

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 ..... 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM<sub>2.5</sub> 碳组分来源分析 ..... 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 ..... 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 ..... 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 ..... 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 ..... 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 ..... 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 ..... 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 ..... 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化和季节变化 ..... 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 ..... 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 排放特征 ..... 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 ..... 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 ..... 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 ..... 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 ..... 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 ..... 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 ..... 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 ..... 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 ..... 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 ..... 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 ..... 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 ..... 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 ..... 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 ..... 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 ..... 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 ..... 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 ..... 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 ..... 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 ..... 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 ..... 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 ..... 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 ..... 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 ..... 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 ..... 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 ..... 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 ..... 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 ..... 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 ..... 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 ..... 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 ..... 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 ..... 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 ..... 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 ..... 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 ..... 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 ..... 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 ..... 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 ..... 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 ..... 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 ..... 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 ..... 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 ..... 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 ..... 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 ..... 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 ..... 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

# 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价

张成<sup>1,2</sup>, 陈宏<sup>1,2</sup>, 王定勇<sup>1,2\*</sup>, 孙荣国<sup>1</sup>, 张金洋<sup>1</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 400715)

**摘要:** 为了解三峡库区消落带土壤中汞污染现状和环境风险, 选择重庆 14 个区县的消落带, 采集了 192 个土壤样品, 分析其土壤总汞和汞形态分布, 探讨其生物可利用性, 对比研究和评估土壤总汞与汞赋存形态的污染水平和生态风险. 结果表明, 三峡库区消落带土壤中汞含量差异较大, 土壤汞含量为 22.4 ~ 393.5  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(84.2 \pm 54.3) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 76.6% 的采样点土壤汞含量超过了三峡库区土壤汞背景值. 土壤中的汞以残留态为主, 不同汞形态所占比例为: 水溶态汞 4.1%、酸溶态 15.5%、碱溶态汞 18.3%、过氧化氢溶态汞 10.9%、残留态汞 51.3%. 各区县土壤中生物可利用性汞(水溶态汞、酸溶态汞与碱溶态汞之和)平均含量为 19.7 ~ 36.6  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 生物可利用态汞占总汞的比例达到 22.1% ~ 51.6%. 地累积指数和潜在生态危害指数评价结果均表明, 三峡库区消落带土壤中汞赋存形态的污染水平和生态风险都较低, 由生物可利用态汞带来的生态风险也很小; 而对土壤总汞含量评价的结果明显偏大. 因此, 采用汞赋存形态进行污染现状和生态危害评价更能反映消落带土壤汞的环境风险.

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 汞形态; 风险评价; 土壤

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1060-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.034

## Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir

ZHANG Cheng<sup>1,2</sup>, CHEN Hong<sup>1,2</sup>, WANG Ding-yong<sup>1,2</sup>, SUN Rong-guo<sup>1</sup>, ZHANG Jin-yang<sup>1</sup>

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

**Abstract:** To investigate pollution level and ecological risk of mercury in soils of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir Region, 192 surface soil samples from 14 counties (districts) in Chongqing were obtained. Concentrations of THg and Hg species, bioavailable Hg were analyzed and discussed. Geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) and Hakanson potential ecological risk index ( $E_r$ ) were applied to assess the pollution status and potential ecological risk of THg and Hg species, respectively. The results showed that significant differences in the concentration of THg were found in soils of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir. The THg concentration ranged from 22.4 to 393.5  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with an average of  $(84.2 \pm 54.3) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 76.6% of the samples' THg content was higher than the soil background value in the Three Gorges Reservoir Region. The percentage of five mercury species (water-soluble Hg, HCl-soluble Hg, KOH-soluble Hg,  $\text{H}_2\text{O}_2$ -soluble Hg, residue Hg) in soils were 4.1%, 15.5%, 18.3%, 10.9%, 51.3%, respectively. The average concentrations of bioavailable mercury varied between 19.7-36.6  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and the percentage of bioavailable Hg was 22.1%-51.6% of THg. According to the geoaccumulation index, the soils were lightly polluted by Hg. Hakanson single potential ecological risk index evaluation showed that Hg species had a low potential ecological risk, moreover, soils of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir were at low ecological risk levels as evaluated by bioavailable Hg. While, the assessment results based on THg of soils was much higher than that based on the Hg species. Two methods of evaluation showed that the  $I_{geo}$  and  $E_r$  values calculated based on the Hg species better reflected the actual pollution levels of soils and its hazard to aquatic organisms.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; water-level-fluctuating zone; mercury species; risk assessment; soil

汞在水库生态系统中的环境行为、环境效应研究是评价汞环境风险的重要内容,也是国内外科学家高度关注的科学问题之一<sup>[1-6]</sup>. 水库消落带既是汞的汇,又是汞的源,汞在水库消落带中的环境效应日益受到关注<sup>[7-14]</sup>. 三峡水库是目前我国最大,也是举世瞩目的特大型年调节水库,自三峡水库蓄水以来,库区周围大量土壤和农田被淹没,逐渐形成了大面积的水库消落带. 三峡库区消落带土壤重金属

污染与防治已成为有关部门和学者重点关注的环境问题,有关三峡水库消落带土壤重金属含量及分布、污染现状与风险评价进行了较多研究,并取得了系

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2013-09-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41173116); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013C155)

作者简介: 张成(1980~),男,讲师,博士后,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: zhcheng@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

