

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5  
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 ..... 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)  
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 ..... 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)  
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 ..... 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)  
郑州-新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中元素浓度特征及其源分析 .....  
..... 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)  
我国PM<sub>2.5</sub>浓度分阶段改善目标情景分析 ..... 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)  
安阳市典型工业源PM<sub>2.5</sub>排放特征及减排潜力估算 ..... 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)  
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 ..... 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)  
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 ..... 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)  
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 ..... 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)  
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 ..... 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)  
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 ..... 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)  
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 .....  
..... 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)  
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 ..... 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)  
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 ..... 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)  
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 ..... 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)  
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)  
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 ..... 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)  
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 .....  
..... 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)  
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 ..... 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)  
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 ..... 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)  
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 ..... 李如忠,鲍琴,戴源(2178)  
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 ..... 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)  
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 .....  
..... 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)  
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 ..... 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)  
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 ..... 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)  
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 ..... 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)  
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 ..... 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)  
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 ..... 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)  
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 .....  
..... 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)  
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 ..... 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)  
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 ..... 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)  
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 ..... 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)  
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 ..... 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)  
UV降解水溶液中文拉法辛的影响因素及机制 ..... 吕娟,许志伟,王言(2278)  
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 ..... 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)  
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 ..... 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)  
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 ..... 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)  
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 .....  
..... 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)  
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 ..... 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)  
15°C SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 ..... 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)  
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 .....  
..... 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)  
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 ..... 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)  
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 ..... 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)  
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 .....  
..... 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)  
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 ..... 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)  
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 ..... 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)  
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 ..... 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)  
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 ..... 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)  
地膜覆盖和施氮对菜地CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)  
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 ..... 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)  
不同施肥模式对热区晚稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 .....  
..... 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)  
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 ..... 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)  
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 ..... 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)  
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 .....  
..... 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)  
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险 ..... 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)  
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 ..... 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)  
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 .....  
..... 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)  
《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

## 三峡水库支流汝溪河河口水体汞的时空变化特征

马尉斌<sup>1</sup>, 陈秋禹<sup>1</sup>, 尹德良<sup>1</sup>, 孙涛<sup>1</sup>, 王永敏<sup>1,2</sup>, 王定勇<sup>1,2\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

**摘要:** 为探究三峡水库水位调度过程中支流河口汞的变化特征, 选取三峡库区腹地地带的典型支流汝溪河河口为研究区域, 设置4个断面, 分别于蓄水期(9~10月)、淹没期(11~12月)、退水期(2~3月)及落干期(5~6月)这4个时期分层采集水样, 分析了水样中的总汞(THg)、颗粒态汞(PHg)、溶解态汞(DHg)、活性汞(RHg)、总甲基汞(TMeHg)及溶解态甲基汞(DMeHg)。结果表明, 汝溪河口区域THg和TMeHg的质量浓度与中国其它水库或天然水体相接近。不同深度水体中DHg和TMeHg的质量浓度存在显著性差别, 其原因是水体中的DHg和TMeHg可能来源于沉积物的再悬浮。对比同时期不同断面各形态汞质量浓度的差别, 发现蓄水期长江干流来水方向的不同将导致河口区域THg和PHg的质量浓度分布不均; 退水期河口水体中的颗粒物会吸附并携带大量的PHg, 导致水体中THg的质量浓度明显高于其它时期。水位较为稳定的淹没期和落干期TMeHg的质量浓度明显高于其它两个时期, 表明稳定的水位可能更有利于水体中甲基汞的积累, 而水体的剧烈扰动会明显降低水体中TMeHg的质量浓度。

**关键词:** 三峡库区; 支流河口; 汞; 汞形态; 分布特征

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2211-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810151

## Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area

MA Wei-bin<sup>1</sup>, CHEN Qiu-yu<sup>1</sup>, YIN De-liang<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, WANG Yong-min<sup>1,2</sup>, WANG Ding-yong<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Four typical estuaries located in the Ruxi River, a tributary of the Yangtze River, were selected to investigate the possibility of mercury pollution in tributary estuaries from the Three Gorges reservoir water storage. Water samples were collected during the water storage period (September to October), the flooding period (November to December), the water withdrawal period (February to March), and the drying period (May to June) to determine the levels of mercury species including total mercury (THg), particulate mercury (PHg), dissolved mercury (DHg), reactive mercury (RHg), total methylmercury (TMeHg) and dissolved methylmercury (DMeHg). The results showed that the concentration of THg and TMeHg in the estuary of the Ruxi River was comparable with that of other reservoirs or natural waters in China. There was a significant difference in the concentration of DHg and TMeHg in the water at different depths, because DHg and TMeHg might be derived from the release of sediment to the overlying water. Comparing the concentrations of different mercury species in the four estuaries during the same period, it was found that the difference of water flow direction during the water storage period could lead to an uneven concentration distribution of THg and PHg in the estuary areas. During the water withdrawal period, the particles in the estuary water could adsorb and carry a large amount of PHg, resulting in higher THg concentration in the water in comparison with other periods. The concentration of TMeHg in the flooding and the drying periods was higher than in the other two periods, indicating that the stable water level might be conducive to the accumulation of methylmercury in the water, and the severe disturbance of the water level could significantly reduce the concentration of TMeHg in the water.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; tributary estuary; mercury; mercury species; distribution characteristics

自从汞(Hg)被公认为“全球性污染物”, 其迁移转化及地球生物化学循环一直是研究的热点<sup>[1]</sup>。在水环境中, 无机汞容易转化成生物毒性更强的甲基汞(MeHg), 并进一步随食物链富集放大<sup>[2]</sup>, 对水生生态系统及人类健康构成潜在威胁。

