泊水体中甲基汞与总汞不存在显著相关性($P>0.05$), 说明了可能水体中甲基汞与总汞的迁移行为不相同, 也可能水体中无机汞和甲基汞的来源与转化存在差异. 大洪湖水体丰水期总汞浓度平均值为4.33 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 枯水期平均值为1.85

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 丰水期甲基汞浓度平均值为0.33 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 枯水期平均值为0.10 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 远远大于其他类型湖泊(总汞, 1.5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 甲基汞, 0.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19], 小于汞污染的湖泊^[20]. 这表明在水源涵养地, 下游水体能够指示汞的输入情况, 同时也说明森林生态系统具备一定的“汞源”特征.

2.2 大洪湖沉积物中总汞和甲基汞的浓度分布

丰水期与枯水期总汞的平均含量相差不大(丰水期, 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 枯水期, 0.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Mason等^[21]的研究表明沉积物具有不均匀性. 这种不均匀性在一定程度上就导致了剖面分布有一定的不同. 通常, 在未受到污染的沉积物中, 其在垂直剖面上有在表层富集的分布趋势^[22,23]. 沉积物中总汞在丰水期和枯水期都有在表层0~10cm富集的分布趋势, 下游 DH4 的沉积物总汞含量大于上游和中游(图3), 表明森林生态系统汇入的枯枝落叶

