

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征

程柳¹, 麻冰涓¹, 周伟立¹, 王力², 职音³, 刘清伟³, 毛宇翔^{1*}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; 2. 龙鳞佰利联集团股份有限公司, 焦作 454003; 3. 焦作市环境监测站, 焦作 454003)

摘要: 为了解三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征, 在丰水期和枯水期对三门峡水库进行采样, 分别采用冷原子荧光光谱法(CVAFS)和蒸馏-乙基化衍生-气相色谱-冷原子荧光法(GC-CVAFS)测定水样中总汞、总甲基汞、溶解态总汞和溶解态甲基汞的浓度。结果表明, 三门峡水库水体中总汞、溶解态汞和颗粒态汞浓度范围分别为1.65~9.65、0.80~3.16和0.70~7.81 ng·L⁻¹, 符合国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002)一类水汞浓度标准限值; 总甲基汞、溶解态甲基汞和颗粒态甲基汞浓度分别为0.05~0.36、0.02~0.14和ND~0.26 ng·L⁻¹。三门峡水库水体总汞和甲基汞在季节和空间分布上没有呈现出明显的变化规律。总汞和甲基汞与未受污染的天然水体差别不大, 水库未受到明显的汞污染。丰、枯水期沉积物中总汞浓度分别为(92.96 ± 10.65) ng·g⁻¹和(80.06 ± 19.14) ng·g⁻¹, 甲基汞浓度分别为(0.33 ± 0.14) ng·g⁻¹和(0.50 ± 0.19) ng·g⁻¹。较低的甲基汞浓度说明在三门峡水库汞的迁移转化过程中, 甲基化作用可能并非主要的过程, 这可能与水体底层溶解氧浓度较高以及沉积物中有机质浓度较低有关。

关键词: 三门峡水库; 水体; 沉积物; 汞; 甲基汞

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5032-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705227

Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir

CHENG Liu¹, MA Bing-juan¹, ZHOU Wei-li¹, WANG Li², ZHI Yin³, LIU Qing-wei³, MAO Yu-xiang^{1*}

(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Lomon Billions Group Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China; 3. Jiaozuo Environmental Monitoring Station, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to obtain the distribution of different species of mercury (Hg) in the water in the Sanmenxia Reservoir, cold vapor atomic fluorescence spectrometry (CVAFS) and aqueous phase ethylation derivatization-gas chromatography-atomic fluorescence spectrometry (GC-CVAFS) methods were used for the analysis of total Hg (THg) and methylmercury (MeHg) in water and sediment samples, respectively. It was found that the levels of THg, dissolved mercury, and particulate mercury in the water ranged from 1.65-9.65, 0.80-3.16, and 0.70-7.81 ng·L⁻¹, respectively. The THg in the water could meet the requirement for the Class I criterion in the national surface water environmental quality standard (GB 3838-2002). The amounts of MeHg, dissolved MeHg, and particulate MeHg in the water samples were 0.05-0.36, 0.02-0.14, and ND-0.26 ng·L⁻¹, respectively. No evident seasonal or spatial patterns for Hg were observed. The THg and MeHg in the Sanmenxia Reservoir were within the ranges for those in uncontaminated waterbodies worldwide. The amount of THg in the sediments was (92.96 ± 10.65) ng·g⁻¹ and (80.06 ± 19.14) ng·g⁻¹, while the amount of MeHg in the corresponding sediment samples was (0.33 ± 0.14) ng·g⁻¹ and (0.50 ± 0.19) ng·g⁻¹ for wet and dry seasons, respectively. The ratios of MeHg/THg in the sediment of the Sanmenxia Reservoir were relatively small in comparison to those in other aqueous systems, indicating that methylation might play a minor role in the biogeochemistry of Hg in the Sanmenxia Reservoir. This might be attributed to the high dissolved oxygen levels of the bottom water and low organic carbon content of the sediments.

Key words: Sanmenxia reservoir; water; sediments; mercury; methylmercury

汞(Hg)作为全球性的污染物,几十年来一直是人们极为关注的问题。由于汞对环境和健康的不良影响,2013年签署了一项全球条约,即“水俣公约”,号召大力减少汞的生产、使用和排放。汞及其化合物具有较强的生物毒性^[1],能沿着食物链高度富集,鱼对甲基汞的富集系数能达到数万乃至数十万倍,严重威胁人类健康,因而水环境中汞污染问题备受关注。

水库是一种介于河流和湖泊之间的半人工、半自然水体。据统计,全世界水库蓄水面积已超过

1.5 × 10¹² m²^[2]。我国人均水资源不足世界平均水平的1/4,水库在我国的工农业及人民生活中占有举足轻重的地位。目前,仅长江流域内就已建成4.8万座水库,其中大型水库137座^[3]。这么多筑