水库蓄水后, 水体流速减缓, 水体的初级生产力提高, 使得水库生态系统较自然湖泊更容易受到破坏<sup>[3,4]</sup>。大量研究表明, 稳定的水库环境有利于汞活化、甲基化和生物积累<sup>[5-16]</sup>。三峡水库是目前我国最大的水库, 支流数量多, 在全长约650 km的库区干流中, 包含有流域面积大于100 km<sup>2</sup>的支流40多条<sup>[17]</sup>。三峡水库水位抬升后, 在干流回水顶

托的影响下, 支流汇入干流的河口区域形成了特殊的库湾回水区。河流交汇带来的大量悬浮颗粒物, 成为水体中汞和甲基汞的重要载体<sup>[18,19]</sup>。颗粒物对Hg<sup>2+</sup>和甲基汞的吸附, 是水体环境中汞迁移转化的一个重要归趋<sup>[20]</sup>。在三峡库区的落干期, 随着水位下降, 支流河水汇入长江, 这种周期性倒灌的河口汇水方式, 可能为汞在水体中的迁移转化提供有利条件<sup>[21]</sup>。

收稿日期: 2018-10-21; 修订日期: 2018-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877384, 41603103)

作者简介: 马尉斌(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 1510320520@qq.com

\* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

本文选取三峡库区腹心地带的支流汝溪河的河口为研究区域,在一个蓄水周期内对河口水体中汞的质量浓度及其分布特征进行调查分析,通过探明河口水体中汞的迁移转化规律,以期为全面认识三峡库区汞的地球化学循环提供相关数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

汝溪河发源于重庆市万州区分水镇三角凼,经忠县汝溪镇,由忠县涂井乡汇入长江. 全流域面积  $720 \text{ km}^2$ ,主河道长  $54.5 \text{ km}$ ,多年平均径流总量达  $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ [22]. 在每年三峡蓄水至  $175 \text{ m}$  水位时,长江干流河水倒灌入汝溪河,淹没至涂井乡,形成  $15 \text{ km}^2$  的河口淹没区[23].

### 1.2 样品采集

选取汝溪河龙滩大桥至汝溪河入河口之间为研究区域,取 A、B、C、D 这 4 个具有代表性的断面采集水样(图 1). 于 2016 年 9 月至 2017 年 6 月,分蓄水期(9~10 月)、淹没期(11~12 月)、退水期(2~3 月)及落干期(5~6 月)这 4 个时期分层采样.

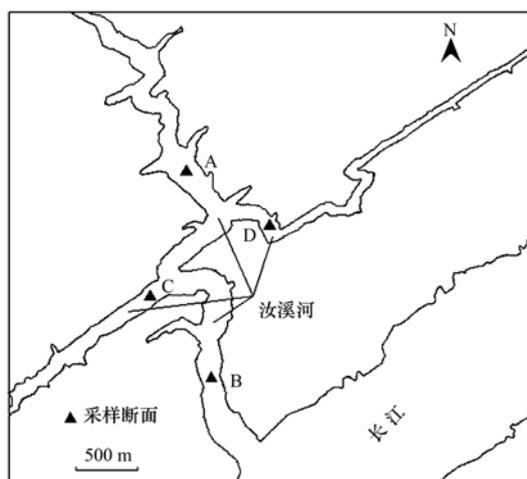


图 1 研究区域及采样断面示意

Fig. 1 Study area and water sampling sites

按照《水质采样技术指导(HJ 494-2009)》的规定,将采样器置于采样船的上游采集水样. 取部分水样现场过滤(滤膜孔径  $0.45 \mu\text{m}$ , Millipore, 美国),用以测定溶解态汞(DHg). 水样盛放于经过洁净处理的  $400 \text{ mL}$  硼硅玻璃瓶中,并加入  $0.4\%$  (体积分数)的经亚沸蒸馏处理的盐酸,密封后冷藏带回实验室测定.

### 1.3 样品分析

水样中的总汞(THg)和溶解态汞(DHg)在经 BrCl 氧化后,加入  $\text{SnCl}_2$  还原,采用二次汞齐-冷蒸

气原子荧光法(CVAFS)测定[24],加入  $10 \text{ mL}$  水样的最低检出限为  $0.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 颗粒态汞(PHg)的质量浓度为 THg 与 DHg 的差值. 活性汞(RHg)指能被  $\text{SnCl}_2$  还原的  $\text{Hg}^{2+}$ ,无需 BrCl 氧化,加入  $\text{SnCl}_2$  还原后采用二次汞齐-CVAFS 测定. 总甲基汞(TMeHg)和溶解态甲基汞(DMeHg)采用蒸馏乙基化结合 GC-CVAFS 法测定(GC-CVAFS, BROOKS RAND MODEL III)[25],加入  $45 \text{ mL}$  水样的最低检出限为  $0.009 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.4 质量控制

为保证试验样品测定的精确性和准确性,在样品测定前,将样品测定所需气泡瓶等在马弗炉中  $450^\circ\text{C}$  高温灼烧  $30 \text{ min}$  以上. 测定过程中,采用空白样品、平行样品和样品加标回收等进行质量控制. THg 的加标回收率在  $93\% \sim 105\%$  之间,样品重复测定相对标准偏差(RSD)  $< 5\%$ , MeHg 样品的加标回收率在  $90\% \sim 120\%$  之间,  $\text{RSD} < 8\%$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 汞的形态分布特征

对汝溪河河口为期一年 4 个时段采集的样品进行分析,结果如图 2 所示. THg 的质量浓度变化范围为  $0.51 \sim 9.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(2.67 \pm 1.56) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . DHg 的质量浓度为  $0.08 \sim 1.59 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(0.76 \pm 0.30) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . PHg 的质量浓度变化范围为  $0.02 \sim 8.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(1.92 \pm 1.55) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . RHg 的质量浓度变化范围为  $0.02 \sim 1.15 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(0.21 \pm 0.15) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . TMeHg 的质量浓度为  $0.04 \sim 1.89 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(0.33 \pm 0.23) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . DMeHg 的质量浓度为  $\text{ND} \sim 0.61 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $(0.08 \pm 0.08) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .