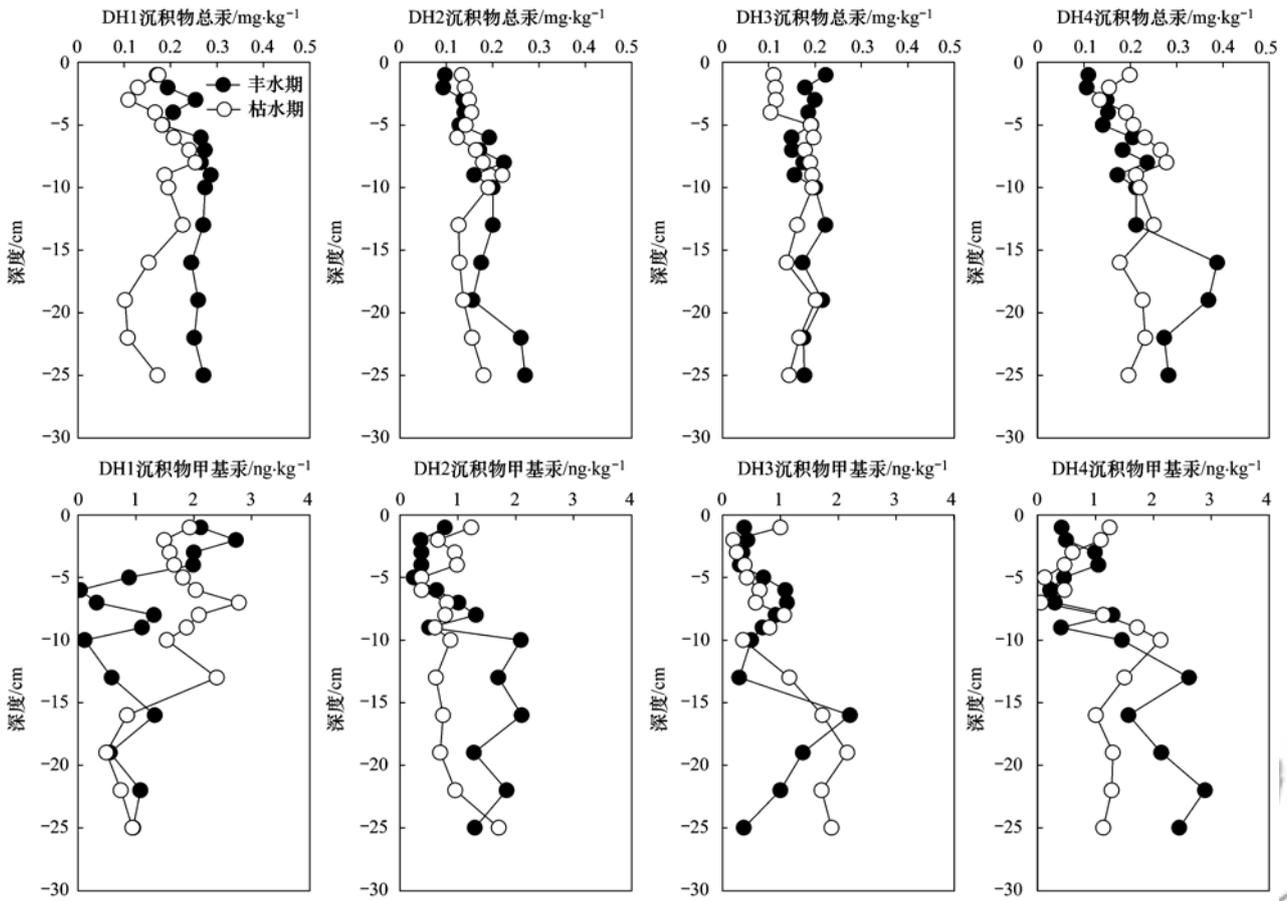


图3 大洪湖沉积物中总汞和甲基汞的分布

Fig. 3 Distribution profile of THg and MeHg in the sediment of the Dahong Lake Reservoir

与泥沙和大洪湖沉积物中汞的释放影响大洪湖上覆水中总汞的含量。丰水期沉积物总汞与有机质有明显相关性(丰水期, $P < 0.05$; 枯水期, $P > 0.05$), 进一步表明丰水期时, 泥沙和枯枝落叶的汇入是影响上覆水中总汞含量的主要因素; 枯水期时, 大洪湖沉积物中汞的释放是影响上覆水中总汞含量的主要因素。

丰水期时, 位于中游 DH2、DH3 和下游 DH4 的沉积物甲基汞的含量在 10 ~ 25 cm 变化波动大, 而且大于沉积物表层 0 ~ 10 cm 的甲基汞的含量, 另外在 10 ~ 25 cm 范围内, 位于下游沉积物中的甲基汞的含量大于上游和中游(图 3), 说明在丰水期时, 沉积物中甲基化的过程可能主要发生沉积物的底层, 而且下游沉积物中的甲基化过程比上游和中游更活跃。枯水期时, 沉积物甲基汞的含量在表层 0 ~ 10 cm 变化波动大, 这表明沉积物中甲基化的过程可能主要发生在沉积物的表层。通常在江河和海洋环境中, 沉积物的甲基汞占总汞的质量分数为 1% ~ 1.5% 或者比 0.5% 更低^[24]。大洪湖丰水期沉积物甲基汞占总汞的质量分数为 0.53%, 枯水期为

0.64%, 可能由于丰水期雨量大, 汇入的枯枝落叶沉积在沉积物中, 导致沉积物中的总汞增加, 而且枯枝落叶沉积在沉积物的表层, 甲基化过程发生在沉积物的底层; 枯水期雨量小, 甲基化过程主要发生在沉积物的表层, 沉积物表层有丰富的有机质, 能够刺激微生物的活性, 导致甲基汞的含量增加。所以枯水期沉积物甲基汞占总汞的质量分数比丰水期大。枯水期沉积物甲基汞与有机质存在相关性(丰水期, $P > 0.05$; 枯水期, $P < 0.05$), 也表明了丰水期时, 枯枝落叶沉积在沉积物的表层, 甲基化过程可能发生在沉积物的底层, 微生物不能够有效地利用沉积物表层的有机质, 而枯水期时, 甲基化过程可能发生在沉积物的表层, 微生物能够有效地利用有机质进行甲基化的过程。

2.3 大洪湖沉积物孔隙水中总汞和甲基汞的含量分布

丰水期时, 孔隙水中的溶解态汞在表层 0 ~ 10 cm 有最大值出现(DH1, $21.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; DH3, $13.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; DH4, $25.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 且有在其富集的趋势; 枯水期与丰水期有相同特征(图 4)。丰水期