收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177035, 21377035); 教育部留学回国人员科研启动基金项目; 河南省高校科技创新人才支持计划项目(15HASTIT045); 河南理工大学博士基金项目(B2011-041)

作者简介: 程柳(1988~),女,博士研究生,主要研究方向为汞的迁移转化与生物可利用性, E-mail: chengliu0323@163.com

* 通信作者, E-mail: yuxiangmao@hpu.edu.cn

坝拦截形成的水体, 其环境很可能有利于汞的活化、甲基化和生物累积^[4], 使流域内的水库成为高度风险的甲基汞污染“敏感生态系统”。目前, 我国对水库汞的环境化学研究主要集中于长江流域和西南地区^[5, 6], 黄河流域仅小浪底水库有初步研究发表^[7]。因此, 对黄河流域其他水库汞污染的进一步研究是非常必要的。

黄河三门峡水库库区地处中条山和秦岭之间的山间盆地中, 库区包括龙门以下三门峡大坝以上区域, 位于陕、晋、豫三省交界的金三角地带。大坝控制黄河流域面积 68.84 万 km², 占流域总面积的 91.5%^[8]。库区三门峡河段是三门峡市主要的供水水源地。因此, 本文以三门峡水库为研究对象, 分析了水库水体和沉积物中汞的赋存形态及其时空变化规律, 初步探讨了三门峡水库的修建对水体汞的分布特征和时空变化规律的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在三门峡水库主航道从大坝开始向上游间隔 10 km 依次设置 4 个垂直采样断面(图 1), 于 2015 年 10 月(丰水期)和 2016 年 5 月(枯水期)分别采集水样品及沉积物样品。



图 1 三门峡水库采样断面分布示意

Fig. 1 Sampling locations in the Sanmenxia Reservoir

1.1.1 水样采集

采用 SCD-1 型深水采样器(北京普力特仪器有限公司, 北京)在采样断面采集表、中、底层水样分别装入 500 mL 硼硅玻璃瓶、500 mL 和 1 L 聚丙烯(PP)瓶中, 现场按 1% 的比例向 500 mL 硼硅玻璃瓶中加入电子级(MOS)HCl(用于总汞的测定), 按 0.4% 的比例向 500 mL PP 瓶中加入电子级(MOS)HCl(用于总甲基汞的测定), 双层保鲜袋包装后放入装有冰块的保温箱中运回实验室。1 L PP 瓶中水样带回实验室后立即用 0.45 μm 滤膜过滤后分别装入 500 mL 硼硅玻璃瓶和 250 mL PP 瓶, 按 1% 的比例向硼硅玻璃瓶中加入电子级(MOS)HCl(用于溶

解态汞的测定), 按 0.4% 的比例向 PP 瓶中加入电子级(MOS)HCl(用于溶解态甲基汞的测定), 样品均置于暗处避光保存。现场采用在线多参数水质分析仪(EXO)(YSI, 美国)测定水温、pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)及浊度等水质参数。

1.1.2 沉积物样品采集

在每一采样断面用 Van Veen 型采泥器(北京普力特仪器有限公司)采集水库表层沉积物样品装入 250 mL 聚丙烯(PP)瓶中, 双层自封袋包装后放入冷藏箱中运回实验室。沉积物样品用真空冷冻干燥仪(北京博医康实验仪器有限公司)干燥, 干燥后的沉积物样品研磨至 100 目以供分析。

1.2 样品分析

1.2.1 总汞和溶解态汞

水样中总汞和溶解态汞的测定采用美国环保署标准方法(USEPA method 1631)。即用 BrCl 消解, 消解后的样品经 SnCl₂ 还原-吹扫捕集-冷蒸气原子荧光测定, 具体步骤详见文献[7]。该方法的检出限是 0.5 ng·L⁻¹。

沉积物样品中总汞采用直接测汞仪(DMA-80)(Milestone, 意大利)测定。

1.2.2 总甲基汞和溶解态甲基汞

水样中总甲基汞和溶解态甲基汞采用蒸馏-乙基化衍生 GC-CVAFS 法测定^[9]。该方法的检出限是 0.02 ng·L⁻¹。

沉积物样品中甲基汞的测定参见文献[7]。

1.2.3 颗粒态汞和颗粒态甲基汞

在本实验为总汞(或总甲基汞)与溶解态汞(溶解态甲基汞)的差值, 是指所有吸附在水中悬浮颗粒物上的汞。

1.3 实验室质量控制

为了保证实验数据的准确度和精密度, 在样品分析过程中使用了空白样品、平行样品、加标回收和标准样品作为质量控制手段。

(1)空白样品在进行样品分析之前, 先对气泡瓶空白, 实验药品空白等进行检验, 确保空白值不影响样品的测定。每批次测定中均设置 3 个空白样品, 随实际样品一起处理和测定, 以确保实验过程中没有污染。

(2)平行样品每个样品均设置 3 个平行样, 计算其平均值和相对标准偏差。实验所测相对标准偏差均小于 15%。

(3)加标回收每批次测定均从样品中随机抽取 20% 的样品做加标回收, 实验测得样品回收率在

80% ~ 110% 之间.