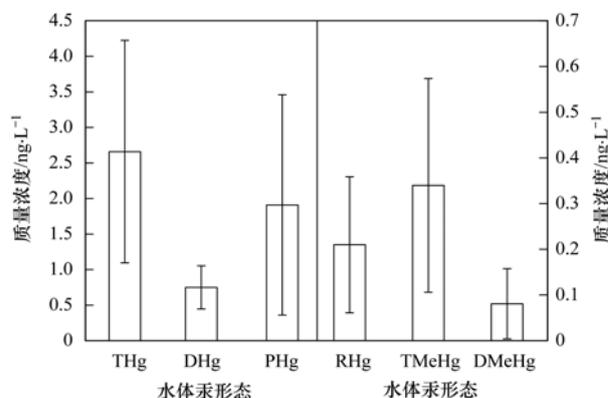


图 2 水体各形态汞的质量浓度

Fig. 2 Concentration of mercury species in water

一般认为在未污染的自然淡水中 THg 的质量浓度低于  $5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [26],而在一些有机物或颗粒物的质量浓度较高的水体中,THg 的质量浓度可能达到

$10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 因此, 汝溪河河口的 THg 均值处于较低的水平, 最大值的出现可能与水体中颗粒物的质量浓度升高有关<sup>[28,29]</sup>. 将汝溪河河口 THg 的质量浓度与中国其它天然水体的结果比较可知(表 1), 汝溪河河口水体中 THg 略高于乌江渡水库和雅鲁藏布江, 与三门峡水库中 THg 的质量浓度相

近. 而汝溪河河口 THg 的质量浓度明显低于长江典型消落带水体, 其原因是汝溪河水体 THg 的质量浓度低于长江干流, 在河口与倒灌的长江水混合之后, 对长江干流中的 THg 的质量浓度起到了一定的稀释作用. 汝溪河河口水体中 RHg、TMeHg 及 DMeHg 的质量浓度与其它天然水体相近.

表 1 汝溪河河口水体中不同形态汞的质量浓度与其它天然水体的比较/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Comparison of mercury species concentration in the estuary of the Ruxi River and other natural aquatic systems/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

地点	THg	DHg	PHg	RHg	TMeHg	DMeHg	文献
汝溪河河口	0.51 ~ 9.10	0.08 ~ 1.91	0.02 ~ 8.79	0.02 ~ 1.15	0.04 ~ 1.89	ND ~ 0.61	本研究
长江典型消落带水体	1.71 ~ 39.94	0.51 ~ 24.42	0.13 ~ 29.18	0.03 ~ 0.98	0.01 ~ 0.99	0.01 ~ 0.84	[30]
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	[31]
乌江渡水库	0.44 ~ 3.13	0.42 ~ 2.01	0.01 ~ 1.17	0.04 ~ 0.62	0.06 ~ 2.42	0.03 ~ 1.44	[32]
雅鲁藏布江	1.46 ~ 4.99			0.10 ~ 0.36	0.06 ~ 0.29		[33]

ND: 未检出

## 2.2 汞的空间分布特征

整个采样周期内, A、B、C、D 这 4 个断面各形态汞的质量浓度如图 3 所示, 4 个断面的 THg、DHg、PHg、RHg、TMeHg 和 DMeHg 的质量浓度均不具有显著性差异, 说明河口水体空间混合均匀, 因此 4 个断面各形态汞的质量浓度的均值可以代表整个河口各形态汞的变化情况.

根据河口水深将水体样本分为表层(0 ~ 10 m)、中层(10 ~ 20 m)和底层(20 m 以上), 见图 4,

并以此进行独立样本 *T* 检验, 结果表明 THg、PHg、RHg 和 DMeHg 的质量浓度在表层、中层和底层水体之间均不具有显著性差异( $P > 0.05$ ), 而表层与底层、中层与底层水体中 DHg 及 TMeHg 的质量浓度差异较明显( $P < 0.05$ ). 表层、中层和底层的 DHg 的质量浓度分别为  $(0.67 \pm 0.31)$ 、 $(0.76 \pm 0.31)$  和  $(0.86 \pm 0.26) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , DHg 的质量浓度随水深的增加而升高, 这可能是因为沉积物受水位变化的影响, 不断地向上覆水释放 DHg.