和枯水期孔隙水中的溶解态汞均大于上覆水，成为上覆水中汞的来源，造成上覆水底层水中溶解态汞含量高于上层水。固体沉积物中孔隙水中溶解态汞与总汞(丰水期, $R=0.11$, $P=0.36$; 枯水期, $R=0.11$, $P=0.42$)和有机质(丰水期, $P>0.05$; 枯水期, $P>0.05$)没有明显的相关性, 说明沉积物固相中总汞浓度和有机质对孔隙水中溶解态汞的分布没有显著影响, 其他因素可能起重要作用。实际上, 汞在沉积物两相之间的吸附和解析是一个双向可逆的物理化学过程, 受到汞浓度、温度、pH 值、氧化还原条件、配位反应、有机物、氧化物等多种因素的影响。沉积物中汞的释放表现为孔隙水汞浓度的变化。固体(沉积物)和液相(孔隙水)之间的 Hg 分布是一个非常复杂的过程。丰水期沉积物固/液界面之间的分配系数 K_d 为 $1.7 \times 10^4 \text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 枯水期 K_d 为 $4.2 \times 10^4 \text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 枯水期的分配系数明显大于丰水期, 表明丰水期时, 更有利于汞从沉积物固

相进入沉积物液相, 从而进入上覆水中。

大洪湖沉积物孔隙水溶解态甲基汞最大值大多出现在 0~10 cm 范围内, 而且随深度增加逐渐减小(图 4), 这表明, 丰水期和枯水期汞的甲基化主要发生在大洪湖的表层沉积物中。另外, 表层沉积物孔隙水中溶解态甲基汞含量明显高于上覆水层。由于表层孔隙水与上覆水之间存在浓度梯度, 孔隙水中的甲基汞向上覆水中扩散, 成为上覆水甲基汞来源^[25,26]。由于大洪湖水体的移动, 上游和中游部分颗粒物在下游沉积物中累积, 而底水在全年处于相对缺氧的还原环境中, 导致表层沉积物中更活跃的甲基化过程, 在丰水期尤为明显。丰水期甲基汞在沉积物固/液界面之间的分配系数 K_d 为 $7.7 \times 10^2 \text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 枯水期 K_d 为 $4.0 \times 10^3 \text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与总汞的分配系数相同, 均呈现出枯水期显著大于丰水期, 表明丰水期时, 更有利于汞和甲基汞从沉积物固相进入沉积物液相, 从而进入上覆水中。