(4) 标准参考物质沉积物标准参考物质选择 ERM-CC580[总汞标定值(132 ± 3) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 甲基汞(75.5 ± 4) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$], 其总汞、甲基汞实测值与标定值的偏差均小于 15%.

2 结果与讨论

2.1 水库基本水质参数

表 1 显示了水库水质 pH、DO、温度和氧化还原电位(ORP)参数季节变化特征. 从表中可以看出, 丰、枯水期水体不同采样断面垂直方向上的温

度、溶解氧、pH 和 ORP 没有明显变化, 仅枯水期水体表层 DO 略高, 可能是由于水体表面较强的大气复氧和藻类光合作用的结果. 由流域输入的有机质及水库内自身的内源性有机质分解耗氧, 使底部水体溶解氧下降. 库区水体整体呈现富氧环境. 丰水期 pH 略高于枯水期, 水体呈弱碱性环境. 丰水期温度和 ORP 均低于枯水期. 这可能是由于枯水期正值夏季的开端, 区域温度上升、日照量增加, 水温增长迅速. ORP 数据则说明, 三门峡水库呈良好的氧化环境, 因此三门峡水库水体环境可能不利于汞的甲基化.

表 1 水库水质参数的季节特征¹⁾

Table 1 Seasonal variation of water parameters

采样断面		pH	DO	温度	ORP	采样断面		pH	DO	温度	ORP
①(k)	表	6.87	7.97	20.1	84.9	①(f)	表	7.97	8.18	11.1	64
	中	6.71	6.84	19.5	111.7		中	7.9	8.08	11.0	72
	底	6.5	6.59	19.8	76.7		底	7.93	8.17	11.1	75
②(k)	表	6.89	8.21	21.3	113.6	②(f)	表	7.98	7.92	12.3	50
	中	6.8	6.67	19.8	138.2		中	7.94	7.8	12.2	64
	底	6.75	5.40	19.4	125.5		底	7.95	7.77	12.2	73
③(k)	表	6.94	8.11	21.3	119.7	③(f)	表	7.98	8.36	11.8	78
	中	6.85	5.99	20.0	146.2		中	7.95	8.16	11.6	82
	底	6.84	5.55	19.8	161.8		底	7.93	7.96	11.5	95
④(k)	表	6.94	9.58	21.1	180.7	④(f)	表	7.94	8.27	11.4	52
	中	6.91	9.20	21.2	180.8		中	7.91	8.12	11.4	61
	底	6.85	7.71	19.9	199.3		底	7.91	8.07	11.4	88

1) k 表示枯水期, f 表示丰水期

2.2 水库水体中不同形态汞的分布

2.2.1 溶解态汞(DHg)、颗粒态汞(PHg)和总汞(THg)的分布

三门峡水库总汞(THg)、溶解态汞(DHg)和颗粒态汞(PHg)的时空分布特征如图 2. 三门峡水库 THg 的浓度范围是($1.65 \sim 9.65$) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 丰、枯水期 THg 浓度平均值为(4.18 ± 1.88) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 (5.02 ± 1.92) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 远低于我国环境质量标准(GB 3838-2002)规定的一类地表水汞浓度标准限值($50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). 总汞浓度在整个水体上下层变化不大. 将三门峡水库水体与世界其他天然水体相比较(表 2)发现, 三门峡水库水体中总汞浓度高于小浪底水库, 其总汞、溶解态汞及颗粒态汞浓度高于乌江渡水库、洪家渡水库、Lake Balaton 和 English Channel, 低于长寿湖水库和阿哈湖, 表明三门峡水库水体处于中等水平, 没有受到明显的汞污染. 枯水期, 总汞表现为从大坝至上游逐渐升高的趋势, 可能是含汞颗粒随河水流动过程中逐渐沉降到沉积

物中, 使水库下游段颗粒物减少. 这也可能与上游有较多的网箱养鱼及工厂企业排放的废水、废气和生活废水有关.

枯水期, 水中 DHg 浓度为($0.87 \sim 1.88$) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为(1.38 ± 0.37) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 丰水期 DHg 浓度为($0.80 \sim 3.16$) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为(1.80 ± 0.69) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 枯水期 PHg 浓度为($0.75 \sim 6.25$) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为(3.64 ± 1.70) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 丰水期 PHg 浓度为($0.70 \sim 7.81$) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为(2.38 ± 1.99) $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 丰、枯水期三门峡水库水体 DHg 和 PHg 没有表现出明显的季节和空间变化规律.