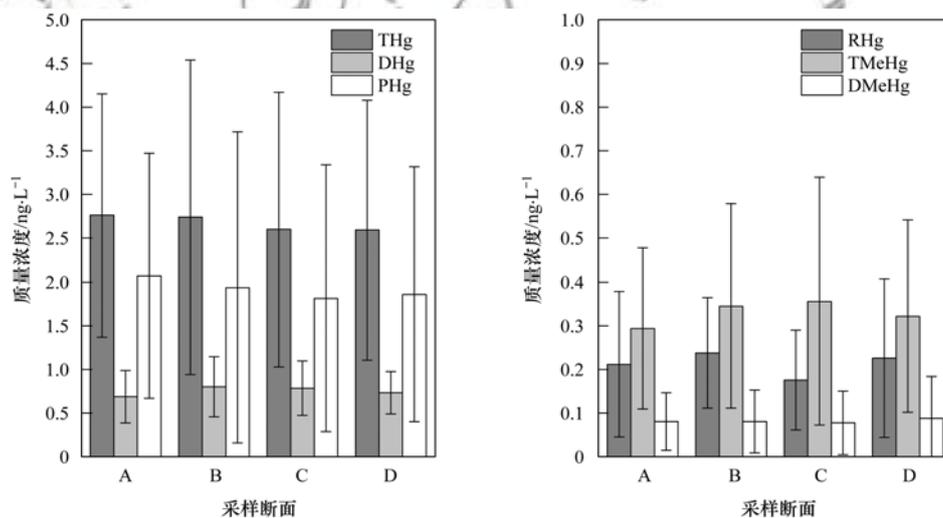


图 3 不同断面水体中各形态汞的质量浓度

Fig. 3 Concentration of mercury species in different estuaries

TMeHg 在水体表层、中层和底层的质量浓度分别为  $(0.28 \pm 0.21)$ 、 $(0.31 \pm 0.20)$  和  $(0.40 \pm 0.27) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ . 通过计算颗粒态甲基汞与总甲基汞的比值 ( $\text{PMeHg}/\text{TMeHg}$ ), 发现表层水中  $\text{PMeHg}/\text{TMeHg}$  为 59.8%, 中层水为 64.8%, 而底层水达到了 76.2%, 说明河口水体甲基汞主要以颗粒态甲基汞的形式存在, TMeHg 的质量浓度主要受颗粒态

甲基汞质量浓度变化的影响. 水体从表层到底层,  $\text{PMeHg}$  的质量浓度不断增大, 可能是由于沉积物颗粒物的再悬浮<sup>[34]</sup>, 或是水位稳定期上层水体中  $\text{PMeHg}$  的沉降<sup>[35]</sup>.

## 2.3 不同形态汞的时间分布特征

按照河口水位涨落, 将采样周期分为蓄水期(9 ~ 10 月)、淹没期(11 ~ 12 月)、退水期(2 ~ 3 月)、

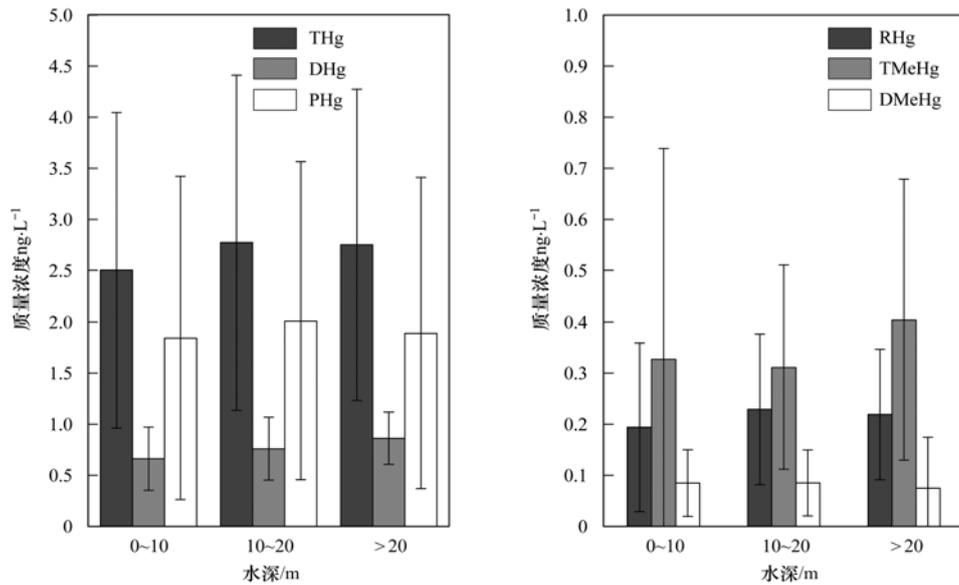


图4 不同深度水体中各种形态汞的质量浓度

Fig. 4 Concentration of mercury species at different depths

落干期(5~6月)这4个时期(图5、6).

### 2.3.1 同一时期不同断面水体汞的分布特征

在蓄水期内, A、B、D这3个断面水体 THg、DHg、PHg、RHg、TMeHg 和 DMeHg 的质量浓度均不具有显著性差异, 而 A、C 这2个断面的 THg 的均值分别为  $(3.29 \pm 1.32) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(2.03 \pm 1.15) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , PHg 的均值分别为  $(2.53 \pm 1.30) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(1.26 \pm 0.97) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 分别对 A、C 这2个断面的 THg、DHg 和 RHg 做相关分析表明, A 断面中 THg 与 DHg 和 RHg 均无显著相关性 ( $P > 0.05$ ), 与 PHg 极显著相关 ( $R = 0.973, P < 0.01$ ), 而 C 断面中 THg 不仅与 PHg 极显著相关 ( $R = 0.937, P < 0.01$ ), 还与 DHg ( $R = 0.583, P < 0.05$ ) 和 RHg ( $R = 0.783, P < 0.01$ ) 均存在显著相关性, 说明在蓄水期时, A 断面 THg 的质量浓度主要与 PHg 有关, 而 C 断面的 THg 除了受 PHg 影响外, 还与水中 DHg 和 RHg 有关. 这主要是由于这4个断面所处的区域不同, 在蓄水期内, 长江干流倒灌的水流方向偏向于 A、B、D 这3个断面所处河口区域, 从而携带大量的颗粒物进入河口水体, 而 C 断面位于河口的回流区, 其涨水时间晚于其它断面, 因此 C 断面的变化相对于其余断面较为平缓, 且 C 断面的倒灌河水可能是其余断面与长江干流混合均匀后的河水, 因此在蓄水期内 A 断面的 THg 变化受 PHg 的影响较大, 而 C 断面的 THg 变化除受 PHg 的影响外, 还有混合均匀的河水中的 DHg 和 RHg 的影响. 因此河口的淹没期, 汝溪河的河口水与长江干流的来水完全混合均匀后, 这4个断面各形态的汞均不具有显著性

差异.