列成果<sup>[13-22]</sup>. 但目前关于三峡库区消落带土壤中汞的污染评价主要针对土壤中的总汞, 缺乏对汞的赋存形态进行风险评价, 特别是有关汞的生物可利用性的潜在风险研究还很少. 而土壤中汞的生态毒性与其存在形态密切相关, 汞的赋存形态不同, 其生态毒性和生物可利用性差异较大<sup>[23-25]</sup>, 采用汞的赋存形态进行风险评价对研究汞的污染现状更有现实意义. 因此, 本研究选择三峡库区重庆段的巴南、江北、涪陵、巫山等 14 个区县的消落带, 分析不同区县消落带土壤汞含量及其形态分布, 并采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对比探讨了土壤总汞和其赋存形态的污染现状和环境风险, 分析其生物可利用性及其潜在风险, 旨在为三峡库区消落带土壤重金属防治和库区生态环境保护提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点与样品采集

研究地点位于三峡库区重庆段(东经 106°50' ~ 110°50', 北纬 29°16' ~ 31°25'), 上起重庆主城区, 下至巫山县. 三峡库区属于亚热带季风气候, 年平均气温为 17.9℃, 年日照时间约 1 630 h, 无霜期年平均为 260 d 左右, 年降水量 1 000 ~ 1 800 mm. 三峡水库每年 9 月开始蓄水, 10 月底蓄水至正常水位高程 175 m, 次年 3 月开始退水, 5 月底降至防洪水位 145 m, 水库周围形成了垂直高度为 30 m, 面积超过 400 km<sup>2</sup> 的水库消落带. 根据三峡库区水位调度时间, 在 2009 ~ 2010 年水库退水期间的 5 ~ 8 月, 分别对巫山县、奉节县、云阳县、开县、万州区、石柱县、忠县、丰都县、涪陵区、长寿区、巴南区、南岸区、江北区、渝北区这 14 个区县的消落带地点进行混合采样. 采样点主要位于 155 ~ 175 m 高程, 部分采样点位于 145 ~ 155 m 高程, 每个采样点以 1 m × 1 m 为样方, 采集土壤表层 0 ~ 20 cm 混合土样. 在前期调查和采样的基础上, 于 2011 ~ 2012 年 6 ~ 7 月对部分区县消落带进行了补充采样, 共收集表层土壤样品 192 个. 采样点分布如图 1 所示.

### 1.2 分析方法

土壤总汞采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-KMnO<sub>4</sub> 水浴消解, 冷原子荧光法测定. 土壤中汞的赋存形态采用改进的 Tessier 连续化学浸提法<sup>[26]</sup>, 将土壤中的汞分为: 水溶态汞、酸溶态汞、碱溶态汞、过氧化氢溶态汞和残留态汞等 5 种赋存状态.

汞的赋存形态提取步骤为: 称取 0.5 g 风干土

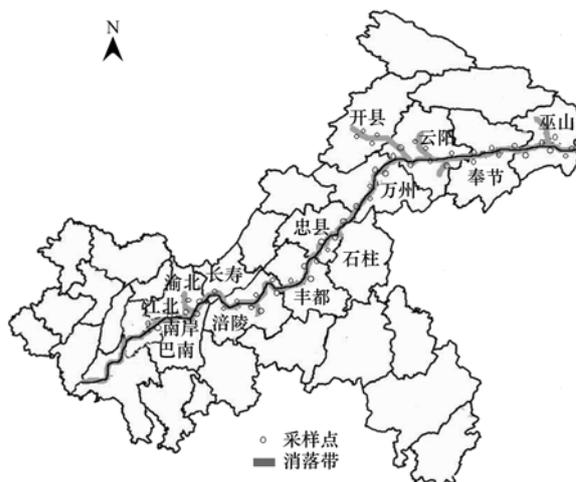


图 1 三峡库区消落带土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir

样置于离心管中, 加入 20.0 mL 去离子水, 振荡 30 min, 离心分离, 取上清液分析水溶态汞. 上步残渣加入 20.0 mL 0.2 mol·L<sup>-1</sup> HCl 提取, 剧烈振荡至沉淀泛起, 放置 5 min, 待泡沫消失后加入 0.5 mL 1% CuSO<sub>4</sub> 溶液, 振荡 30 min, 离心分离, 取上清液分析酸溶态汞. 上步残渣加入 30.0 mL 1% KOH, 室温振荡 10 min, 放置过夜, 离心分离, 取上清液分析碱溶态汞. 上步残渣加入 20.0 mL 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 在 80℃ 水浴加热 4 h, 离心分离, 取上清液分析过氧化氢溶态汞. 上步残渣加入 8.0 mL 王水, 85℃ 水浴加热 2 h, 离心分离, 取上清液分析残留态汞. 土壤总汞和汞赋存形态采用 F732-V 冷原子吸收测汞仪测定, 检出限为 0.05 μg·L<sup>-1</sup>.

### 1.3 基于地累积指数的土壤汞污染评价

目前, 国内外学者常采用地累积指数 (geoaccumulation index)<sup>[27]</sup> 来评价重金属的污染现状. 本研究也采用该方法来分析三峡库区消落带土壤中总汞及其赋存形态的污染程度, 其计算方法为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / kB_i]$$

式中,  $I_{\text{geo}}$  为 Hg 的地累积指数,  $C_i$  为土壤中 Hg 的实测值,  $B_i$  为土壤中 Hg 的地球化学背景值, 本研究选取三峡库区土壤汞背景值 (46.0 μg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[19]</sup> 作为汞的地球化学背景值,  $k$  为考虑到造岩运动可能引起的背景值变动而取的系数, 一般取 1.5. 根据  $I_{\text{geo}}$  值的计算结果, 土壤中重金属的污染程度分为 7 级 (0 ~ 6 级), 见表 1.

