

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000~2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

三峡水库消落带植物汞的分布特征

梁丽¹, 王永敏¹, 李先源², 唐振亚¹, 张翔¹, 张成^{1,3}, 王定勇^{1,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715; 3. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716)

摘要: 以三峡库区重庆段忠县石宝寨、涪陵珍溪和开县汉丰湖消落带为主要研究地点, 调查并采集了植物样品, 分析样品总汞和甲基汞, 探讨三峡水库消落带植物汞的分布特征及植物汞库存量。结果表明, 调查区域消落带植物总汞含量在 $(1.62 \pm 0.57) \sim (49.42 \pm 3.93) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围, 植物各部位总汞的含量呈根 > 叶 > 茎的趋势分布; 植物甲基汞含量在 $(15.27 \pm 7.09) \sim (1974.67 \pm 946.10) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围, 植物根部甲基汞含量高于茎和叶。同类植物中, 开县汉丰湖消落带植物总汞和甲基汞含量均较忠县石宝寨、涪陵珍溪镇消落带植物略高; 不同高程植物总汞及甲基汞库存量存在差异, 145 ~ 150、150 ~ 160、160 ~ 170 和 170 ~ 175 m 高程的植物总汞库存量分别为 145.3、166.4、124.3 和 88.2 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 甲基汞库存量分别为 1.9、2.7、3.6 和 3.2 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。消落带优势种植物对总汞的富集能力相对较弱 ($\text{BAF} < 1$), 而对甲基汞的富集能力相对较强 ($\text{BAF} > 1$)。

关键词: 植物; 总汞; 甲基汞; 消落带; 三峡水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4103-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.11.021

Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir

LIANG Li¹, WANG Yong-min¹, LI Xian-yuan², TANG Zhen-ya¹, ZHANG Xiang¹, ZHANG Cheng^{1,3}, WANG Ding-yong^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China)

Abstract: The mercury (Hg) distribution and storage in plants at water-level-fluctuating zone (WLFZ) in the Three Gorges Reservoir were investigated by analyzing the total mercury (THg) and methylmercury (MeHg) levels in different parts of plants collected from three typical sites including Shibaozhai, Zhenxi and Hanfeng Lake in WLFZ. The results indicated that THg and MeHg concentrations in plants ranged from (1.62 ± 0.57) to $(49.42 \pm 3.93) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and from (15.27 ± 7.09) to $(1974.67 \pm 946.10) \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In addition, THg levels in different plant parts followed the trend: root > leaf > stem, and similar trend for MeHg was observed with the highest level in root. An obvious spatial distribution was also found with the THg and MeHg levels in plants in Hanfeng higher than those in the same plants in the other two sampling sites (Shibaozhai and Zhenxi), and there was a difference of THg and MeHg storage in plants in various attitudes. The corresponding THg and MeHg storages were 145.3, 166.4, 124.3 and 88.2 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and 1.9, 2.7, 3.6 and 3.2 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in 145-150, 150-160, 160-170 and 170-175 m attitudes. The accumulation ability of dominant plants in WLFZ for THg (bioaccumulation factor, $\text{BAF} < 1$) was weaker than that for MeHg ($\text{BAF} > 1$).

Key words: plant; total mercury; methylmercury; water-level-fluctuating zone (WLFZ); Three Gorges Reservoir

汞及其化合物具有很强的生物毒性, 其在水生生态系统中的分布、迁移和转化等环境化学行为在过去几十年以及现在都是汞问题研究的重点。已有大量研究显示, 新建水库鱼体甲基汞富集问题严重, 而被淹没土壤和植被是水库水体汞及鱼体甲基汞增高的重要来源^[1~3]。三峡水库作为我国最大的调节型水库, 每年9月开始蓄水, 10月底蓄水至正常水位高程175 m, 至次年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 km²的水库消落带^[4]。在每年3~9月的出露期, 消落带的大片区域会生长出茂密的草本植被, 植物作为陆地生态系统的第一生产者, 也是生

态系统中汞的重要输入输出途径^[5,6], 对汞有较强的生物富集效应, 极易通过生物积累进入到生态系统中^[7,8]。到蓄水期, 消落带植物被淹没并分解, 它所吸收的汞将会被释放到水体中^[9,10], 在有机质丰富的厌氧环境, 被释放的汞更易转化为甲基汞^[1], 产生更大的环境风险。因此, 研究三峡水库消落带

收稿日期: 2015-05-12; 修订日期: 2015-06-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41373113, 41173116); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015C124)

作者简介: 梁丽(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: swugrace2010@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

植物汞的分布特征及其库存量,以期为深入了解三峡库区汞的生物地球化学循环及其生态风险提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

选择位于三峡库区重庆段的忠县石宝寨、涪陵珍溪和开县汉丰湖这 3 个代表性地点(图 1),于 2014 年 7 月植物生长茂盛期,调查并采集了狗牙根等 20 余种植物样品(表 1),并在植物生长区域采集表层土壤样品。同时,根据三峡库区水库调度运行特征和高程,将消落带由低到高划分成 4 条水位梯度带,即下部(145~150 m)、中部(150~160 m)和(160~170 m)、上部(170~175 m)。在每个水位梯度带内随机设置 3 个 1 m×1 m 样方,齐地刈割样方内所有植物的地上部分,带回实验室洗净后在 50℃ 烘干至恒重,计算地上部生物量。