在河口退水期, A、B 断面 DHg 的质量浓度分别为  $(0.66 \pm 0.23) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(0.90 \pm 0.22) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 4个断面中, 由于 B 断面距离长江干流最近, 而河口的交汇方式是汝溪河水从底部进入长江干流, 干流水体从中上层汇入, 因此在河口垂直方向上形成涡旋. 涡旋形成后, 由于长江干流 DHg 的质量浓度明显高于汝溪河河口区域(表1), 与长江干流混合的河水导致距离长江较近的区域 DHg 质量浓度的升高. A、C、D 这3个断面 TMeHg 的质量浓度分别为  $(0.26 \pm 0.06)$ 、 $(0.34 \pm 0.11)$  和  $(0.24 \pm 0.10) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , A、D 断面 TMeHg 的质量浓度分别与 C 断面的质量浓度存在明显的差别. 在蓄水期和淹没期, C 断面 THg 的质量浓度变化较为平缓, 使得 C 断面水体更有利于汞的甲基化, 而 A、D 断面由于蓄水期和淹没期 THg 和 PHg 的质量浓度变化较大, 不利于汞的甲基化, 因此 C 断面 TMeHg 在退水期仍高于 A、D 断面.

通过分析汝溪河河口落干期4个采样断面各形态汞的差异, 发现 A 断面与 B、C、D 这3个断面的 DHg 都存在显著性差异, A、B、C、D 这4个断面 DHg 的质量浓度分别为  $(0.44 \pm 0.17)$ 、 $(0.71 \pm 0.19)$ 、 $(0.75 \pm 0.21)$  和  $(0.85 \pm 0.27) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ . 这可能是因为 A 断面河水主要来源于汝溪河, 河水在汇入长江的过程中, 不断稀释 A 断面水体中的 DHg, 汝溪河与长江干流的交汇产生的涡旋导致 B 断面 DHg 升高. 而 C、D 这2个断面在落干期内的河口流量较小, 在 A 断面来水的冲击下形成的回水

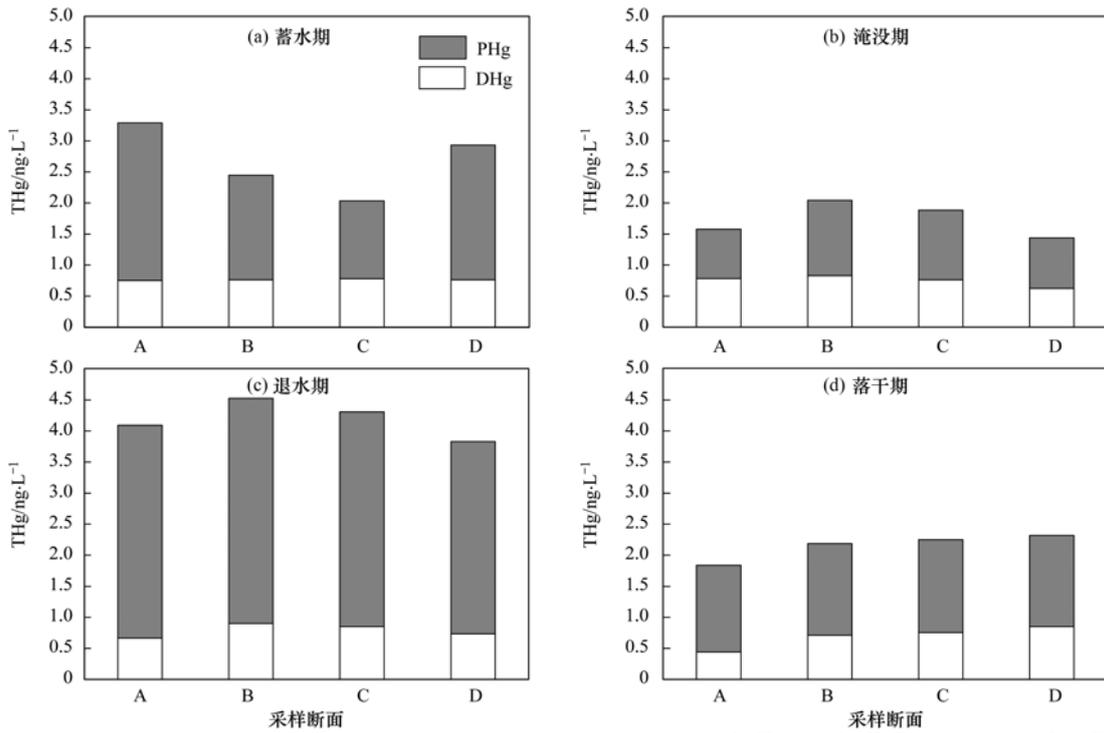


图 5 不同时期各采样断面 THg、DHg 和 PHg 的质量浓度  
 Fig. 5 Concentration of THg, DHg, and PHg of each estuary in different periods