### 1.4 基于潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价

目前, 大多数学者常采用 Hakanson<sup>[28]</sup> 提出的潜在生态危害指数法 (potential ecological risk factor) 评

价土壤或沉积物中重金属的生态风险. 本研究也采用该方法对三峡库区消落带土壤中汞及其赋存形态的潜在生态危害进行评价. 计算方法如下:

$$E_r = T_r \cdot C_i / C_0$$

式中,  $E_r$  为 Hg 的潜在生态危害系数,  $C_i$  为土壤中汞

的测定值,  $C_0$  为汞的参比值,  $T_r$  为汞的毒性系数. 本研究采用三峡库区土壤环境汞的自然背景含量 ( $46.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[19]</sup> 为参比值, 汞的毒性系数取  $T_r = 40$ . 汞的潜在生态危害系数和污染程度的关系见表 2.

表 1 地累积指数与重金属污染程度

Table 1 The  $I_{\text{geo}}$  and contamination grades of heavy metals

$I_{\text{geo}}$	0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

表 2 潜在生态风险分级

Table 2 Classification of potential ecological risk

$E_i$	<40	40~80	80~160	160~320	>320
潜在生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强

### 1.5 质量控制与数据处理

采用标准物质 GBW07406 (GSS-6) 进行质量控制, 标准土样测定结果显示汞的平均回收率为 89.8%~106.5%. 所用化学试剂  $\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$  为优级纯, 其它为分析纯, 水为超纯水. 采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件对数据进行处理和分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 三峡库区消落带土壤汞含量与分布

表 3 为三峡库区消落带不同区县土壤中汞含量

及其形态分布统计结果. 从中可以发现, 不同区县的消落带土壤总汞含量有较大差异. 其中, 江北、涪陵和奉节的变异系数都超过了 50%, 变异系数最小的为南岸和云阳, 都在 25% 左右. 三峡库区消落带土壤汞含量为  $22.4 \sim 393.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 192 个采样点中, 有 76.6% 的土壤汞含量超过了唐将等<sup>[19]</sup>测得的三峡库区土壤汞背景值 ( $46.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 超过  $200 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的采样点占 3.1%, 有 3 个采样点的汞含量超过土壤汞背景值的 5 倍; 最大值为  $393.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是三峡库区土壤汞背景值的 8.6 倍.

表 3 三峡库区消落带土壤中总汞及汞赋存形态

Table 3 THg and Hg species in soil of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir

区县	总汞/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	样本数/个	变异系数/%	汞赋存形态/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
				水溶态汞	酸溶态汞	碱溶态汞	过氧化氢溶态汞	残留态汞
巴南	$82.8 \pm 34.4$	10	41.5	$4.4 \pm 1.6$	$10.8 \pm 3.4$	$12.9 \pm 4.8$	$10.4 \pm 6.1$	$45.2 \pm 6.5$
南岸	$126.0 \pm 31.9$	10	25.3	$3.2 \pm 1.3$	$10.2 \pm 3.6$	$19.5 \pm 7.4$	$7.5 \pm 2.8$	$86.1 \pm 26.5$
江北	$156.5 \pm 85.8$	13	54.8	$4.9 \pm 3.3$	$10.0 \pm 5.8$	$19.6 \pm 15.1$	$13.4 \pm 10.6$	$107.5 \pm 56.2$
渝北	$90.7 \pm 28.3$	14	31.2	$2.8 \pm 1.1$	$10.3 \pm 4.0$	$19.6 \pm 7.5$	$5.9 \pm 1.9$	$51.1 \pm 22.5$
长寿	$48.3 \pm 15.9$	14	32.9	$3.0 \pm 1.9$	$10.3 \pm 4.0$	$11.0 \pm 3.6$	$7.5 \pm 2.2$	$15.7 \pm 7.8$
涪陵	$138.9 \pm 74.2$	14	53.4	$4.2 \pm 1.7$	$17.6 \pm 11.0$	$11.6 \pm 4.1$	$8.0 \pm 3.3$	$96.3 \pm 41.9$
丰都	$65.5 \pm 19.9$	12	30.4	$1.8 \pm 0.7$	$10.6 \pm 6.4$	$13.6 \pm 5.7$	$7.0 \pm 2.9$	$32.0 \pm 11.9$
忠县	$48.8 \pm 16.1$	14	33.0	$2.1 \pm 0.8$	$8.4 \pm 2.7$	$13.7 \pm 5.3$	$5.8 \pm 2.1$	$19.2 \pm 10.9$
石柱	$40.2 \pm 11.7$	10	29.1	$2.2 \pm 0.8$	$9.8 \pm 5.2$	$8.0 \pm 2.8$	$7.4 \pm 1.8$	$12.9 \pm 6.0$
万州	$95.5 \pm 47.2$	15	49.4	$3.3 \pm 1.6$	$15.0 \pm 5.1$	$10.8 \pm 5.2$	$7.0 \pm 3.4$	$61.3 \pm 43.6$
开县	$94.3 \pm 33.9$	20	35.9	$2.3 \pm 0.8$	$12.6 \pm 6.8$	$18.2 \pm 8.6$	$6.3 \pm 1.3$	$55.0 \pm 26.4$
云阳	$51.3 \pm 12.7$	17	24.8	$2.2 \pm 0.7$	$8.8 \pm 2.9$	$8.5 \pm 1.9$	$5.0 \pm 1.6$	$27.1 \pm 10.4$
奉节	$97.6 \pm 51.8$	14	53.1	$3.2 \pm 1.5$	$13.3 \pm 10.3$	$14.9 \pm 6.6$	$10.5 \pm 4.4$	$56.6 \pm 40.4$
巫山	$48.6 \pm 18.9$	15	38.9	$2.0 \pm 0.8$	$11.1 \pm 4.4$	$9.7 \pm 3.2$	$5.8 \pm 2.8$	$19.9 \pm 15.3$
均值	$84.2 \pm 54.3$	—	38.1	$2.9 \pm 1.7$	$11.4 \pm 7.9$	$13.7 \pm 7.6$	$7.5 \pm 4.4$	$48.7 \pm 42.7$