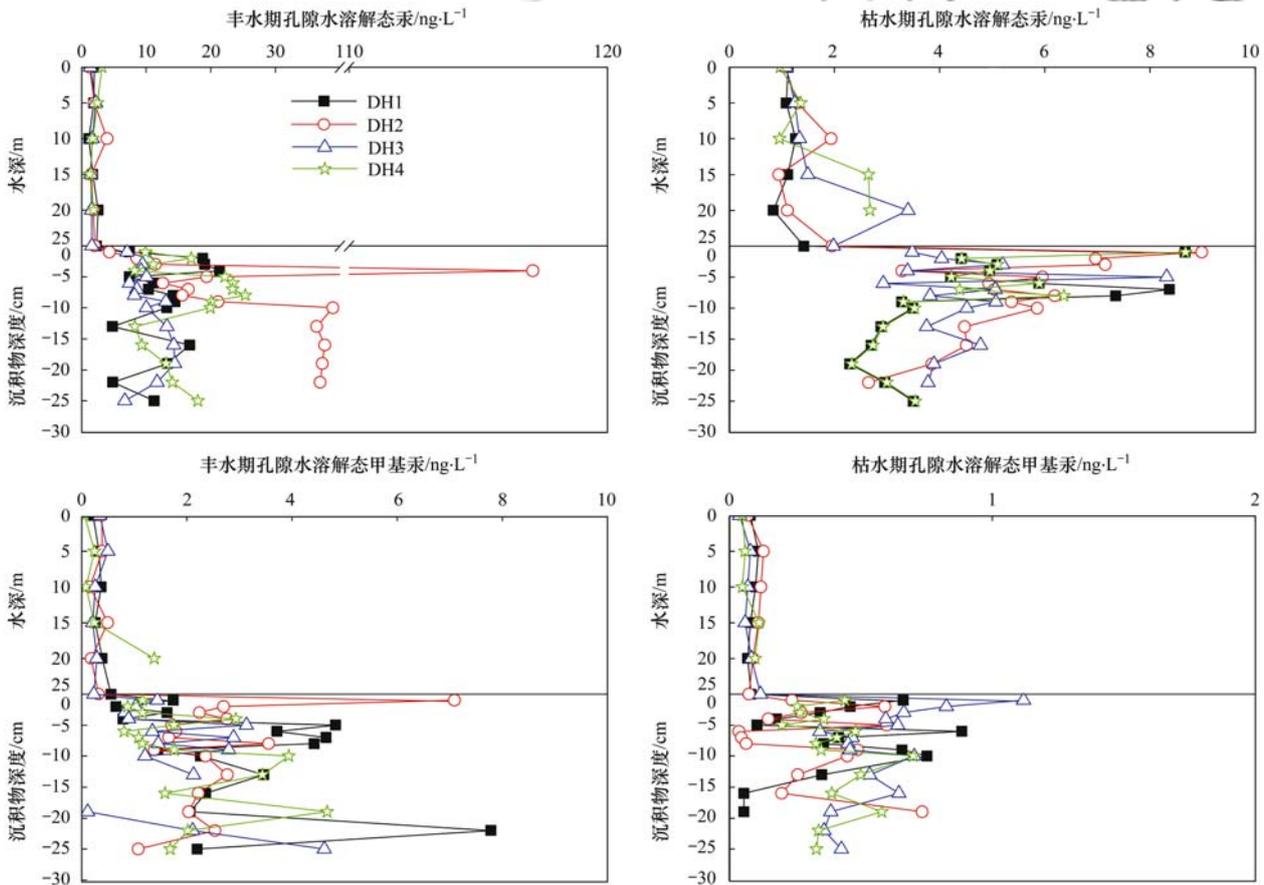


图 4 大洪湖沉积物孔隙水溶解态汞和溶解态甲基汞剖面分布

Fig. 4 Distribution profile of dissolved mercury and methylmercury in sediment pore water of the Dahong Lake Reservoir

2.4 沉积物孔隙水中汞的扩散通量

大洪湖沉积物孔隙水中的无机汞、甲基汞与上覆水存在明显的浓度梯度, 沉积物中汞将以孔

隙水为介质向上覆水扩散, 影响上覆水的水质。大洪湖泥水界面溶解态无机汞和甲基汞的扩散通量可通过实测浓度梯度和 Fick 第一定律估算

得到,从而估计沉积物中无机汞和甲基汞对上覆水贡献程度.

$$F = -\frac{\alpha\varphi D_w}{\epsilon} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

$$\theta^2 = 1 - \ln(\varphi^2) \quad (2)$$

式中, F 是浓度为 c 的溶解态物质在深度为 x 的扩

散通量, φ 是沉积物孔隙度, 表层 0~4 cm 的沉积物的孔隙度为 0.93^[27], θ 是弯曲度, 和孔隙度之间的关系可用公式(2)表示, D_w 和 D_0 为溶解态物质的理想扩散系数. 无机汞的 D_w 取 $9.56 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 甲基汞 D_0 取 $1.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[28,29], 扩散通量结果如表 1 所示.