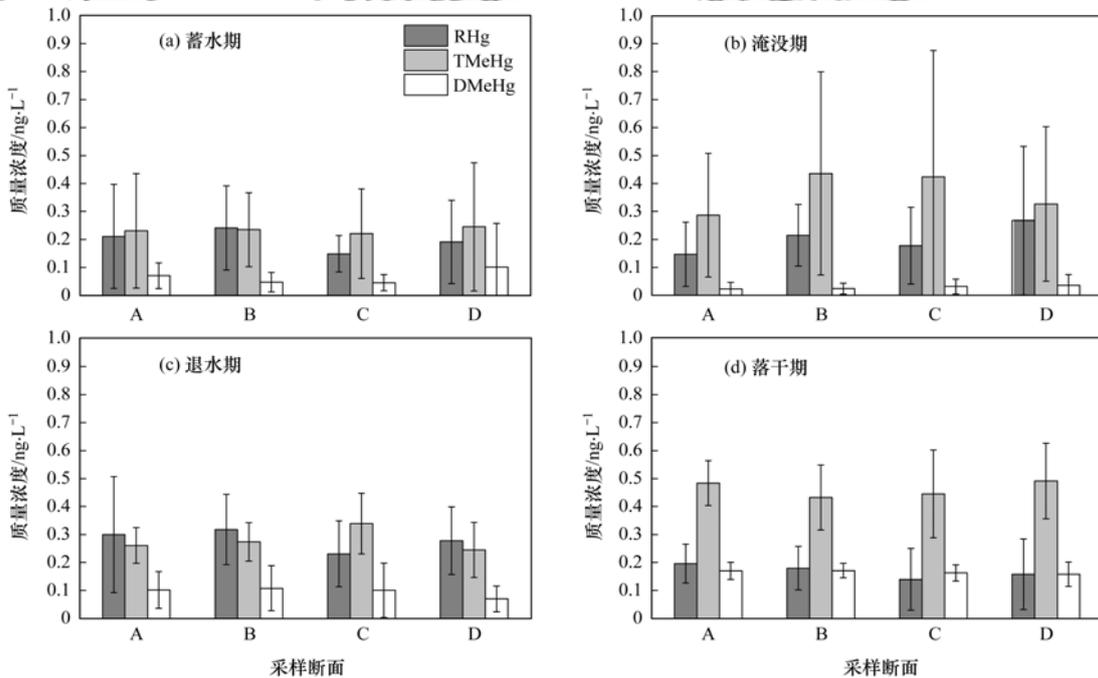


图 6 不同时期各采样断面 RHg、TMeHg 和 DMeHg 的质量浓度  
 Fig. 6 Concentration of RHg, TMeHg, and DMeHg of each estuary in different periods

区，产生了 DHg 的积累。

### 2.3.2 不同时期各形态汞的分布特征

对比蓄水期和淹没期 THg、PHg、DHg 和 RHg 的质量浓度变化，蓄水期河口区域的 THg 和 PHg 均值为  $(2.62 \pm 1.52) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(1.92 \pm 1.42) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ，淹没期的 THg 和 PHg 均值仅为  $(1.60 \pm 1.12) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(1.00 \pm 1.22) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ，存在显著性

差异 ( $P < 0.05$ )，但这 2 个时期内河口水体中 DHg、RHg 的质量浓度不具有显著性差异 ( $P > 0.05$ )，说明这 2 个时期 THg 的变化是由于 PHg 的质量浓度增加所导致的，而 PHg 主要是来源于长江干流河水倒灌带来的大量悬浮颗粒物。河口水体的 PHg 在淹没期内随颗粒物沉降，导致淹没期内 THg 的质量浓度明显低于蓄水期。

蓄水期 TMeHg 和 DMeHg 的质量浓度分别为  $(0.23 \pm 0.18) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(0.066 \pm 0.084) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但淹没期 TMeHg 的质量浓度却达到  $(0.37 \pm 0.34) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , DMeHg 仅为  $(0.029 \pm 0.027) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 两个时期均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ). 这可能是因为

蓄水期内, 长江干流水体中 TMeHg 的质量浓度较低(表 1), 对汝溪河河口区域的 TMeHg 起到了稀释作用; 而淹没期的水体相对稳定, 为水体及底泥中汞的甲基化提供有利条件, 导致这一时期水体中 TMeHg 质量浓度高于蓄水期.

表 2 不同时期各形态汞的质量浓度/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Concentration of mercury species in different periods/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

时期	THg	DHg	PHg	RHg	TMeHg	DMeHg
蓄水期	$2.68 \pm 1.52$	$0.76 \pm 0.35$	$1.92 \pm 1.41$	$0.20 \pm 0.15$	$0.23 \pm 0.18$	$0.066 \pm 0.084$
淹没期	$1.74 \pm 1.16$	$0.75 \pm 0.34$	$1.00 \pm 1.23$	$0.20 \pm 0.17$	$0.37 \pm 0.34$	$0.029 \pm 0.027$
退水期	$4.19 \pm 1.43$	$0.79 \pm 0.24$	$3.41 \pm 1.46$	$0.28 \pm 0.15$	$0.28 \pm 0.09$	$0.096 \pm 0.075$
落干期	$2.17 \pm 0.64$	$0.71 \pm 0.25$	$1.47 \pm 0.67$	$0.17 \pm 0.10$	$0.46 \pm 0.13$	$0.17 \pm 0.032$

水位下降的退水期, 汝溪河水从底部汇入长江干流, 因此河口沉积物中大量的颗粒物随之进入长江干流, 而这一过程也导致退水期 THg 和 PHg 的质量浓度远远高于其它 3 个时期. 这一时期同样存在较为剧烈的水位变化, 使水体中的 TMeHg 被汝溪河水稀释, TMeHg 及 DMeHg 的质量浓度与蓄水期相近, 而与淹没期和落干期存在显著性差异.

河口水退去后的落干期, 水体中 THg、PHg 的质量浓度与淹没期相接近, 显著低于蓄水期和退水期. 在河口水位相对稳定的时期, THg 和 PHg 的质量浓度因水体中颗粒物的自由沉降而降低, 当河口水位变化时, 水体的扰动引起底泥再悬浮, 带来大量的悬浮颗粒物使得水体中的 THg 和 PHg 随之升高. 河口 TMeHg 在水位稳定的淹没期和落干期明显高于水位剧烈波动的蓄水期和退水期, 可能是因为稳定的水体对 MeHg 稀释能力较弱, 蓄水期或退水期的水体扰动都会对河口水体中 MeHg 起到一定的稀释作用, 即水位波动不利于水体中 MeHg 的积累. 同时剧烈的水体扰动不仅会破坏底泥的微生物群落结构, 还会增加水中溶解氧的浓度, 不利于水体中汞的生物甲基化<sup>[36~38]</sup>.