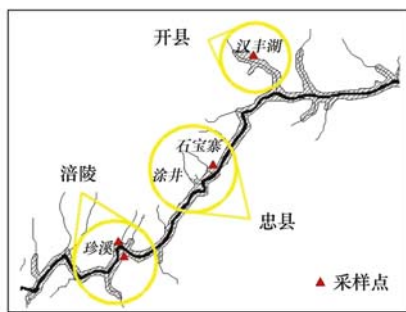


图 1 植物及土壤样品采集点

Fig. 1 Sampling sites of plants and soil samples

将采集的土壤样品于冻干机冻干、玛瑙乳钵磨细并过 100 目筛,测定总汞及甲基汞;植物样品用去离子水洗净,将根、茎和叶剪开,分别用冻干机冻干后,再用微型植物碎样机粉碎过 100 目筛,封装入自封袋中冷冻保存待测定其总汞及甲基汞。其中狗牙根因叶子细小,难以与茎分开,故对茎叶同时进行测定。

1.2 分析方法

植物及土样总汞直接采用 DMA-80 固体进样自动测汞仪(意大利麦尔斯通公司)进行测定;植物甲基汞采用溶剂萃取-水相乙基化衍生-色谱与冷原子荧光检测器(GC-CVAFS)联用的方法测定^[11];土壤甲基汞采用萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定^[12]。

1.3 质量控制及数据处理

试验所使用的玻璃器皿在使用前均在硝酸

(25%,体积比)溶液中浸泡 24 h 以上,然后经超纯水清洗后,在 500℃ 下灼烧 30 min 后,在洁净无汞的环境下冷却后使用。分析过程中采用空白试验、平行试验和标准物质测定进行质量控制,试验药品均为优级纯或色谱纯。所采用的土壤和植物样品总汞标准物质分别为 GBW07405(CSS-5)和 GBW10016(GSB-7),测定过程中其加标回收率为 93%~108%;甲基汞测定加标回收率为 85%~117%。

由于植物样品种类多,汞含量不同,即采用汞加权平均含量(c_0)来计算植物地上部汞存量,计算公式如下:

$$c_0 = (c_1 \times M \times a_1\% + c_2 \times M \times a_2\% + \cdots + c_i \times M \times a_i\%) / M \quad (1)$$

式中, c_i :不同植物总汞($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)或甲基汞浓度($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$); M :单位面积植物总地上生物量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$); $a_i\%$:现场采样调查所得的单位面积不同植物占地上总生物量的质量分数。

植物总汞或甲基汞储量(R)计算公式为:

$$R = c_0 \times M \quad (2)$$

式中, R 为单位面积总汞($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)或甲基汞($\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}$)储存量

数据分析使用 Excel 2013 以及 SPSS 18。

2 结果与讨论

2.1 消落带植物群落分布及地上部生物量

消落带植物群落类型不仅与库区地质地貌、原有植物群落类型及人类活动等关系密切,还与该区域落干期、淹水期时间长短有密切关系。本次野外调查发现,分布于三峡库区干流区忠县石宝寨及涪陵珍溪的消落带植物约有 11 科 28 种,其中禾本科 8 种,菊科 5 种,蓼科 3 种,苋科 3 种,豆科 2 种,莎草科 2 种,大戟科、茄科、千屈菜科、柳叶菜科和玄参科各 1 种;而三峡库区支流区开县汉丰湖消落带约有 8 科 21 种,其中禾本科 6 种,菊科 5 种,蓼科 2 种,苋科 2 种,豆科 2 种,莎草科 2 种,茄科、桑科各 1 种(植物种类及丰富度见表 1)。

调查期间,三峡水库水位为 147 m,大部分消落带处于落干状态,消落带植物经过 3~4 个月自然生长,植被茂盛,种类较多。调查发现,库区水位不同,所形成的消落带植物结构和数量也不同。例如,在库区干流区忠县石宝寨和涪陵珍溪镇,145~150 m 高程,自然植被以狗牙根和空心莲子草为优势种,150~160 m 高程,自然植被主要为稗草,160~170 m 高程,自然植被主要为苍耳、狼把草和酸模叶蓼;在库

区支流开县汉丰湖,其库边 145 ~ 165 m 区域几乎呈垂直状,165 ~ 170 m 区域则较为平坦,所以植被主要集中在 165 ~ 170 m 这一区域,自然植被主要是狗牙根、苍耳、空心莲子草、菵草和碎米莎草。