丰、枯水期颗粒态汞占总汞的比例分别为 52% 和 69%, 这与东风水库^[10]研究结果相似(春季和夏季颗粒态汞占总汞的比例分别为 41.2% 和 66.5%), 显示枯水期 THg 主要以颗粒态为主.

相关性分析表明, 丰、枯水期 DHg 与 PHg 和 THg($P > 0.05$)均无显著相关性, PHg 与 THg($R =$

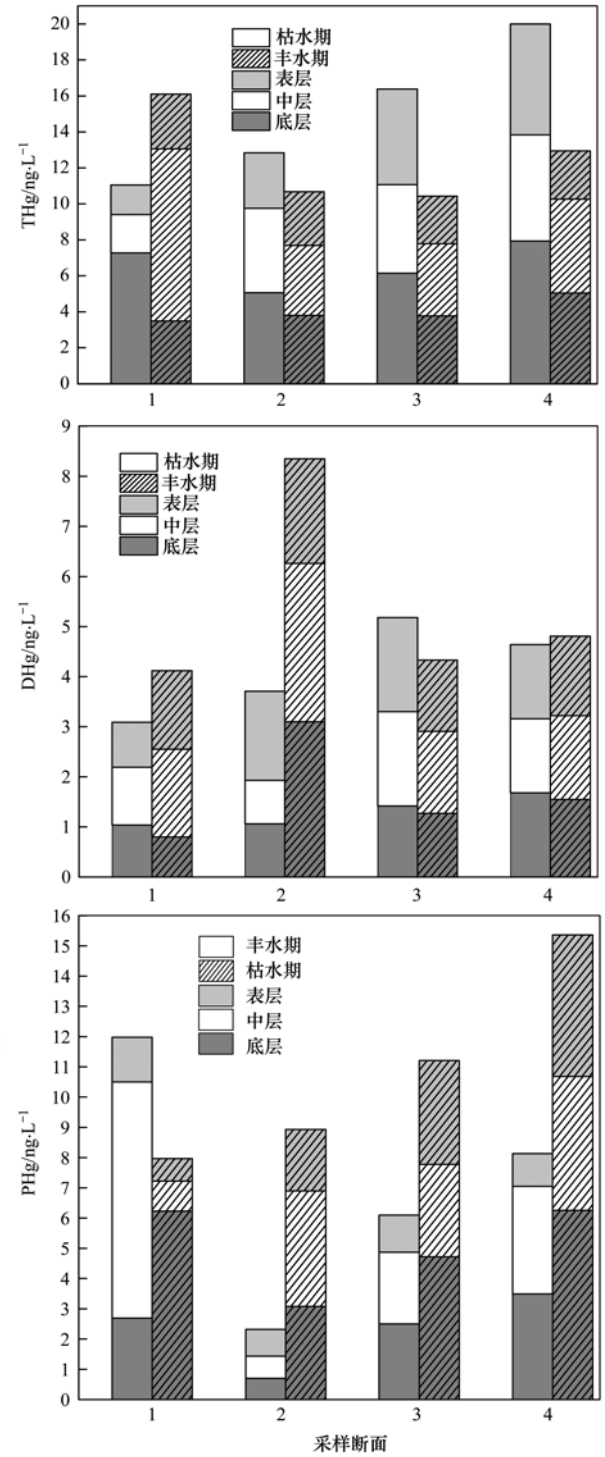


图2 三门峡水库水体汞(THg、DHg、PHg)的时空变化

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of mercury (THg, DHg, and PHg) in the Sanmenxia Reservoir

0.938^{**}, $P < 0.01$, $n = 12$ 和 $R = 0.982^{**}$, $P < 0.01$, $n = 12$)均达到极显著相关关系,说明三门峡水库水体 THg 的整体变化趋势取决于 PHg 的变化趋势(在图2中可以明显看出),但 DHg 也在一定程度上影响了 THg 的变化.这与潘鲁生等^[10]研究的乌江流域东风水库的结果一致.