4 个时期内的 DHg 和 RHg 的变化均不具有显著性差异, 说明这 4 个时期内河口水体中的 DHg 和 THg 可能处于吸附溶解平衡状态, 即汝溪河河口水体中 THg 的质量浓度变化主要受 PHg 的影响, 而季节性的水位变化带来的泥沙冲击是汝溪河河口水体 THg 产生周期性变化的主要原因.

### 3 结论

(1) 河口不同断面 THg 和 PHg 的质量浓度在三峡库区蓄水期表现出显著的差异性, 而在稳定期不存在显著性差异. 在退水期, 距离长江干流的远近会影响河口区域 DHg 的质量浓度, 靠近干流处 DHg 的质量浓度高于远离干流区域. 在落干期, 汝

溪河水汇入长江干流形成的回流区, 使得回流区 DHg 的质量浓度与靠近长江干流的河口浓度相近, 且明显低于远离长江干流的河口.

(2) 周期性的水位扰动会影响河口水体中 THg 和 TMeHg 质量浓度的变化, 主要表现在蓄水和退水两个时期, 水体扰动带来的大量颗粒物会增加 PHg 的质量浓度, 这是河口水体中 THg 升高的原因. 但水体的剧烈扰动会明显降低 TMeHg 的质量浓度, 说明稳定的水位更有利于水体甲基汞的积累.

### 参考文献:

- [1] Evers D C, Keane S E, Basu N, *et al.* Evaluating the effectiveness of the minamata convention on mercury: Principles and recommendations for next steps [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 888-903.
- [2] Guimarães J R D, Meili M, Malm O, *et al.* Hg methylation in sediments and floating meadows of a tropical lake in the Pantanal floodplain, Brazil [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **213**(1-3): 165-175.
- [3] 黄秀山. 三峡库区水污染及其治理对策 [J]. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 2002, **25**(6): 155-158.  
Huang X S. Water pollution and counter-measures in the Three Gorges Dam Area [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(6): 155-158.
- [4] 张晟. 三峡库区水体中营养盐与浮游生物量分布特征 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.  
Zhang S. Distribution of nutrient and plankton mass in Three Gorges Reservoir water body [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005.
- [5] Montgomery S, Lucotte M, Pichet P, *et al.* Total dissolved mercury in the water column of several natural and artificial aquatic systems of Northern Quebec (Canada) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(11): 2483-2492.
- [6] Pestana I A, Bastos W R, Almeida M G, *et al.* Spatial-temporal dynamics and sources of total Hg in a hydroelectric reservoir in the Western Amazon, Brazil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(10): 9640-9648.
- [7] Noh S, Kim C K, Kim Y, *et al.* Assessing correlations between monomethylmercury accumulation in fish and trophic states of artificial temperate reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 912-919.