表 1 三峡库区消落带植物种类及其丰富度¹⁾

Table 1 Species and abundance of plants in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area					
科	属	拉丁名	丰富度		
			忠县石宝寨 (长江干流)	涪陵珍溪镇 (长江干流)	开县汉丰湖 (长江支流)
禾本科	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	D	D	D
	稗草	<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	D	D	D
	金色狗尾草	<i>Setaria glauca</i> (L.) Beauv.	D	D	D
	牛筋草	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	F	F	—
	牛鞭草	<i>Hemarthria altissima</i> (Poir.) Stapf et C. E. Hubb.	—	—	F
	野黍	<i>Eriochloa villosa</i> (Thunb.) Kunth	O	O	—
	牛鞭草	<i>Hemarthria altissima</i> (Poir.) Stapf et C. E. Hubb.	O	—	—
	荩草	<i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino	—	—	O
	马唐	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.	F	—	—
	狗尾草	<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	F	—	—
菊科	苍耳	<i>Xanthium sibiricum</i> Patrín ex Widder	D	D	D
	狼把草	<i>Bidens tripartita</i> L.	D	D	D
	醴肠	<i>Eclipta prostrata</i> (Linn.) Linn.	O	O	—
	黄花蒿	<i>Artemisia annua</i> Linn.	—	O	F
	小蓬草	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	O	—	F
	钻形紫菀	<i>Aster subulatus</i> Michx.	—	—	F
	翅果菊	<i>Pterocypsela indica</i> (L.) Shih	—	—	O
蓼科	酸模叶蓼	<i>Polygonum lapathifolium</i> L.	D	O	D
	长次酸模	<i>Rumex trisetifer</i> Stokes	F	—	—
	杠板归	<i>Polygonum perfoliatum</i> L.	—	—	F
豆科	草木樨	<i>Melilotus officinalis</i> (Linn.) Pall.	F	O	F
	合萌	<i>Aeschynomene indica</i> Linn.	F	—	F
莎草科	香附子	<i>Cyperus rotundus</i> L.	O	—	—
	碎米莎草	<i>Cyperus iria</i> L.	—	—	F
	异型莎草	<i>Cyperus difformis</i> L.	—	O	O
苋科	空心莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb.	D	D	D
	刺苋	<i>Amaranthus spinosus</i> L.	—	O	—
	青葙	<i>Celosia argentea</i> L.	—	O	O
大戟科	铁苋菜	<i>Acalypha australis</i> L.	O	—	—
藜科	土荆芥	<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	—	O	—
茄科	龙葵	<i>Solanum nigrum</i> L.	—	O	O
伞形科	野胡萝卜	<i>Daucus carota</i> L.	—	—	O
千屈菜科	水苋菜	<i>Ammannia baccifera</i> Linn	—	F	
桑科	葎草	<i>Humulus scandens</i> (Lour.) Merr.	—	—	D
柳叶菜科	假柳叶菜	<i>Ludwigia epilobioides</i> Maxim.	—	F	—
玄参科	母草	<i>Lindernia crustacea</i> (L.) F. Muell	—	F	—

1) “—”代表该区域未采集到此种植物;丰富度等级:D 为 dominant(优势种);F 为 frequent(常见种);O 为 occasional(偶见种)

消落带植被地上生物量不仅反映植被的生长状况,也反映了当地自然环境的变化情况,其不仅影响植被结构及物种分配,也会影响陆地生态系统和水生生态系统汞的迁移转化。三峡库区消落带 145 ~ 150 m 高程植被地上生物量最少,地上生物量均值为(0.44 ± 0.04) kg·m⁻²; 150 ~ 160 m 高程地上生物量较之有所增加,平均值为(0.62 ± 0.04) kg·m⁻²; 160 ~ 170 m 高程地上生物量明显增加,平均值为(0.83 ± 0.11) kg·m⁻²; 170 ~ 175 m 高程生

物量又略有下降,平均值为(0.73 ± 0.08) kg·m⁻²。总体看来,三峡库区消落带植被地上生物量呈“少-多-少”的分布趋势。

2.2 消落带植物总汞的分布特征

表 2 列出了三峡水库干流及支流消落带植物各部位总汞含量。从中可以看出,不同科属植物对汞的吸收有差异,不同区域的相同植物对汞的吸收也不同,植物各部位也表现出不同的吸收能力。植物根部总汞含量在(3.61 ± 1.99) ~ (49.42 ± 3.93)

表 2 三峡库区消落带植物总汞含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 THg concentrations in plants in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

科	属	样品数 (<i>n</i>)	忠县石宝寨(长江干流)			涪陵珍溪镇(长江干流)			开县汉丰湖(长江支流)		
			根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
禾本科	狗牙根	7	42.27±6.13	3.36±1.36	—	29.60±7.74	4.78±0.53	—	49.42±3.93	6.93±3.98	—
	稗草	9	11.23±5.93	3.34±2.91	7.18±1.37	10.63±4.62	2.69±0.95	5.98±2.25	25.47±4.72	4.69±2.08	14.79±4.56
	金色狗尾草	10	22.10±3.64	3.07±1.33	17.34±4.24	29.08±6.47	2.58±1.36	11.26±6.25	44.18±5.72	9.76±2.96	10.21±1.62
	牛筋草	9	37.61±3.89	2.68±2.08	10.42±2.92	31.23±8.51	1.67±1.37	8.98±3.72	—	—	—
	野黍	9	18.20±7.42	1.62±0.57	10.29±3.33	14.84±1.32	4.23±2.95	9.78±0.88	—	—	—
	牛鞭草	8	30.72±4.81	2.00±1.72	8.34±1.40	—	—	—	36.64±3.57	4.93±2.44	9.00±0.37
	荩草	10	—	—	—	—	—	—	7.84±3.67	19.23±5.54	11.46±3.41
	马唐	10	15.98±3.42	7.81±3.02	12.04±2.58	—	—	—	—	—	—
	狗尾草	8	22.52±3.03	8.49±0.94	14.01±2.37	—	—	—	—	—	—
菊科	苍耳	5	6.28±2.37	2.86±0.84	19.51±3.11	10.46±2.43	2.08±0.66	16.92±5.23	12.21±4.42	4.06±2.24	16.45±4.02
	狼把草	5	12.27±4.41	2.74±0.56	20.84±2.20	15.43±4.91	7.91±2.48	18.85±4.86	20.05±2.45	3.73±2.24	30.80±6.63
	醴肠	8	7.40±2.63	2.74±0.30	17.46±2.99	17.45±5.45	4.63±2.57	15.61±4.97	—	—	—
	黄花蒿	10	—	—	—	19.29±3.98	1.90±0.20	31.30±7.08	21.55±5.54	5.43±0.83	20.89±4.92
	小蓬草	10	21.38±5.78	3.26±1.33	30.05±4.58	—	—	—	37.59±3.70	2.58±1.32	23.79±5.30
	钻形紫菀	9	—	—	—	—	—	—	22.37±4.63	7.24±1.27	15.58±1.35
	翅果菊	5	—	—	—	—	—	—	5.64±1.56	1.86±0.37	12.71±4.14
蓼科	酸模叶蓼	5	23.32±4.18	3.47±1.54	18.61±4.57	17.16±4.03	7.19±4.46	19.14±6.04	31.67±4.86	6.97±1.48	16.17±5.76
	长次酸模	9	28.92±6.43	11.68±3.72	9.92±2.04	—	—	—	—	—	—
	杠板归	5	—	—	—	—	—	—	7.19±2.91	4.86±1.10	18.25±5.93
豆科	草木樨	7	27.49±4.20	4.30±1.35	18.63±4.86	15.50±4.49	6.25±2.43	11.09±3.62	19.43±1.36	9.91±3.21	18.85±6.78
	合萌	5	16.02±5.13	7.22±1.42	25.62±4.28	—	—	—	32.80±5.22	10.97±3.96	35.61±6.22
莎草科	香附子	6	22.73±5.63	6.55±1.42	31.57±3.01	—	—	—	—	—	—
	碎米莎草	8	—	—	—	—	—	—	31.50±5.46	5.45±1.09	13.76±5.04
	异型莎草	9	—	—	—	33.96±10.21	7.34±2.84	12.22±2.82	21.26±4.24	5.74±3.52	10.24±7.64
苋科	空心莲子草	6	19.08±3.20	6.62±1.38	34.25±5.66	15.72±5.08	4.84±1.15	29.17±6.78	29.35±8.46	6.48±0.02	33.29±3.92
	刺苋	5	—	—	—	6.80±1.86	1.88±1.86	34.17±7.86	—	—	—
	青葙	5	—	—	—	19.59±6.22	31.59±8.03	11.04±2.92	23.65±4.33	36.42±4.42	15.20±7.29
大戟科	铁苋菜	8	44.14±8.34	9.49±3.00	17.81±1.77	—	—	—	—	—	—
藜科	土荆芥	10	—	—	—	3.61±1.99	3.35±1.66	34.64±9.89	—	—	—
茄科	龙葵	5	—	—	—	4.26±1.48	15.42±4.31	30.02±4.65	13.86±3.48	6.23±2.31	29.24±6.24
伞形科	野胡萝卜	5	—	—	—	—	—	—	30.66±8.53	28.09±4.85	22.47±4.61
千屈菜科	水苋菜	9	—	—	—	14.50±4.66	10.63±4.66	13.01±3.05	—	—	—
桑科	葎草	7	—	—	—	—	—	—	32.54±5.13	7.11±2.55	15.23±5.90
柳叶菜科	假柳叶菜	5	—	—	—	5.72±1.05	3.07±1.53	8.39±0.90	—	—	—
玄参科	母草	10	—	—	—	16.17±5.00	8.55±3.08	13.33±3.97	—	—	—