从不同区县消落带的土壤汞平均值来看, 总汞平均含量最大的为江北区, 达到 ( $156.5 \pm 85.8$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 最低的为石柱县, 为 ( $40.2 \pm 11.7$ )

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 所有采样点的汞平均含量为 ( $84.2 \pm 54.3$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 各区县消落带土壤中汞平均含量大小顺序为: 江北 > 涪陵 > 南岸 > 奉节 > 万州 > 开县

> 渝北 > 巴南 > 丰都 > 云阳 > 忠县 > 巫山 > 长寿 > 石柱. 从表 3 中可以看出, 江北、涪陵和南岸的土壤中汞含量相对较高, 都超过了  $100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 忠县、巫山、长寿、石柱等区县土壤中的汞含量相对较低, 都没有超过  $50 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 除了石柱县外, 其他区县的土壤汞平均值都超过了三峡库区土壤汞的背景值 ( $46.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[19]</sup>.

### 2.2 三峡水库消落带土壤中汞形态分布

图 2 为三峡库区不同区县消落带土壤中汞的赋存形态所占的百分比(质量分数, 下同). 从中可以看出, 三峡库区消落带土壤中的汞主要以残留态为主, 其平均含量所占比例为 51.3% (范围值为 31.7% ~ 69.7%). 其次是碱溶态汞、酸溶态汞和过氧化氢溶态汞, 所占比例分别为 18.3% (范围值为 11.1% ~ 28.2%)、15.5% (范围值为 7.0% ~ 23.5%)、10.9% (范围值为 6.2% ~ 19.4%), 水溶态汞所占比例最

低, 为 4.1% (范围值为 2.7% ~ 6.4%).

土壤中汞的存在形态对生物的可利用性有重要影响, 汞的存在形态不同, 其生态毒性差异较大<sup>[23,24]</sup>. 汞的生物可利用性可用水溶态汞、酸溶态汞和碱溶态汞之和来表示(见图 3). 从图 3 中可以看出, 不同区县消落带土壤中的生物可利用性汞平均含量为  $19.7 \sim 36.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均值为  $28.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 三峡库区消落带土壤中汞的生物可利用态占总汞的比例达 22.1% ~ 51.6%, 平均值为 37.9%. 从图 3 中可以看出, 长寿、忠县、石柱和巫山的消落带土壤中汞的生物可利用态所占比例较大(都在 50% 左右), 但是其生物可利用性汞含量却较小 ( $20.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右), 这主要是和不同区县消落带土壤的总汞含量有关. 单个采样点的土壤生物可利用态汞含量超过  $46.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (三峡库区土壤汞背景值<sup>[19]</sup>) 的占 6.3%, 最高值达  $94.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 单

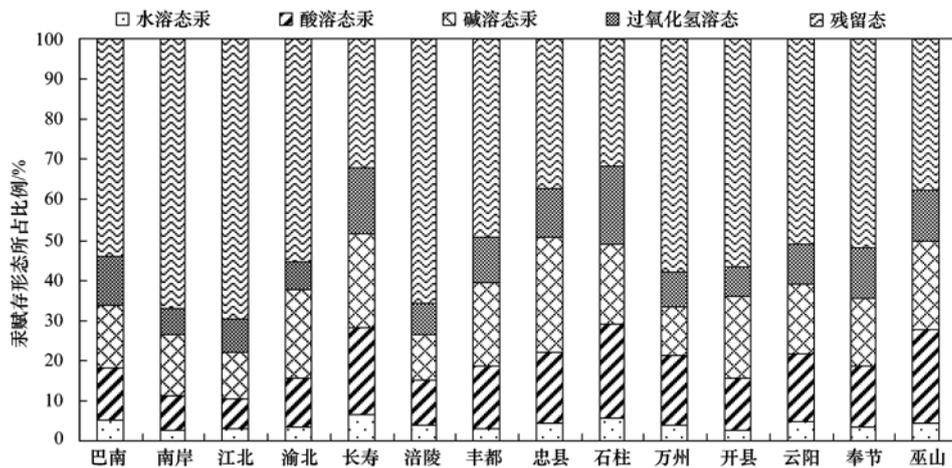


图 2 三峡库区消落带土壤汞赋存形态所占比例

Fig. 2 Percentages of Hg species in soil of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir

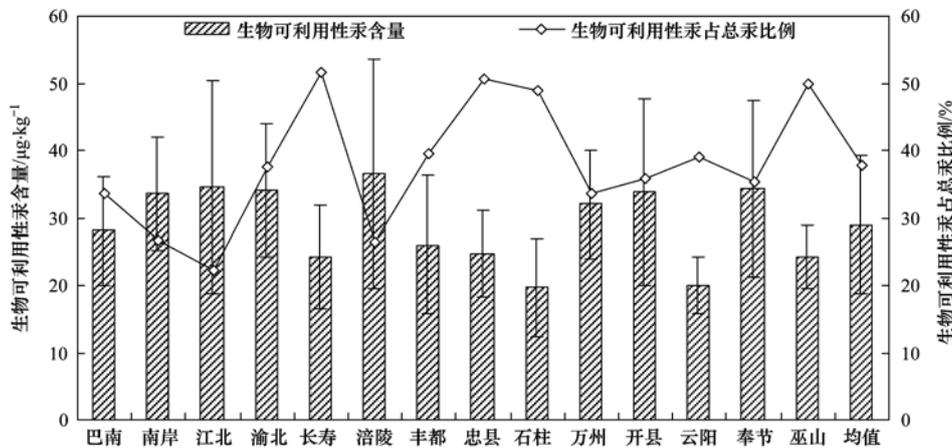


图 3 三峡库区消落带土壤生物可利用性汞含量及其所占百分比

Fig. 3 Bioavailable Hg in soil of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir

个采样点的土壤生物可利用性汞所占比例超过50%的占20.8%，最高达到了66.5%。由此可见，评估三峡库区消落带土壤中汞的生态风险需要进一步对汞的赋存形态进行评价，特别是对生物可利用性汞进行风险分析。

2.3 基于地累积指数的土壤汞污染评价

三峡库区消落带土壤中汞的地累积污染指数见表4。从中可以看出，三峡库区消落带土壤中，水溶态汞、酸溶态汞、碱溶态汞和过氧化氢溶态汞的地累积指数都小于0，不存在污染。残留态汞中，77.1%的采样点地累积指数小于0，没有污染，有19.3%的采样点达到无-中度污染，有3.6%的采样点已达到中度污染。但残留态汞的迁移能力比较弱，不易被生物所吸收或利用，其对生物的危害不

大。从表4中还可以发现，三峡库区消落带土壤中生物可利用性汞的地累积指数(水溶态汞、酸溶态汞与碱溶态汞的 $I_{geo}$ 之和)均小于0，不存在污染，其对库区的水生生物和动物的危害很小。

从表4中可以看出，土壤中不同形态汞的地累积指数之和( $\sum I_{geo}$ )与土壤中总汞的地累积指数( $I_{geo-THg}$ )相比，有较大差异。从不同形态汞的地累积指数之和来看，各区县的 $\sum I_{geo}$ 平均值为-16.55~-10.15，均小于0，不存在污染。从总汞的地累积指数看，各区县的 $I_{geo-THg}$ 平均值为-0.78~1.18，只有50.5%的采样点的 $I_{geo-THg}$ 小于0，没有污染，有34.4%的采样点为无-中度污染，13.5%的采样点为中度污染，有1.6%的采样点已达到了中-强度污染。

表4 三峡库区消落带土壤中汞的地累积指数

Table 4 The  $I_{geo}$  of Hg in soil of water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir

区县	汞赋存形态					$\sum I_{geo}$	$I_{geo-THg}$
	水溶态汞	酸溶态汞	碱溶态汞	过氧化氢溶态汞	残留态汞		
巴南	-4.97 ~ -3.26 (-3.99) <sup>1)</sup>	-3.48 ~ -2.14 (-2.68)	-3.13 ~ -1.79 (-2.41)	-3.94 ~ -1.77 (-2.73)	-1.89 ~ 0.37 (-0.61)	-15.71 ~ -9.56 (-12.64)	-0.63 ~ 1.01 (0.26)
南岸	-5.43 ~ -3.65 (-4.42)	-3.41 ~ -1.92 (-2.75)	-2.54 ~ -0.94 (-1.82)	-4.00 ~ -2.49 (-3.20)	-0.80 ~ 0.85 (0.32)	-15.28 ~ -10.73 (-11.87)	-0.01 ~ 1.16 (0.87)
江北	-5.04 ~ -2.33 (-3.83)	-4.26 ~ -1.49 (-2.78)	-3.94 ~ -0.11 (-1.81)	-3.43 ~ -0.57 (-2.37)	-1.82 ~ 1.88 (0.64)	-16.62 ~ -4.01 (-10.15)	-0.70 ~ 2.51 (1.18)
渝北	-5.62 ~ -3.65 (-4.60)	-4.30 ~ -1.92 (-2.74)	-3.13 ~ -0.94 (-1.81)	-4.34 ~ -2.86 (-3.54)	-1.91 ~ -0.55 (-0.43)	-15.90 ~ -9.99 (-13.14)	-0.29 ~ 1.18 (0.39)
长寿	-6.26 ~ -3.22 (-4.54)	-3.94 ~ -1.93 (-2.75)	-4.15 ~ -1.95 (-2.65)	-4.39 ~ -2.62 (-3.19)	-3.26 ~ -1.15 (-2.14)	-21.7 ~ -12.41 (-15.28)	-1.62 ~ 0.18 (-0.51)
涪陵	-5.62 ~ -3.22 (-4.03)	-3.68 ~ 0.10 (-1.97)	-3.88 ~ -1.79 (-2.58)	-4.85 ~ -2.46 (-3.11)	-1.39 ~ 1.85 (0.48)	-15.58 ~ -6.65 (-11.20)	-0.51 ~ -2.35 (1.01)
丰都	-6.62 ~ -4.57 (-5.25)	-4.22 ~ -1.66 (-2.71)	-3.88 ~ -1.62 (-2.34)	-3.94 ~ -2.18 (-3.30)	-2.10 ~ -0.49 (-1.11)	-19.86 ~ -11.78 (-14.71)	-1.10 ~ 0.45 (-0.08)
忠县	-5.85 ~ -4.26 (-5.01)	-4.18 ~ -2.42 (-3.04)	-3.02 ~ -1.54 (-2.33)	-4.57 ~ -2.91 (-3.58)	-2.85 ~ -0.46 (-1.84)	-20.32 ~ -12.20 (-15.81)	-1.29 ~ -0.33 (-0.50)
石柱	-5.52 ~ -4.43 (-4.98)	-4.04 ~ -1.82 (-2.81)	-4.06 ~ -2.46 (-3.12)	-4.00 ~ -2.94 (-3.22)	-3.50 ~ -1.56 (-2.42)	-19.81 ~ -13.77 (-16.55)	-1.54 ~ -0.01 (-0.78)
万州	-5.62 ~ -3.26 (-4.39)	-3.07 ~ -1.53 (-2.20)	-4.00 ~ -1.85 (-2.68)	-4.85 ~ -2.35 (-3.31)	-1.75 ~ 1.26 (-0.17)	-17.28 ~ -8.88 (-12.75)	-0.59 ~ 1.63 (0.47)
开县	-6.26 ~ -4.18 (-4.89)	-4.04 ~ -1.33 (-2.45)	-3.97 ~ -0.78 (-1.92)	-4.04 ~ -2.89 (-3.46)	-2.09 ~ 0.69 (-0.33)	-16.00 ~ -10.63 (-13.06)	-0.54 ~ 1.39 (0.45)
云阳	-5.97 ~ -4.34 (-4.94)	-3.65 ~ -2.16 (-2.97)	-3.60 ~ -2.35 (-3.01)	-4.43 ~ -2.86 (-3.79)	-2.42 ~ -0.61 (-1.35)	-17.97 ~ -14.45 (-16.07)	-1.13 ~ -0.09 (-0.43)
奉节	-6.22 ~ -3.20 (-4.45)	-3.97 ~ -0.74 (-2.38)	-3.92 ~ -1.51 (-2.21)	-3.94 ~ -1.63 (-2.72)	-2.99 ~ 0.64 (-0.29)	-18.66 ~ -7.55 (-12.05)	-1.28 ~ 1.63 (0.50)
巫山	-5.64 ~ -4.26 (-5.14)	-3.91 ~ -1.76 (-2.63)	-3.68 ~ -1.98 (-2.83)	-4.91 ~ -2.66 (-3.56)	-3.26 ~ -0.08 (-1.79)	-19.05 ~ -4.01 (-15.95)	-1.48 ~ 0.62 (-0.51)