表 1 大洪湖沉积物孔隙水汞向上的扩散通量

Table 1 Diffuse flux of the pore water to the water column in the Dahong Lake Reservoir

项目	丰水期		枯水期	
	无机汞	甲基汞	无机汞	甲基汞
孔隙水汞浓度/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	7.17	2.86	7.45	0.62
上覆水汞浓度/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	1.86	0.37	1.79	0.09
浓度梯度/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	5.31	2.49	5.66	0.53
扩散通量 $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	38.07	2.79	40.6	0.59

丰水期和枯水期无机汞和甲基汞的扩散通量(表 1)表明,大洪湖沉积物是大洪湖水体中甲基汞和无机汞的输入源. 丰水期甲基汞的扩散通量明显大于枯水期,表明丰水期时,沉积物中的甲基化更加的活跃,更有利于甲基汞从沉积物固相进入沉积物液相,从而进入上覆水中. 丰水期无机汞的扩散通量小于枯水期,说明枯枝落叶和泥沙的汇入是丰水期时上覆水中汞增加的主要因素,沉积物中汞的释放是枯水期时上覆水中汞增加的主要因素.

3 结论

由于泥沙和枯枝落叶的汇入,大洪湖上覆水中的总汞含量,特别是在下游地区上覆水中的总汞含量在丰水期显著增加(丰水期平均值 $4.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 枯水期 $1.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),亚热带林区水源涵养地水体的总汞和甲基汞的含量高于其他类型的湖泊,但小于受到污染的湖泊,在一定程度上说明了四面山常绿阔叶林具有一定的“汞源”的特征. 沉积物也是大洪湖上覆水中甲基汞和无机汞的输入源,而且丰水期和枯水期的甲基化过程都发生在沉积物的表层,丰水期甲基化比枯水期更加活跃. 丰水期时,枯枝落叶和泥沙的汇入是上覆水中汞增加的主要因素,更有利于汞和甲基汞从沉积物固相进入沉积物液相,从而进入上覆水中;枯水期时,沉积物中汞的释放是枯水期时上覆水中汞增加的主要因素.

参考文献:

- [1] US Environmental Protection Agency. Mercury study report to congress[R]. EPA-452/R-97-003. Washington DC: USEPA, 1997.
- [2] Clarkson T W, Magos L, Myers G J. Human exposure to mercury; the three modern dilemmas [J]. Journal of Trace Elements in Experimental Medicine, 2003, 16(4): 321-343.

- [3] Stein E D, Cohen Y, Winer A M. Environmental distribution and transformation of mercury compounds[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1996, 26(1): 1-43.
- [4] Gill G A, Bruland K W. Mercury speciation in surface freshwater systems in California and other areas[J]. Environmental Science & Technology, 1990, 24(9): 1392-1400.
- [5] Feng X B, Jiang H M, Qiu G L, et al. Mercury mass balance study in Wujiangdu and Dongfeng Reservoirs, Guizhou, China [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(10): 2594-2603.
- [6] 李芬,王训,罗辑,等. 1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 3045-3053.
- Li F, Wang X, Luo J, et al. Bioaccumulation of heavy metals in twigs and leaves of *Abies fabri* at Mount Gongga in China: a comparison study between 1999 and 2014 [J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 3045-3053.
- [7] Blackwell B D, Driscoll C T, Maxwell J A, et al. Changing climate alters inputs and pathways of mercury deposition to forested ecosystems [J]. Biogeochemistry, 2014, 119(1-3): 215-228.
- [8] 程正霖,罗遥,张婷,等. 我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5004-5011.
- Cheng Z L, Luo Y, Zhang T, et al. Deposition of sulfur, nitrogen and mercury in two typical forest ecosystems in southern China [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5004-5011.
- [9] 马明,赖大坤,孙涛,等. 中亚热带典型林分汞的输入/输出平衡[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4744-4750.
- Ma M, Lai D K, Sun T, et al. Mercury dynamics and mass balance in a subtropical forest in southwest China [J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4744-4750.
- [10] Jonsson S, Skjellberg U, Nilsson M B, et al. Differentiated availability of geochemical mercury pools controls methylmercury levels in estuarine sediment and biota [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4624.
- [11] 王雨春,黄荣贵,万国江. SWB—1 型便携式湖泊沉积物-界面水取样器的研制[J]. 地质地球化学, 1998, (1): 94-96.
- Wang Y C, Huang R G, Wan G J. A newly developed sampler for collecting samples near the lacustrine sediment-water interface