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,茎部汞含量在 $(1.62 \pm 0.57) \sim (36.42 \pm 4.42) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,叶部总汞含量在 $(5.98 \pm 2.25) \sim (35.61 \pm 6.22) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围.从植物不同部位的总汞含量均值来看,根、茎和叶分别为 (21.69 ± 10.99) 、 (18.15 ± 8.31) 和 $(6.96 \pm 6.71) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与 Ferrara 等^[13] 研究发现植物叶汞含量高于茎汞一致.通过对比不同区域消落带植物总汞含量发现,开县汉丰湖消落带绝大部分植物汞的含量均高于忠县石宝寨和涪陵珍溪同类型植物 ($P < 0.05$),这可能与消落带所处的地理位置有关,开县汉丰湖消落带地势较高,落干期长而淹水期短,且该区域处于城市中心,受到人为干扰较大;而忠县石宝寨和涪陵珍溪地理位置较为偏僻,受外界环

境的影响较小,且同期开县汉丰湖消落带土壤总汞含量 $[(70.43 \pm 9.12) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 高于忠县石宝寨 $[(60.79 \pm 7.20) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 和涪陵珍溪消落带土壤总汞 $[(56.15 \pm 12.32) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 的含量.

在科属类型最多的禾本科植物中,忠县石宝寨消落带植物根、茎和叶部总汞含量最高的分别是狗牙根 $[(42.27 \pm 6.13) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、狗尾草 $[(8.49 \pm 0.94) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、金色狗尾草 $[(17.34 \pm 4.24) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$;最低的则是稗草 $[(11.23 \pm 5.93) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、野黍 $[(1.62 \pm 0.57) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、狗牙根 $[(3.36 \pm 1.36) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$.涪陵珍溪消落带植物根、茎和叶部总汞含量最高的分别是牛筋草 $[(31.23 \pm 8.51) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、野黍 $[(4.23 \pm 2.95)$

表 3 三峡库区消落带植物甲基汞含量/ $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 MeHg concentrations in plants in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area/ $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$