2.2.2 溶解态甲基汞(DMeHg)、颗粒态甲基汞(PMeHg)和总甲基汞(TMeHg)的分布

图3显示了三门峡水库 TMeHg、DMeHg 和 PMeHg 的时空分布特征.枯水期 TMeHg 的浓度为

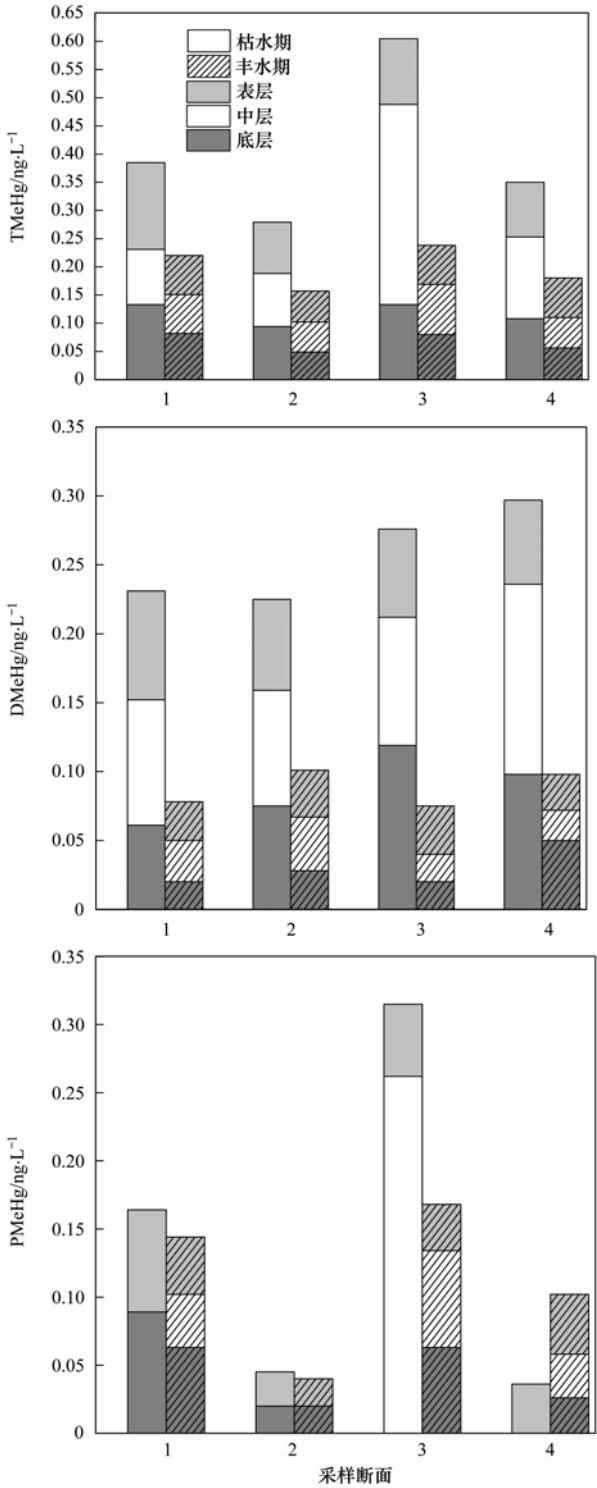


图3 三门峡水库水体甲基汞(TMeHg、DMeHg 和 PMeHg)的时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of methylmercury (TMeHg, DMeHg, and PMeHg) in the Sanmenxia Reservoir

0.09 ~0.36 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.14 \pm 0.07) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (溶解态占 70.5%, 颗粒态占 29.5%); 丰水期 TMeHg 的浓度为 0.05 ~0.09 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.07 \pm 0.01) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (溶解态占 44.7%, 颗粒态占 55.3%). 在垂直剖面上, 丰、枯水期 TMeHg 未呈现出明显的变化趋势. 丰水期甲基汞浓度 < 枯水期, 这可能是由于水体甲基汞浓度受温度影响所致^[11]. Kotnik 等^[17]的研究表明: 当水体温度低于 10℃ 或高于 90℃ 时, 甲基化明显降低甚至完全受到

抑制, 一般当水温达到 32℃ 时, 甲基汞产量最高. 三门峡水库枯水期温度在 20℃ 左右, 而丰水期温度低至 11 ~12℃, 枯水期较高的温度可能更利于汞发生甲基化, 丰水期汞甲基化能力受到抑制, 且较低的温度适于汞的脱甲基作用^[18]. 其次枯水期水库处于蓄水状态, 水力停留时间长, 有利于水库水体的甲基化作用, 从而产生一部分内源性甲基汞, 使得水库水体总甲基汞浓度相对较高^[19]. 因而丰水期甲基汞浓度低于枯水期.