- [J]. *Geology-Geochemistry*, 1998, (1): 94-96.
- [12] 阎海鱼, 冯新斌, 李仲根, 等. 半封闭溶样冷原子荧光测定鱼体中总汞分析方法的建立[J]. *地球与环境*, 2005, **33**(1): 89-92.
Yan H Y, Feng X B, Li Z G, *et al.* A methodological development in measuring total mercury in fish using semi-closed digestion and CVAFS[J]. *Earth and Environment*, 2005, **33**(1): 89-92.
- [13] 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.
Jiang H M, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methyl mercury in waters by distillation-GC-CVAFS technique [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 568-571.
- [14] 李仲根, 冯新斌, 何天容, 等. 王水水浴消解-冷原子荧光法测定土壤和沉积物中的总汞[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, **24**(2): 140-143.
Li Z G, Feng X B, He T R, *et al.* Determination of total mercury in soil and sediment by aquaregia digestion in the water bath coupled with cold vapor atom fluorescence spectrometry [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, **24**(2): 140-143.
- [15] 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.
- [16] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
Jiang H M. Effects of hydroelectric reservoir on the biogeochemical cycle of mercury in the Wujiang River [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Science (Institute of Geochemistry), 2005.
- [17] Hurley J P, Watras C J, Bloom N S. Mercury cycling in a northern wisconsin seepage lake: the role of particulate matter in vertical transport [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1991, **56**(1): 543-551.
- [18] 秦捷, 赵文, 张鹏. 环境汞污染对藻类的毒性效应及其影响因素[J]. *生物学杂志*, 2011, **28**(3): 74-76.
Qin J, Zhao W, Zhang P. The environment mercury pollution toxicity effect to the alga and their influencing factors [J]. *Journal of Biology*, 2011, **28**(3): 74-76.
- [19] Hines N A, Brezonik P L, Engstrom D R. Sediment and porewater profiles and fluxes of mercury and methylmercury in a small seepage lake in northern minnesota [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(24): 6610-6617.
- [20] Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* The variations of mercury in sediment profiles from a historically mercury-contaminated reservoir, Guizhou province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **407**(1): 497-506.
- [21] Mason R P, Sullivan K A. The distribution and speciation of mercury in the south and equatorial Atlantic [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1999, **46**(5): 937-956.
- [22] 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.
- [23] He T R, Lu J L, Yang F, *et al.* Horizontal and vertical variability of mercury species in pore water and sediments in small lakes in Ontario [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **386**(1-3): 53-64.
- [24] Gilmour C C, Henry E A. Mercury methylation in aquatic systems affected by acid deposition[J]. *Environmental Pollution*, 1991, **71**(2-4): 131-169.
- [25] 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.
He T R, Feng X B, Guo Y N, *et al.* Geochemical cycling of mercury in the sediment of Hongfeng Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(7): 1768-1774.
- [26] Zhang J F, Feng X B, Yan H Y, *et al.* Seasonal distributions of mercury species and their relationship to some physicochemical factors in Puding Reservoir, Guizhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(1): 122-129.
- [27] 赵馨. 普定水库水体、沉积物中不同形态汞的迁移转化规律[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Zhao X. The distributions and transformations of the different species mercury of water column and sediments in Puding Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [28] Gill G A, Bloom N S, Cappellino S, *et al.* Sediment? water fluxes of mercury in Lavaca Bay, Texas [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(5): 663-669.
- [29] Covelli S, Faganeli J, Horvat M, *et al.* Porewater distribution and benthic flux measurements of mercury and methylmercury in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**(4): 415-428.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ ¹⁸ O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)