科	属	样品数 (<i>n</i>)	忠县石宝寨(长江干流)			涪陵珍溪镇(长江干流)		
			根	茎	叶	根	茎	叶
禾本科	狗牙根	7	1 632.04 ± 820.50	422.63 ± 208.63		1 053.43 ± 285.77	317.71 ± 52.69	
	稗草	9	1 257.89 ± 509.19	201.01 ± 103.43	130.64 ± 43.58	1 025.25 ± 296.10	245.65 ± 20.07	127.17 ± 55.42
	金色狗尾草	10	453.88 ± 87.87	85.68 ± 62.88	182.41 ± 109.30	303.00 ± 16.45	72.50 ± 21.05	121.26 ± 51.35
	牛筋草	9	289.80 ± 230.77	50.62 ± 22.21	76.32 ± 49.53	257.43 ± 110.94	49.23 ± 17.50	77.69 ± 32.62
	野黍	9	465.30 ± 165.29	104.49 ± 54.67	420.44 ± 51.03	370.28 ± 57.46	89.26 ± 28.71	246.39 ± 101.81
	牛鞭草	8	253.15 ± 18.52	53.91 ± 28.44	164.37 ± 56.50	—	—	—
	荩草	10	—	—	—	—	—	—
	马唐	10	257.10 ± 30.69	198.41 ± 128.45	225.88 ± 10.70	—	—	—
	狗尾草	8	268.44 ± 82.33	30.87 ± 16.02	98.91 ± 51.60	—	—	—
菊科	苍耳	5	625.45 ± 262.94	280.69 ± 121.06	182.06 ± 48.94	895.65 ± 177.83	84.85 ± 16.96	44.70 ± 29.17
	狼把草	5	739.37 ± 311.19	256.54 ± 116.51	142.27 ± 25.39	426.81 ± 60.27	250.66 ± 66.34	64.15 ± 19.90
	醴肠	8	283.93 ± 236.31	108.54 ± 66.93	44.17 ± 20.88	211.10 ± 33.72	144.18 ± 20.80	147.79 ± 70.11
	黄花蒿	10	—	—	—	377.69 ± 82.22	121.92 ± 7.65	373.07 ± 111.34
	小蓬草	10	594.61 ± 288.34	206.51 ± 77.58	216.24 ± 79.88	—	—	—
	钻形紫菀	9	—	—	—	—	—	—
	翅果菊	5	—	—	—	—	—	—
蓼科	酸模叶蓼	5	761.67 ± 271.05	160.05 ± 90.55	117.34 ± 42.46	441.76 ± 67.40	192.11 ± 48.70	117.08 ± 26.30
	长次酸模	9	313.38 ± 133.14	75.85 ± 48.82	142.81 ± 14.85	—	—	—
	杠板归	5	—	—	—	—	—	—
豆科	草木樨	7	311.97 ± 177.21	39.38 ± 28.04	112.09 ± 42.13	321.56 ± 57.13	49.14 ± 23.21	110.31 ± 4.89
	合萌	5	498.82 ± 260.64	178.73 ± 21.79	97.34 ± 10.75	—	—	—
莎草科	香附子	6	358.47 ± 218.01	211.41 ± 47.23	88.39 ± 7.34	—	—	—
	碎米莎草	8	—	—	—	—	—	—
	异型莎草	9	—	—	—	200.90 ± 36.73	110.30 ± 26.94	460.30 ± 97.65
苋科	空心莲子草	6	820.25 ± 264.08	111.51 ± 51.03	206.47 ± 29.75	1 393.59 ± 462.83	95.32 ± 41.02	368.36 ± 79.19
	刺苋	5	—	—	—	86.02 ± 13.22	47.14 ± 24.30	63.90 ± 25.37
	青葙	5	—	—	—	140.93 ± 63.10	161.76 ± 64.25	337.97 ± 42.98
大戟科	铁苋菜	8	295.24 ± 185.09	54.28 ± 30.21	19.30 ± 11.48	—	—	—
藜科	土荆芥	10	—	—	—	88.11 ± 28.64	94.61 ± 40.02	54.47 ± 16.77
茄科	龙葵	5	—	—	—	111.70 ± 32.09	62.03 ± 11.84	146.57 ± 11.18
伞形科	野胡萝卜	5	—	—	—	—	—	—
千屈菜科	水苋菜	9	—	—	—	359.33 ± 91.91	352.20 ± 49.27	60.92 ± 32.00
桑科	葎草	7	—	—	—	—	—	—
柳叶菜科	假柳叶菜	5	—	—	—	410.59 ± 150.93	148.22 ± 44.03	262.08 ± 33.60
玄参科	母草	10	—	—	—	732.01 ± 269.59	312.67 ± 81.04	15.27 ± 7.09
科	属	样品数 (<i>n</i>)	开县汉丰湖(长江支流)					
			根	茎	叶			
禾本科	狗牙根	7	1 785.77 ± 963.64			489.38 ± 152.37		
	稗草	9	1 640.09 ± 451.76	339.01 ± 96.70			307.34 ± 75.20	
	金色狗尾草	10	903.88 ± 44.25	85.68 ± 22.43			182.41 ± 4.31	
	牛筋草	9	—	—			—	
	野黍	9	—	—			—	
	牛鞭草	8	256.77 ± 87.78	135.18 ± 15.30			202.80 ± 20.53	
	荩草	10	392.11 ± 162.78	332.05 ± 195.06			130.23 ± 61.20	
	马唐	10	—	—			—	
	狗尾草	8	—	—			—	
菊科	苍耳	5	845.45 ± 88.82	488.04 ± 132.98			156.66 ± 52.36	
	狼把草	5	822.58 ± 321.36	353.96 ± 103.44			182.17 ± 91.62	
	醴肠	8	—	—			—	
	黄花蒿	10	697.57 ± 389.99	284.38 ± 44.60			279.88 ± 120.58	
	小蓬草	10	650.59 ± 230.55	286.64 ± 26.26			292.28 ± 128.58	
	钻形紫菀	9	566.91 ± 247.12	289.01 ± 37.99			129.58 ± 22.53	
	翅果菊	5	288.93 ± 339.07	352.14 ± 99.12			125.25 ± 44.18	