表 2 三门峡水库水体中不同形态汞浓度与其他天然水体的比较/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Comparison of mercury and methyl mercury concentration in the waters of the Sanmenxia Reservoir with other natural aquatic systems reported in recent literatures/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

地点	Hg	DHg	PHg	TMeHg	DMeHg	PMeHg	文献
三门峡水库	1.65 ~9.65	0.80 ~3.16	0.70 ~7.81	0.05 ~0.36	0.02 ~0.14	ND ~0.26	本研究
小浪底水库	0.53 ~3.86						[7]
乌江渡水库	0.74 ~3.34	0.49 ~2.86	0.01 ~1.25	0.06 ~2.41	0.04 ~1.54	0.001 ~0.88	[11]
洪家渡水库	0.32 ~6.75	0.23 ~2.27	0.03 ~4.51	0.04 ~0.18	0.02 ~0.08	0.01 ~0.13	[12]
长寿湖水库	14.77 ±12.24	5.62 ±4.75	9.13 ±11.51	0.41 ±0.47	0.17 ±0.18		[13]
阿哈湖	2.08 ~19.14	2.08 ~8.36	0.28 ~14.80	0.002 ~0.43	0.03 ~0.39	0.001 ~0.27	[14]
Lake Balaton	1.45 ~6.48	1.42 ~4.68	0.23 ~3.85	0.08 ~0.44	0.05 ~0.37	0.004 ~0.23	[15]
English Channel	0.15 ~0.87			0.015 ~0.07			[16]

将三门峡水库水体中甲基汞浓度与其他天然水体对比发现, 三门峡水库水体中甲基汞浓度仅高于洪家渡水库和 English Channel, 略低于其他天然水体(表 2), 总甲基汞占总汞的比例分别为: 枯水期 1% ~9%, 均值为 3%; 丰水期 1% ~3%, 均值为 1.8%, 明显低于欧洲报道的水库水体存在高甲基汞的比例(50% ~80%)^[20], 丰、枯水期总甲基汞与总汞之间无相关关系($P > 0.05$). 该现象与北美欧洲发现的新建水库甲基汞浓度明显升高的结论不一致, 可能与水库缺少适宜的甲基化条件等环境因素有关.

枯水期三门峡水库水体 DMeHg 的浓度范围为 0.06 ~0.14 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.09 \pm 0.02) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 丰水期 DMeHg 的浓度范围为 0.02 ~0.05 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.03 \pm 0.01) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 丰水期水库水体交换频繁, 水力停留时间短, 不利于形成水体汞甲基化的环境, 使水库甲基化率降低, 而水力停留时间是影响水体汞甲基化的重要因素^[6], 因此枯水期溶解态甲基汞浓度高于丰水期. 在垂直剖面上, 各断面 DMeHg 没有明显的规律性.

枯水期 PMeHg 的浓度变化为 ND ~ 0.262 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值 $(0.05 \pm 0.07) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 丰水期为 ND ~0.07 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值 $(0.04 \pm 0.02) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 丰、枯水期 PMeHg/TMeHg 的比例分别为 55.3% 和

29.5%, 丰水期甲基汞溶解态和颗粒态接近, 枯水期甲基汞以溶解态为主. 相关性分析表明, 枯水期 PMeHg 与 TMeHg 具有显著正相关关系($R = 0.945^{**}$, $P < 0.01$, $n = 12$), DMeHg 与 TMeHg($R = 0.195$, $n = 12$)、PMeHg 与 DMeHg($R = -0.136$, $n = 12$)均无明显相关性; 丰水期 PMeHg 与 TMeHg($R = 0.866^{**}$, $P < 0.01$, $n = 12$)具有显著正相关关系, PMeHg 与 DMeHg($R = -0.745^{**}$, $P < 0.01$, $n = 12$)具有显著负相关关系, 而 DMeHg 与 TMeHg($R = -0.312$, $n = 12$)无显著相关关系. 由此可见, 水库水体中甲基汞的产生和迁移与颗粒态甲基汞有密切关系, 即三门峡水库水体 TMeHg 的变化趋势主要取决于 PMeHg 的变化.

2.3 沉积物中总汞和甲基汞的分布

三门峡水库沉积物中总汞和甲基汞的分布特征如图 4 所示. 枯水期沉积物中总汞浓度范围是 55.89 ~ 98.82 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均为 $(80.06 \pm 19.14) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 丰水期总汞浓度变化为 79.19 ~ 104.39 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $(92.96 \pm 10.65) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 三门峡水库沉积物总汞浓度表现为丰水期 > 枯水期. 丰水期总汞浓度高于枯水期. 枯水期沉积物中甲基汞浓度范围是 0.27 ~ 0.74 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $(0.50 \pm 0.19) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 丰水期甲基汞浓度变化是 0.26 ~ 0.53 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值是 $(0.33 \pm 0.14) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 水库沉积物