1) 括号内为平均值,下同

2.4 基于潜在生态危害指数的土壤汞生态风险评价

三峡库区消落带土壤中汞的潜在生态危害指数见表5。从中可以看出，三峡库区消落带土壤中，水

溶态汞和过氧化氢溶态汞的潜在生态危害指数都小于40，处于低生态风险。大部分采样点的酸溶态汞和碱溶态汞都处于低生态风险，但分别有1.0%和

0.5%的采样点达到了中等程度潜在生态危害. 对于残留态汞,有60.9%的采样点的生态危害指数小于40,但也有24.5%的采样点达到中等程度潜在生态危害,有13.0%的采样点为强生态危害,并有1.6%的采样点已表现出很强的潜在生态危害. 但因为残留态汞难以在土壤生态系统中进行迁移转化,因此,它的生态危害也较小. 土壤中生物可利用性汞的潜在危害指数为8.17~78.83,平均值为22.85,仅有6.3%的土壤样品生物可利用性汞表现为中等程度潜在危害,其余均为低生态危害. 总体来说,采用汞的赋存形态评价结果显示,三峡库区消

落带土壤中汞的潜在生态风险较低.

土壤中不同形态汞的潜在生态危害指数之和( $\sum E_r$ )与土壤中总汞的生态危害指数( $E_r$ -THg)相比,差异较小. 从总汞的 $E_r$ -THg来看,只有24.0%的采样点的 $E_r$ 小于40,属于低生态危害,已有44.3%的采样点处于中度潜在危害,28.1%的采样点处于强度生态危害污染,3.1%的采样点表现为很强生态危害. 江北区的一个样点生态危害指数最高,达到了342.17,为极强生态危害. 因此,相比于汞赋存形态,采用土壤总汞含量来评价其潜在生态风险的结果偏高.

表5 三峡库区消落带土壤中汞的潜在生态危害指数

Table 5 The  $E_r$  of Hg in soil of water-level-fluctuating in the Three Gorges Reservoir