续表 3

科	属	样品数 (n)	开县汉丰湖(长江支流)		
			根	茎	叶
蓼科	酸模叶蓼	5	1 183.61 ± 323.98	225.34 ± 93.35	214.31 ± 53.72
	长次酸模	9	—	—	—
	杠板归	5	190.35 ± 39.04	133.29 ± 54.64	106.34 ± 32.66
豆科	草木樨	7	436.88 ± 176.47	182.55 ± 60.55	165.92 ± 2.35
	合萌	5	498.82 ± 220.95	178.73 ± 62.96	97.34 ± 22.91
莎草科	香附子	6	—	—	—
	碎米莎草	8	180.39 ± 69.52	34.60 ± 9.52	269.28 ± 105.02
	异型莎草	9	819.96 ± 256.51	160.61 ± 73.05	588.91 ± 247.87
苋科	空心莲子草	6	1 974.67 ± 946.10	61.59 ± 16.87	314.56 ± 99.26
	刺苋	5	—	—	—
	青葙	5	121.37 ± 18.33	160.61 ± 297.22	185.52 ± 86.99
大戟科	铁苋菜	8	—	—	—
藜科	土荆芥	10	—	—	—
茄科	龙葵	5	176.38 ± 30.46	137.32 ± 66.33	198.36 ± 29.54
伞形科	野胡萝卜	5	905.83 ± 150.71	521.38 ± 85.02	165.85 ± 66.22
千屈菜科	水苋菜	9	—	—	—
桑科	葎草	7	517.38 ± 237.88	236.22 ± 82.24	367.69 ± 99.48
柳叶菜科	假柳叶菜	5	—	—	—
玄参科	母草	10	—	—	—

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]、金色狗尾草 $[(11.26 \pm 6.25) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$; 最低的则是稗草 $[(10.63 \pm 4.62) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、牛筋草 $[(1.67 \pm 1.37) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、狗牙根 $[(4.78 \pm 0.53) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$. 开县汉丰湖消落带植物根、茎和叶部总汞含量最高的分别是狗牙根 $[(49.42 \pm 3.93) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、苎草 $[(19.23 \pm 5.54) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、牛鞭草 $[(9.00 \pm 0.37) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$; 最低的则是苎草 $[(7.84 \pm 3.67) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、稗草 $[(4.69 \pm 2.08) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、狗牙根 $[(6.93 \pm 3.98) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$). 其余科属中,除了忠县石宝寨消落带植物大戟科铁苋菜根部 $[(44.14 \pm 8.34) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、开县汉丰湖消落带苋科青葙茎部 $[(36.42 \pm 4.42) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 和豆科合萌叶部 $[(35.61 \pm 6.22) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 总汞含量相对较高外,其余科属植物根、茎和叶总汞含量都较低,范围在 $(1.90 \pm 0.20) \sim (34.64 \pm 9.89) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与国内外研究所报道的大多数地区植物汞含量相一致^[14]. 优势植物苍耳其叶部汞含量高于根部,这可能是由于苍耳叶面积大,叶片不仅可以通过气孔吸收大气汞,也可以从降水中吸收汞^[15, 16].

2.3 植物甲基汞的分布特征

一般来说,甲基汞在植物体内的含量较低,一般占总汞5%以下,这与土壤中甲基汞的含量非常一致,但一些生长于生物甲基化能力较强场所的植物甲基汞百分含量则会较高^[17]. 从三峡库区消落带植物各部位甲基汞含量分布情况来看(表3),对于

同种植物而言,开县汉丰湖(支流)消落带植物各部位的甲基汞含量高于其他两个区域消落带植物;而同期开县汉丰湖土壤甲基汞含量 $[(1\,387.51 \pm 35.5) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 高于忠县石宝寨 $[(412.96 \pm 28.77) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 和涪陵珍溪 $[(459.10 \pm 8.13) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$.

在禾本科植物中,3个区域消落带的狗牙根甲基汞含量最高,其根部含量在 $(1\,053.43 \pm 285.77) \sim (1\,785.77 \pm 963.64) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,茎叶部含量在 $(317.71 \pm 52.69) \sim (489.38 \pm 152.37) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,这可能与狗牙根的特性有关,它具有发达的根状茎和匍匐茎且能够忍耐长期深淹胁迫^[18],三峡库区消落带长期处于干湿交替的环境下,而淹水环境有利于土壤甲基汞的生成,狗牙根长期生活在淹水环境下,能够富集更多的甲基汞. 忠县石宝寨消落带植物根、茎部甲基汞含量最高的植物均为狗牙根,分别为 $(1\,632.04 \pm 820.50) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(422.63 \pm 208.63) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶部含量最高的则是野黍 $[(420.44 \pm 51.03) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$;而根、茎和叶含量最低的植物是牛鞭草 $[(253.15 \pm 18.52) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、狗尾草 $[(30.87 \pm 16.02) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、牛筋草 $[(76.32 \pm 49.53) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$. 涪陵珍溪消落带植物根、茎部甲基汞含量最高的植物也均是狗牙根,分别为 $(1\,053.43 \pm 285.77) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(317.71 \pm 52.69) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶部含量最高的植物是野黍 $[(246.39 \pm 101.81) \text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}]$;而根、茎和叶含量最低的植物则是牛筋草,分别为 $(257.43 \pm$