- [ 8 ] Cossa D, Gobeil C. Mercury speciation in the lower St. Lawrence Estuary [ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, **57**(S1): 138-147.
- [ 9 ] Bowles K C, Apte S C, Maher W A, *et al.* Mercury cycling in lake Gordon and lake Pedder, Tasmania (Australia). I: In-lake processes [ J ]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **147**(1-4): 3-23.
- [ 10 ] Bodaly R A, St Louis V L, Paterson M J, *et al.* Bioaccumulation of mercury in the aquatic food chain in newly flooded areas [ J ]. Metal Ions in Biological Systems, 1997, **34**: 259-278.
- [ 11 ] Wei X, Han L F, Gao B, *et al.* Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir; the impact of water impoundment [ J ]. Ecological Indicators, 2016, **61**: 667-675.
- [ 12 ] Bilodeau F, Therrien J, Schetagne R. Intensity and duration of effects of impoundment on mercury levels in fishes of hydroelectric reservoirs in northern Québec (Canada) [ J ]. Inland Waters, 2017, **7**(4): 493-503.
- [ 13 ] 邓龙. 浮游植物对汞和甲基汞的富集特征研究 [ D ]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.  
Deng L. Enrichment features of mercury and methylmercury in Phytoplankton [ D ]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [ 14 ] Moye H A, Miles C J, Philips E J, *et al.* Kinetics and uptake mechanisms for monomethylmercury between freshwater algae and water [ J ]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(16): 3550-3555.
- [ 15 ] Luengen A C, Flegal A R. Role of phytoplankton in mercury cycling in the San Francisco Bay estuary [ J ]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(1): 23-40.
- [ 16 ] 龙胜兴, 何天容, 陈椽, 等. 高原水库富营养水体浮游动物对汞的富集特征 [ J ]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 263-270.  
Long S X, He T R, Chen C, *et al.* Characteristic of Hg accumulation by zooplankton in plateau eutrophic reservoir [ J ]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 263-270.
- [ 17 ] 李锦秀, 禹雪中, 幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究 [ J ]. 水科学进展, 2005, **16**(6): 777-783.  
Li J X, Yu X Z, Xin Z G. Eutrophication model for the branch of Three-Gorges Reservoir [ J ]. Advances in Water Science, 2005, **16**(6): 777-783.
- [ 18 ] Bravo A G, Bouchet S, Tolu J, *et al.* Molecular composition of organic matter controls methylmercury formation in boreal lakes [ J ]. Nature Communications, 2017, **8**: 14255.
- [ 19 ] Cossa D, Sanjuan J, Noel J. Mercury transport in waters of the Strait of Dover [ J ]. Marine Pollution Bulletin, 1994, **28**(6): 385-388.
- [ 20 ] Akagi H, Malm O, Kinjo Y, *et al.* Methylmercury pollution in the Amazon, Brazil [ J ]. Science of the Total Environment, 1995, **175**(2): 85-95.
- [ 21 ] 高建华, 李军, 王珍岩, 等. 鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属分布的影响因素分析 [ J ]. 地球化学, 2008, **37**(5): 430-438.  
Gao J H, Li J, Wang Z Y, *et al.* Heavy metal distribution and their influence factors in sediments of Yalu River Estuary and its adjacent sea area [ J ]. Geochimica, 2008, **37**(5): 430-438.
- [ 22 ] 李仁芳, 张信伟. 忠县汝溪河流域水质现状调查 [ J ]. 三峡环境与生态, 2011, **33**(2): 10-12.  
Li R F, Zhang X W. Investigation on water quality of the Ruxi River in Zhong County of Chongqing Municipality [ J ]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2011, **33**(2): 10-12.
- [ 23 ] 李楚娟, 张金洋, 王定勇, 等. 三峡库区典型消落区土壤氮磷的动态变化特征 [ J ]. 环境化学, 2014, **33**(12): 2169-2175.  
Li C X, Zhang J Y, Wang D Y, *et al.* Dynamic variations of nitrogen and phosphorous of the soil in hydro-fluctuation of Three Gorges Reservoir [ J ]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(12): 2169-2175.
- [ 24 ] 阎海鱼, 冯新斌, 商立海, 等. 天然水体中痕量汞的形态分析方法研究 [ J ]. 分析测试学报, 2003, **22**(5): 10-13.  
Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* Speciation analysis of ultra trace levels of mercury in natural waters [ J ]. Journal of Instrumental Analysis, 2003, **22**(5): 10-13.
- [ 25 ] 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 methylmercury in waters by distillation-GC-CVAFS technique [ J ]. China Environmental Science, 2004, **24**(5): 568-571.
- [ 26 ] Bloom N. Determination of picogram levels of methylmercury by aqueous phase ethylation, followed by cryogenic gas chromatography with cold vapour atomic fluorescence detection [ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, **46**(7): 1131-1140.
- [ 27 ] Mason R P, Sullivan K A. Mercury and methylmercury transport through an urban watershed [ J ]. Water Research, 1998, **32**(2): 321-330.
- [ 28 ] 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 等. 河口近岸水体中颗粒态重金属的潮周期变化 [ J ]. 环境科学, 2006, **27**(1): 132-136.  
Bi C J, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Variation of particulate heavy metals in coastal water over the course of tidal cycle in estuary [ J ]. Environmental Science, 2006, **27**(1): 132-136.
- [ 29 ] 赵健, 毕春娟, 陈振楼, 等. 动力和盐度影响下长江口近岸沉积物中汞的再悬浮行为 [ J ]. 中国科学: 化学, 2011, **41**(1): 105-116.  
Zhao J, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Effect of dynamic and salinity conditions on activities of Hg during sediment resuspension event in the Yangtze Estuary [ J ]. Scientia Sinica Chimica, 2011, **41**(1): 105-116.
- [ 30 ] 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.  
Li P. Distribution characteristics of mercury in water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir [ D ]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [ 31 ] 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 等. 三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 [ J ]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5032-5038.  
Cheng L, Ma B J, Zhou W L, *et al.* Distribution of different mercury species in the waterbody at Sanmenxia Reservoir [ J ]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5032-5038.
- [ 32 ] 孟博, 冯新斌, 陈春宵, 等. 乌江流域不同营养水平水库水体中汞的含量和形态分布 [ J ]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 951-960  
Meng B, Feng X B, Chen C X, *et al.* Distribution of total mercury and methylmercury in two hydroelectric reservoirs of Guizhou Province, China [ J ]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(5): 951-960.
- [ 33 ] 郑伟, 康世昌, 冯新斌, 等. 西藏雅鲁藏布江表层水中汞的形态与空间分布特征 [ J ]. 科学通报, 2010, **55**(20): 2026-2032.  
Zheng W, Kang S C, Feng X B, *et al.* Mercury speciation and spatial distribution in surface waters of the Yarlung Zangbo River, Tibet [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(24): 2697-2703.

- [34] Furutani A, Rudd J W M. Measurement of mercury methylation in lake water and sediment samples [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, **40**(4): 770-776.
- [35] 何天容, 冯新斌, 李仲根, 等. 季节性缺氧水库甲基汞的产生及其对下游水体的影响[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(6): 565-571.  
He T R, Feng X B, Li Z G, *et al.* Buildup of methyl mercury in a seasonal anoxic reservoir and impact on downstream [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(6): 565-571.
- [36] 钱晓莉, 冯新斌, 闭向阳. 水质参数对草海湖泊表层水体汞甲基化影响研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, **31**(11): 67-71.  
Qian X L, Feng X B, Bi X Y. Effect of water quality parameters on mercury methylation in the surface waters of Caohai Lake[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009, **31**(11): 67-71.
- [37] 梁小兵. 汞甲基化细菌研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(3): 755-761.  
Liang X B. Mercury methylation bacteria and methyl mercury producing: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(3): 755-761.
- [38] 王欣悦, 贺春风, 孙荣国, 等. 三峡库区消落带土壤淹水过程中汞的释放及甲基化特征[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 172-177.  
Wang X Y, He C F, Sun R G, *et al.* Releases and methylation of soil mercury in water-level fluctuating zone of the three gorges reservoir region[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 172-177.

环 境 科 学

## CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)