区县	汞赋存形态					$\sum E_r$	$E_r$ -THg
	水溶态汞	酸溶态汞	碱溶态汞	过氧化氢溶态汞	残留态汞		
巴南	1.91~6.26 (3.78)	5.39~13.85 (9.39)	6.87~17.30 (11.25)	3.91~17.57 (9.07)	16.17~77.48 (39.27)	39.74~127.83 (72.77)	38.70~120.17 (72.00)
南岸	1.39~4.78 (2.81)	5.56~15.83 (8.90)	10.35~31.22 (16.99)	3.74~10.70 (6.53)	34.35~108.00 (74.90)	60.87~155.83 (110.13)	59.57~150.87 (109.59)
江北	1.83~11.91 (4.23)	3.13~21.30 (8.72)	3.91~55.74 (17.06)	5.57~39.43 (11.62)	42.87~220.26 (90.82)	58.70~336.52 (132.43)	59.39~342.17 (133.44)
渝北	1.22~4.78 (2.47)	3.04~15.83 (8.95)	6.87~31.30 (17.08)	3.04~8.26 (5.14)	15.91~88.00 (44.41)	46.87~126.70 (78.06)	49.22~135.48 (78.84)
长寿	0.78~6.26 (2.58)	3.91~15.74 (8.93)	3.39~15.57 (9.53)	2.87~9.74 (6.55)	6.26~24.17 (13.61)	18.09~62.78 (41.19)	19.48~68.00 (42.01)
涪陵	1.22~6.43 (3.66)	4.70~64.17 (15.32)	6.96~17.30 (10.07)	2.09~14.09 (6.97)	22.96~216.43 (83.75)	46.61~304.09 (119.77)	42.26~305.91 (120.78)
丰都	0.61~2.52 (1.57)	3.22~19.04 (9.19)	3.91~19.57 (11.86)	4.43~13.22 (6.09)	14.96~42.78 (27.82)	26.61~84.61 (56.52)	28.00~81.83 (56.96)
忠县	0.96~3.13 (1.86)	3.30~11.22 (7.27)	6.52~20.70 (11.94)	2.96~8.00 (5.01)	8.35~43.57 (16.71)	24.26~73.39 (42.80)	24.52~75.48 (42.41)
石柱	1.30~2.78 (1.90)	3.65~17.04 (8.53)	3.65~10.87 (6.91)	4.00~7.83 (6.42)	5.30~20.35 (11.23)	22.26~56.87 (34.99)	20.70~59.48 (34.91)
万州	1.22~6.26 (2.86)	7.13~20.78 (13.03)	3.74~17.04 (9.39)	2.09~10.74 (6.07)	22.09~144.00 (53.33)	42.96~188.78 (84.68)	39.83~185.83 (83.01)
开县	0.78~3.30 (2.02)	3.65~23.91 (10.96)	3.83~35.04 (15.80)	3.65~8.09 (5.45)	14.09~96.70 (47.80)	45.65~149.13 (82.03)	41.13~156.78 (82.00)
云阳	0.96~2.96 (1.95)	4.43~13.39 (7.64)	4.96~11.74 (7.43)	2.87~8.26 (4.35)	11.22~39.30 (23.55)	30.52~64.87 (44.91)	27.39~63.83 (44.57)
奉节	0.78~6.52 (2.75)	3.65~35.83 (11.54)	4.09~21.13 (12.93)	4.96~15.74 (9.09)	9.91~122.70 (49.21)	22.78~181.74 (85.51)	24.70~186.17 (84.86)
巫山	1.22~2.43 (1.70)	4.00~17.74 (9.67)	4.70~15.22 (8.45)	2.00~9.48 (5.08)	6.26~56.87 (17.34)	23.39~87.83 (42.25)	21.57~92.00 (42.23)

## 2.5 两种评价方法的土壤汞风险评价比较

从地累积指数和潜在生态危害指数两种评价方法的结果可以看出,二者对不同区县消落带土壤中汞的污染水平和生态风险评价结果存在一定差异. 总体来说,采用土壤总汞计算得出的地累积指数评价结果显示,三峡库区消落带土壤仅有50.5%的采样点没有污染;有34.4%、13.5%和1.6%的采样

点分别达到了无-中度、中度和中-强度污染. 而采用汞赋存形态得出的评价结果显示除残留态汞外,其余汞形态和生物可利用性汞都不存在污染,危害也较小. 采用土壤总汞计算得出的潜在生态危害指数评价结果显示,只有24.0%的采样点为低生态风险,有44.3%、28.1%和3.1%的采样点分别达到了中度、强度和很强的生态危害. 而汞赋存形态

评价结果发现除残留态汞外,其它汞形态和生物可利用性汞的潜在生态风险都很低。

由此可见,采用土壤总汞含量计算得出的  $I_{geo}$  和  $E_r$  值明显偏大,对评估三峡库区消落带土壤中汞的污染水平和生态风险可能会出现偏高的现象。由于土壤中不同汞形态的可溶性和迁移能力存在较大差异,其生物可利用性也有较大差异,因此,相比于总汞,采用汞的赋存形态进行风险评价更能反映三峡库区消落带土壤中汞的污染水平和生态风险程度。

### 3 结论

(1)三峡库区消落带土壤中汞含量差异较大,其范围值为  $22.4 \sim 393.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,汞平均含量为  $(84.2 \pm 54.3) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除石柱县外,江北、涪陵、南岸、奉节、万州、开县、渝北、巴南、丰都、云阳、忠县、巫山和长寿这 13 个区县的消落带土壤汞含量平均值超过了三峡库区土壤汞背景值。

(2)三峡库区消落带土壤中的汞以残留态为主,不同汞赋存形态所占比例分别为:水溶态汞 2.7%~6.4%、酸溶态 7.0%~23.5%、碱溶态汞 11.1%~28.2%、过氧化氢溶态汞 6.2%~19.4%、残留态汞 31.7%~69.7%。各区县生物可利用性汞平均含量为  $19.7 \sim 36.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其占总汞的比例为 22.1%~51.6%。