110.94)、(49.23 ± 17.50) 和 (77.69 ± 32.62) ng·kg⁻¹。开县汉丰湖消落带植物根、茎部甲基汞含量最高的植物均是狗牙根, 分别为 (1 785.77 ± 963.64) ng·kg⁻¹ 和 (489.38 ± 152.37) ng·kg⁻¹, 叶部含量最高的是稗草 [(307.34 ± 75.20) ng·kg⁻¹]; 最低的植物则是牛鞭草 [(256.77 ± 87.78) ng·kg⁻¹]、金色狗尾草 [(85.68 ± 22.43) ng·kg⁻¹] 和荇草 [(130.23 ± 61.20) ng·kg⁻¹]。3 个区域消落带金色狗尾草、牛筋草、野黍、牛鞭草、荇草、马唐和狗尾草各部位甲基汞含量为根 > 叶 > 茎; 而稗草和苍耳各部位甲基汞含量则是根 > 茎 > 叶。在菊科植物中, 3 个区域消落带植物苍耳根部和茎部甲基汞含量较高, 分别为 (895.65 ± 177.83) ng·kg⁻¹ 和 (488.04 ± 132.98) ng·kg⁻¹, 而叶部则是涪陵珍溪镇黄花蒿最高, 为 (373.07 ± 111.34) ng·kg⁻¹。其余科属植物中, 消落带优势种苋科空心莲子草根部分甲基汞含量最高, 为 (1 974.67 ± 946.10) ng·kg⁻¹, 而藜科土荆芥其根、茎和叶甲基汞含量都相对较低, 其中茎部甲基汞含量最低的为碎米莎草 [(34.60 ± 9.52) ng·kg⁻¹], 玄参科植物母草叶部甲基汞含量最低, 为 (15.27 ± 7.09) ng·kg⁻¹。

植物将甲基汞吸收至体内后进行各器官的再分配, 有的植物只将少量甲基汞向地上部分转移, 而大量囤积于根部如狗牙根、稗草、酸模叶蓼和空心莲子草等; 有的植物虽然生长在同一区域, 却只吸收少量的甲基汞, 如母草; 还有的植物叶部的甲基汞含量高于其根部和茎部, 如龙葵、青葙等, 这可能是由于这种植物对甲基汞的转移能力较强。

2.4 消落带优势植物总汞和甲基汞的累积特征

生物富集系数 (bioaccumulation factor, BAF) 以及转移系数 (transfer factor, TF) 是描述植物体内重金属累积特征的常数。其中生物富集系数是指植物体内某种重金属浓度与土壤中同种浓度的比值^[19], 富集系数反映植物对重金属的富集能力, 富集系数越大, 则富集能力越强。转移系数是植物地上部分重金属的含量除以植物根中该重金属的含量, 反映了该植物吸收重金属后, 从根部向茎、叶转移的能力^[20]。从生物富集系数来看, 几种优势植物对总汞的富集能力都较弱, BAF < 1 (见表 4), 这说明 3 个区域消落带的优势植物对总汞都有一定的耐受能力, 但是这 3 个区域消落带植物体内汞的浓度远没有达到超富集植物的临界标准 (> 3.5 mg·kg⁻¹)^[21], 因此不具备超富集植物的特征; 而消落带这几种优势植物对甲基汞的富集能力都较强, BAF > 1, 有研究证明植物可以通过叶片气孔的呼吸作用从大气中吸收甲基汞^[14], 但主要还是通过根部从土壤和土壤溶液中吸收和富集甲基汞^[21], 且消落带淹水后会促进土壤甲基汞的生成^[8], 这也可能是导致植物甲基汞富集较强的原因之一。从转移系数来看, 苍耳、狼把草、酸模叶蓼以及空心莲子草对总汞运输能力较强, TF > 1, 其中苍耳最强其 TF 值达到 (2.35 ± 1.05), 最弱的狗牙根其 TF 为 0.13 ± 0.04; 对于甲基汞而言, 转移能力最强的则是狼把草 TF 为 0.64 ± 0.10, 这几种优势植物 TF < 1, 表明这些植物吸收甲基汞后向地上部分转移的能力较弱, 这可能是由于根部与其他组织间有很强的阻碍汞迁移的机制所致^[21, 22]。

表 4 三峡库区消落带优势植物的生物富集系数与转移系数

Table 4 Bioaccumulation factor (BAF) and transfer factor (TF) of dominant plants in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

科属	植物名称	总汞		甲基汞	
		BAF	TF	BAF	TF
禾本科	狗牙根	0.72 ± 0.10	0.13 ± 0.04	3.20 ± 1.68	0.28 ± 0.02
禾本科	稗草	0.45 ± 0.18	0.84 ± 0.09	2.85 ± 1.11	0.34 ± 0.07
禾本科	金色狗尾草	0.79 ± 0.16	0.62 ± 0.27	1.23 ± 0.47	0.51 ± 0.19
菊科	苍耳	0.49 ± 0.06	2.35 ± 1.05	1.98 ± 0.81	0.55 ± 0.35
菊科	狼把草	0.71 ± 0.15	1.79 ± 0.11	1.78 ± 0.90	0.64 ± 0.10
蓼科	酸模叶蓼	0.77 ± 0.08	1.07 ± 0.42	1.77 ± 0.68	0.48 ± 0.19
苋科	空心莲子草	0.95 ± 0.08	1.89 ± 0.46	2.83 ± 1.18	0.30 ± 0.10

2.5 消落带优势植物汞储存量估算

三峡水库独特的调节方式, 使得大面积平缓消落带在落干期生长植被吸收土壤及大气的汞并储存汞。通过对三峡库区消落带主要优势植物 (狗牙根、

稗草、金色狗尾草、苍耳、狼把草、酸模叶蓼和空心莲子草) 的加权平均浓度及植物汞储存量公式计算得出, 三峡库区消落带 4 个高程植物总汞及甲基汞储存量存在差异 (见表 5), 总汞储存量由高到低

表 5 沿高程梯度消落带汞储量分布

Table 5 Distribution of carbon storage along elevation grade in drawdown area of THg and MeHg

项目	下部	中部		上部	总计
	145 ~ 150 m	150 ~ 160 m	160 ~ 170 m	170 ~ 175 m	145 ~ 175 m
总汞/mg·hm ⁻²	145.3	166.4	124.3	88.2	524.2
甲基汞/mg·hm ⁻²	1.9	2.7	3.6	3.2	11.4

依次为 150 ~ 160、145 ~ 150、160 ~ 170 和 170 ~ 175 m,而甲基汞依次为 160 ~ 170、170 ~ 175、150 ~ 160 和 145 ~ 150 m. 不同高程植物汞储存量不仅与植物群落分布有密切关系,同时也与不同高程消落带土壤生物可利用性汞含量有关^[24],另外干湿交替下消落带土壤养分有所变化^[25],也直接或间接的影响到了植物汞储量.