中甲基汞浓度基本上呈现为枯水期 > 丰水期。

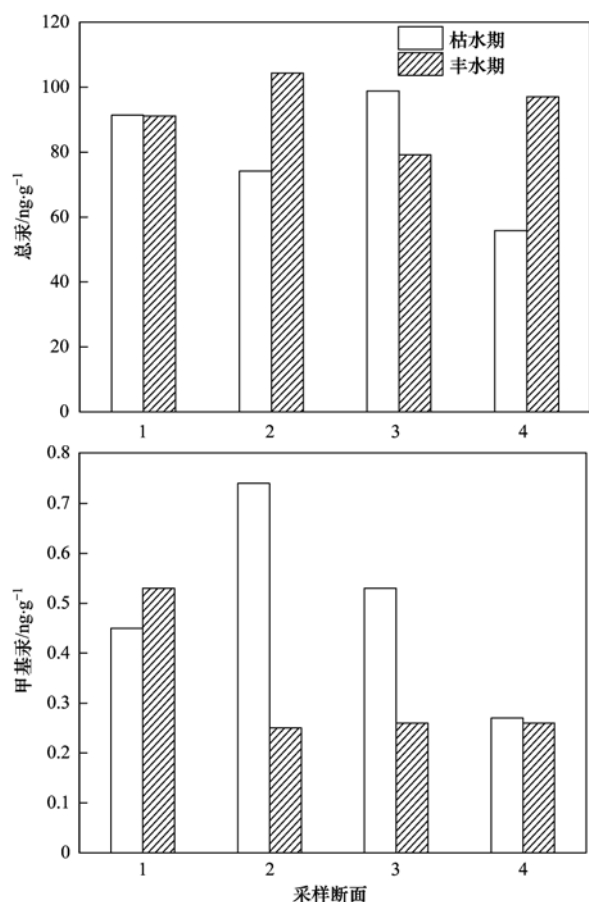


图4 三门峡水库沉积物中总汞与甲基汞的季节分布

Fig. 4 Distribution of THg and MeHg in the sediment of the Sanmenxia Reservoir in different seasons

三门峡水库沉积物丰、枯水期总汞浓度高于全国 A 层土壤汞平均浓度 $65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[21] 和中国大陆沉积物中汞平均浓度 $30 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[22], 且明显高于其它未受污染地区水库沉积物总汞, 如 Bowles 等^[23] 报道塔斯马尼亚西南部两个相邻水库 Lake Gordon 和 Lake Pedder 沉积物总汞浓度为 $3.8 \sim 90 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 但明显低于贵州乌江流域的阿哈湖、东风水库和乌江渡水库沉积物中总汞^[24, 25]. 与小浪底水库 (总汞浓度范围为 $51.74 \sim 172.52 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 相比较, 二者沉积物总汞浓度处于同一水平。

甲基汞占总汞的比例被认为是沉积物发生甲基化的重要指标^[26]. 通常, 沉积物中甲基汞占总汞的比例约为 $1.0\% \sim 1.5\%$, 并且该比例在河口中更低 ($< 0.5\%$)^[27]. 三门峡水库沉积物中甲基汞占总汞的比例分别为枯水期 $0.48\% \sim 1.0\%$ (均值 0.63%), 丰水期 $0.24\% \sim 0.58\%$ (均值 0.35%). 枯水期甲基汞占总汞的比例高于丰水期, 说明三门峡水库沉积物汞发生甲基化主要在枯水期, 这与枯

水期水体中甲基汞浓度相对较高一致. 有机质是甲基化的一个重要的影响因子, 据研究报道^[28], 高有机质浓度 (高达 $30\% \sim 50\%$) 的泥炭地和灰化土淹没 10 年后其表层 10 cm 甲基汞占总汞的比例可达 $10\% \sim 30\%$, 而三门峡水库有机质浓度很低, 仅为 1.18% , 可能是造成三门峡水库沉积物汞甲基化程度较低的原因. 此外, 三门峡水库底层水体较高的溶解氧浓度也不利于无机汞向甲基汞转化。

3 结论

(1) 三门峡水库水体总汞、溶解态汞和颗粒态汞均未呈现出明显的时空分布规律. 总汞浓度符合我国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 规定的一类水总汞浓度标准限值, THg 和 MeHg 浓度与其它未受污染水体差别不大, 表明三门峡水库水体没有受到明显的汞污染。

(2) 三门峡水库水体甲基汞表现为枯水期 > 丰水期, 这主要是由温度和水力停留时间影响所致. 水库水体甲基汞占总汞的比例明显偏低, 与北美欧洲大部分研究的新建水库甲基汞偏高的现象不同. 这也暗示三门峡水库水体没有发生显著的汞甲基化过程。

(3) 三门峡水库沉积物中总汞浓度均高于全国 A 层土壤和中国大陆沉积物汞平均浓度, 且明显高于其它未受污染地区水库沉积物总汞, 但低于贵州乌江流域水库中沉积物汞浓度, 与小浪底水库处于类似水平. 丰、枯水期甲基汞占总汞的比例分别为 0.35% 和 0.63% , 该比例与其他水体相比, 处于较低的水平, 可能是由于三门峡水库水体底层溶解氧浓度较高而沉积物中有机质浓度较低, 不利于无机汞甲基化过程的发生。