(3)采用土壤总汞进行地累积指数和潜在生态危害指数评价结果显示,仅有 50.5% 和 24.0% 的土壤样品没有污染或为低生态风险。而采用汞赋存形态进行的两种评价结果均显示其污染水平和生态风险都较低,由生物可利用性汞带来的生态风险也很小。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Huguet L, Castelle S, Schäfer J, *et al.* Mercury methylation rates of biofilm and plankton microorganisms from a hydroelectric reservoir in French Guiana [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(6): 1338-1348.
- [ 2 ] Khoshnamvand M, Kaboodvandpour S, Ghiasi F. A comparative study of accumulated total mercury among white muscle, red muscle and liver tissues of common carp and silver carp from the Sanandaj Gheshlagh Reservoir in Iran [J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(3): 1236-1241.
- [ 3 ] Feng X B, Bai W Y, Shang L H, *et al.* Mercury speciation and distribution in Aha Reservoir which was contaminated by coal mining activities in Guiyang, Guizhou, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(2): 213-221.
- [ 4 ] He T R, Feng X B, Guo Y N, *et al.* The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: A case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(1): 56-57.
- [ 5 ] Bravo A G, Loizeau J L, Bouchet S, *et al.* Mercury human exposure through fish consumption in a reservoir contaminated by a chlor-alkali plant: Babeni reservoir (Romania) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(8): 1422-1432.
- [ 6 ] Atta A, Voegborlo R B, Agorku E S. Total mercury distribution in different tissues of six species of freshwater fish from the Kpong hydroelectric reservoir in Ghana [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(5): 3259-3265.
- [ 7 ] Gray J E, Hines M E. Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA [J]. *Chemical Geology*, 2009, **258**(3-4): 157-167.
- [ 8 ] Wang Q, Feng X B, Yang Y F, *et al.* Spatial and temporal variations of total and methylmercury concentrations in plankton from a mercury-contaminated and eutrophic reservoir in Guizhou Province, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, **30**(12): 2739-2747.
- [ 9 ] Ahn M C, Kim B, Holsen T M, *et al.* Factors influencing concentrations of dissolved gaseous mercury (DGM) and total mercury (TM) in an artificial reservoir [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(2): 347-355.
- [ 10 ] 王健康, 高博, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [ 11 ] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 等. 三峡库区消落区水体-沉积物重金属迁移转化特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3481-3487.
- [ 12 ] 王业春, 雷波, 杨三明, 等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 612-617.
- [ 13 ] 张雷, 秦延文, 赵艳明, 等. 三峡澎溪河回水区消落带岸边土壤重金属污染分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 3021-3029.
- [ 14 ] 储立民, 常超, 谢宗强, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(1): 192-196.
- [ 15 ] Wang F Y, Zhang J Z. Mercury contamination in aquatic ecosystems under a changing environment: Implications for the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(2): 141-149.
- [ 16 ] Zhang L, Zang X, Xu J, *et al.* Mercury bioaccumulation in fishes of three gorges reservoir after impoundment [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **78**(3-4): 262-264.
- [ 17 ] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, *et al.* Assessing heavy metal pollution in the water level fluctuation zone of China's Three Gorges Reservoir using geochemical and soil microbial approaches [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 231-240.
- [ 18 ] Tian X S, Zhu C, Sun Z B, *et al.* An evaluation of heavy metal

- pollution within historic cultural strata at a specialized salt production site at Zhongba in the three gorges reservoir region of the Yangtze River, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(7): 2129-2138.
- [19] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(4): 848-852.
- [20] 冉祥滨, 于志刚, 陈洪, 等. 三峡水库蓄水至 135m 后坝前及香溪河水域溶解无机汞分布特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1175-1179.
- [21] 叶琛, 李思悦, 卜红梅, 等. 三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(6): 1264-1269.
- [22] 陈宏. 三峡库区消落带土壤汞库及其风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [23] 单孝全, 王仲文. 形态分析与生物可给性[J]. *分析试验室*, 2001, **20**(6): 103-108.
- [24] 靳永卿. 汞的形态分析及汞环境污染的评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- [25] 赵健. 长江口滨岸潮滩汞的环境地球化学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [26] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [27] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [28] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.

## CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region .....	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> ( 801 )
Carbon Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Based on Local Carbon Profiles .....	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> ( 810 )
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> ( 820 )
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties .....	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> ( 830 )
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves .....	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> ( 839 )
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise .....	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> ( 847 )
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation .....	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo ( 853 )
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus .....	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian ( 864 )
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 870 )
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in the River Estuarine Marsh .....	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng ( 879 )
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer .....	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> ( 885 )
Emission of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O and NH <sub>3</sub> from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts .....	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> ( 892 )
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles .....	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> ( 901 )
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea .....	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> ( 908 )
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River .....	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian ( 915 )
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis .....	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> ( 924 )
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> ( 933 )
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland .....	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 942 )
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun .....	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> ( 951 )
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River .....	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> ( 958 )
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway .....	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> ( 964 )
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron .....	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> ( 972 )
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System .....	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> ( 979 )
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification .....	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> ( 987 )
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier .....	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo ( 995 )
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature .....	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 1002 )
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides .....	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 1009 )
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion .....	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> ( 1016 )
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou .....	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1021 )
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary .....	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> ( 1029 )
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay .....	LI Fei, XU Min ( 1035 )
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater .....	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> ( 1041 )
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin .....	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1051 )
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 1060 )
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields .....	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> ( 1068 )
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil .....	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1075 )
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain .....	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> ( 1081 )
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China .....	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 1091 )
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province .....	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> ( 1098 )
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil .....	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> ( 1105 )
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate .....	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao ( 1111 )
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil .....	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> ( 1119 )
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil .....	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> ( 1125 )
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry .....	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> ( 1131 )
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil .....	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> ( 1138 )
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils .....	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> ( 1144 )
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area .....	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> ( 1151 )
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor ( <i>Cinnamomum camphora</i> ) Tree Bark from Southern Jiangsu, China .....	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> ( 1159 )
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable .....	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua ( 1164 )
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress .....	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> ( 1169 )
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8 .....	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> ( 1176 )
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering .....	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> ( 1183 )
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China .....	LIANG Jing, MAO Jian-su ( 1191 )
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model .....	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 1198 )
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins .....	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> ( 1205 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行