3 结论

(1)本研究所调查的三峡库区消落带植物优势自然植被为一年生草本植物,所调查的植物汞含量均在正常范围内,开县汉丰湖消落带植物各部位总汞和甲基汞含量均高于其他两个区域消落带的同类植物,说明城市污染及人为活动的干扰对三峡库区消落带汞含量有明显的影响. 不同植物对总汞和甲基汞的吸收能力不同,同一植物各部位对总汞和甲基汞的吸收也有差异. 植物各部位总汞含量均呈根>叶>茎的趋势分布,而甲基汞含量则是根部高于茎部、叶部.

(2)在三峡库区消落带所调查的植物对汞吸收都没有达到超临界植物规定的临界值,但其主要优势植物对汞均有一定的耐受性,对总汞的富集能力较弱而对甲基汞的富集能力则较强. 其中狗牙根、狗尾草、牛筋草对总汞有明显的吸收,狗牙根、酸模叶蓼和空心莲子草对甲基汞有明显的吸收,这几种禾本植物可以作为消落带降低汞污染的先锋物种.

(3)消落带植被地上生物量呈先增加后减小的变化趋势,即消落带下部<消落带上部<消落带中部. 不同高程地上部分汞储存量分配格局存在差异,其中消落带中部即 160 ~ 170 m 高程最高,其群落中湿地植物及生物量也较多,该高程淹水时间在 5 ~ 6 个月,植物长时间淹水既利于汞的释放又利于无机汞向甲基汞转化.

参考文献:

[1] Heyes A, Moore T R, Rudd J W M. Mercury and methylmercury in decomposing vegetation of a pristine and impounded wetland [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27 (3): 591-599.

[2] Jackson T A. The mercury problem in recently formed reservoirs of northern Manitoba (Canada): effects of impoundment and other factors on the production of methyl mercury by microorganisms in sediments [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1988, 45 (1): 97-121.

[3] 李楚娴,孙荣国,王定勇,等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 [J]. 环境科学, 2014, 35 (7): 2721-2727.

[4] 牛志明,解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考 [J]. 科技导报, 1998, (4): 61-62.

[5] Guentzel J L, Landing W M, Gill G A, et al. Mercury and major ions in rainfall, throughfall, and foliage from the Florida Everglades [J]. Science of the Total Environment, 1998, 213 (1-3): 43-51.

[6] Hanson P J, Lindberg S E, Tabberer T A, et al. Foliar exchange of mercury vapor: Evidence for a compensation point [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, 80 (1-4): 373-382.

[7] Grigal D F. Inputs and outputs of mercury from terrestrial watersheds: a review [J]. Environmental Reviews, 2002, 10 (1): 1-39.

[8] Pergent-Martini C. *Posidonia oceanica*: a biological indicator of past and present mercury contamination in the mediterranean sea [J]. Marine Environmental Research, 1998, 45 (2): 101-111.

[9] 张成,宋丽,王定勇,等. 三峡库区消落带甲基汞变化特征的模拟 [J]. 中国环境科学, 2014, 34 (2): 499-504.

[10] 张翔,张成,孙荣国,等. 三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35 (12): 4560-4566.

[11] 仇广乐,冯新斌,梁琰,等. 溶剂萃取-水相乙基化衍生 GC-CVAFS 联用测定苔藓样品中的甲基汞 [J]. 分析测试学报, 2005, 24 (1): 29-32.

[12] 何天容,冯新斌,戴前进,等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定沉积物及土壤中的甲基汞 [J]. 地球与环境, 2004, 32 (2): 83-86.

[13] Ferrara R, Maserti B E, Breder R. Mercury in Abiotic and biotic compartments of an area affected by a geochemical anomaly (Mt. Amiata, Italy) [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, 56 (1): 219-233.

[14] Barghigiani C, Ristori T, Bauleo R. *Pinus* as an atmospheric Hg biomonitor [J]. Environmental Technology, 1991, 12 (12): 1175-1181.

[15] Ericksen J A, Gustin M S, Schorran D E, et al. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37 (12): 1613-1622.

- [16] Xiao Z, Sommar J, Lindqvist O, *et al.* Atmospheric mercury deposition to grass in southern Sweden[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **213**(1-3): 85-94.
- [17] Horvat M, Nolde N, Fajon V, *et al.* Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **304**(1-3): 231-256.
- [18] 杨玉泉, 陈海生. 山地水库消落带狗牙根耐淹性研究[J]. *河南农业科学*, 2013, **42**(9): 66-68.
- [19] Zu Y Q, Yuan L, Schvartz C, *et al.* Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China [J]. *Environment International*, 2004, **30**(4): 567-576.
- [20] Zhou Q X, Song Y F. The Principle and method of remediation of contaminated soil[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] 王美林, 孔令韶, 胡肆慧, 等. 贵州万山汞矿地区的植物及植物积累汞的研究[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1983, **7**(1): 20-30.
- [22] Schwesig D, Krebs O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2003, **253**(2): 445-455.
- [23] Cavallini A, Natali L, Durante M, *et al.* Mercury uptake, distribution and DNA affinity in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) plants [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **243-244**: 119-127.
- [24] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [25] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1035-1039.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行