参考文献:

- [1] 李宏伟, 阎百兴, 徐治国, 等. 松花江水中总汞的时空分布研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 840-845.
Li H W, Yan B X, Xu Z G, et al. Spatial and temporal distribution of total mercury (T-Hg) in water of Songhua River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(5): 840-845.
- [2] 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.
- [3] 王雨春. 人为活动对流域生源要素生物地球化学行为影响的研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2003.
- [4] Sha Q Y, Zhang S L. A test of Hardy-Weinberg equilibrium in structured populations [J]. Genetic Epidemiology, 2011, **35**(7): 671-678.
- [5] Feng X B, Jiang H M, Qiu G L, et al. Geochemical processes of

- mercury in Wujiangdu and Dongfeng reservoirs, Guizhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 2970-2984.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 黄河三门峡水利枢纽志编纂委员会. 黄河三门峡水利枢纽志 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993.
- [9] 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.
- [10] 潘鲁生, 商立海, 冯新斌, 等. 乌江流域东风水库水体中不同形态汞的时空分布特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, **29**(3): 256-263.
Pan L S, Shang L H, Feng X B, *et al.* Spatial and temporal distribution of the different forms of mercury in the water of Dongfeng Reservoir, Guizhou Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, **29**(3): 256-263.
- [11] 陈春霄. 贵州乌江渡水库汞形态分布的初步研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Chen C X. The form and distribution study on Mercury in Guizhou Wujiangdu Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [12] 姚珩, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州洪家渡水库水体不同形态汞的分布特征[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 961-968.
Yao H, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Distribution of different mercury forms of Hongjiadu Reservoir from Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 961-968.
- [13] 白薇扬, 张成, 唐振亚, 等. 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
Bai W Y, Zhang C, Tang Z Y, *et al.* Seasonal variations in vertical profile of Hg species and the influential factors in Changshou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
- [14] 白薇扬, 冯新斌, 孙力, 等. 贵阳市阿哈湖水体和沉积物间隙水中汞的含量和形态分布初步研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(1): 91-98.
Bai W Y, Feng X B, Sun L, *et al.* The concentration and distribution of different mercury species in the water columns and sediment porewater of Aha Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(1): 91-98.
- [15] Nguyen H L, Leermakers M, Kurunzi S, *et al.* Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **340**(1-3): 231-246.
- [16] Leermakers M, Galletti S, De Galan S D, *et al.* Mercury in the Southern North Sea and Scheldt estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2001, **75**(3): 229-248.
- [17] Kotnik J, Horvat M, Fajon V, *et al.* Mercury in small freshwater lakes: a case study: Lake Velenje, Slovenia [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **134**(1-4): 317-337.
- [18] King J K, Harmon S M, Fu T T, *et al.* Mercury removal, methylmercury formation, and sulfate-reducing bacteria profiles in wetland mesocosms. [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(6): 859-870.
- [19] Schetagne R, Doyon J F, Fournier J J. Export of mercury downstream from reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **260**(1-3): 135-145.
- [20] Hall B D, St. Louis V L, Rolffhus K R, *et al.* Impacts of reservoir creation on the biogeochemical cycling of methyl mercury and total mercury in boreal upland forests [J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(3): 248-266.
- [21] 王起超, 马如龙. 煤及其灰渣中的汞[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 76-79.
Wang Q C, Ma R L. The mercury in coal and its cinder [J]. *China Environmental Science*, 1997, **17**(1): 76-79.
- [22] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, **23**(10): 1084-1090.
- [23] Bowles K C, Apte S C, Maher W A, *et al.* Mercury cycling in Lake Gordon and Lake Pedder, Tasmania (Australia). II: catchment processes [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **147**(1-4): 25-38.
- [24] 白薇扬, 冯新斌, 何天容, 等. 阿哈水库沉积物总汞及甲基汞分布特征[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 976-980.
Bai W Y, Feng X B, He T R, *et al.* Distribution patterns of total mercury and methylmercury in Aha Reservoir sediment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 976-980.
- [25] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响[D]. 贵阳: 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]. Guiyang: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Geochemistry), 2005.
- [26] Sunderland E M, Gobas P A C, Branfireun B A, *et al.* Environmental controls on the speciation and distribution of mercury in coastal sediments [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **102**(1-2): 111-123.
- [27] 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.
- [28] Lucotte M, Montgomery S, Bégin M. Mercury dynamics at the flooded soil-water interface in reservoirs of Northern Québec: in situ observations [A]. In: Lucotte M, Schetagne R, Thérien N, *et al.* (Eds.). *Mercury in the Biogeochemical Cycle: Natural Environments and Hydroelectric Reservoirs of Northern Québec (Canada)* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1999. 165-189.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)