

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征

许议元¹, 曾玲霞¹, 何天容^{1*}, 陈梦瑜¹, 钱晓莉², 李振吉³

(1. 贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害防治实验室, 贵阳 550003; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003; 3. 贵州草海国家级自然保护区管理局, 威宁 553100)

摘要:以国家自然保护区贵州草海湿地为研究对象, 系统采集草海湖中深水区和湖边浅水区生长的底栖动物, 测定其总汞和甲基汞, 探讨底栖动物汞和甲基汞分布特征及其对沉积物汞的响应特征, 并评估了其面临的汞污染风险. 结果表明, 底栖动物总汞含量范围为 0.51~46.55 ng·g⁻¹ (均值 7.82 ng·g⁻¹), 甲基汞含量范围为 0.04~27.71 ng·g⁻¹ (均值 4.31 ng·g⁻¹), 低于其他自然保护区报道的底栖动物的汞含量. 对比发现, 夏季底栖动物总汞和甲基汞含量均高于其他季节; 湖边点底栖动物总汞和甲基汞含量均高于湖中点同种类底栖动物汞含量, 这与沉积物中甲基汞含量的空间分布特征一致, 却与沉积物总汞含量空间分布特征相反, 且中华圆田螺甲基汞含量与沉积物甲基汞含量呈显著相关($r=0.52$, $P<0.05$), 表明湖边浅水区沉积物汞的甲基化程度、生物可利用性都明显高于湖中深水区. 湖中湖边沉积物有机质的含量差异以及湖边沉积物存在干湿交替可能导致了这种明显的差异. 底栖动物对水体或沉积物总汞和甲基汞的富集系数均较高, 这些高富集系数足以引起对草海湿地水生食物链中汞污染风险的重视.

关键词:草海; 底栖动物; 总汞; 甲基汞; 风险评估

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2953-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201709259

Mercury Distribution of Benthic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province

XU Yi-yuan¹, ZENG Ling-xia¹, HE Tian-rong^{1*}, CHEN Meng-yu¹, QIAN Xiao-li², LI Zhen-ji³

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. School of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 3. National Nature Reserve of Caohai, Weining 553100, China)

Abstract: Caohai wetland is a National Nature Reserve. Benthic animals were collected from the deep-water area in the middle of Caohai Lake and the shallow-water area in the surrounding marshes, and mercury and methyl mercury distributions in the benthic animals were analyzed and discussed. The risk of mercury pollution was evaluated. The concentrations of total mercury and methyl mercury in the benthic animals were in the range of 0.51~46.55 ng·g⁻¹ with an average of 7.82 ng·g⁻¹ and 0.04~27.71 ng·g⁻¹ with an average of 4.31 ng·g⁻¹, respectively. This was lower than reports from other natural reserves. By contrast, the total mercury and methyl mercury in the benthic animals in summer were higher than in other seasons, which was consistent with the characteristics of methyl mercury distribution in sediments but opposite to the spatial distribution characteristics of total mercury in sediments. The methyl mercury contents in *Cipangopaludina cathayensis* were positively correlated with the content of methyl mercury in the sediments ($r=0.52$, $P<0.05$). The results showed methylation and the bioavailability of mercury in sediments from the shallow-water area were obviously higher than those from the deep-water area in the middle of Caohai Lake. The difference in organic matter content of the sediment or the wet-dry alternation (flooding-receding-flooding) in the surrounding shallow marshes was suspected to be associated with the obvious difference. The high enrichment coefficient of total mercury and methyl mercury in benthic animals were sufficient to raise the risk of mercury contamination in the aquatic food chain in the wetland.

Key words: Caohai; benthic animals; total mercury; methyl mercury; risk assessment

汞(Hg)是一种有毒有害重金属元素. 自日本暴发的水俣病事件后, 汞这一全球性污染物越来越受到关注. 汞及其化合物尤其是有机汞毒性很强, 可以在环境和生物体内长期富集, 特别是在湿地生态系统中富集更为显著. 湿地中含有丰富的能与汞生成络合物的可溶性碳和腐殖酸, 能吸附大气沉降、径流输入和农业面源等输入的汞, 沉积物中的硫酸盐还原菌、产甲烷菌、铁还原菌等再将部分汞转化成甲基汞(MeHg), 在湿地生态系统中经食物

链逐级放大, 并最终通过人类食用鱼、虾、田螺、贝类等而对人体健康造成威胁.

底栖动物是水生生态系统中重要的组成部分, 已被广泛应用于水体的生态评价和生物监测. 国外

收稿日期: 2017-09-28; 修订日期: 2017-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41363007); 贵州省重点学科建设项目(黔学位合字 ZDXK[2016]11 号)

作者简介: 许议元(1992~), 男, 硕士, 主要研究方向为汞的环境地球化学, E-mail: 2513086435@qq.com

* 通信作者, E-mail: hetianrong@139.com

对大型底栖动物的研究比较早,1909年 Kolkwitz 等^[1]首次提出将大型底栖动物作为河流评价的指示生物.许多大型底栖生物如螺类、虾类等成为鸟类和鱼类等其他动物的直接食物来源,人类也从湿地中捕获大量可食性底栖动物^[2].多数底栖动物长期生活在底泥中,具有区域性强,迁移能力弱等特点,对于环境污染及变化通常少有回避能力^[3],其群落的破坏和重建需要相对较长的时间.底栖动物在水体生态系统中起着重要的作用,是物质循环、能量流动中积极的消费者和转移者,同时还参与水环境污染的自净过程^[4].底栖动物的群落结构、优势种类、数量等参量直接反映了水质和水体生态系统的稳定性,被广泛应用于评价重金属污染及其通过食物网对生物地球化学循环造成的影响^[5,6].有研究表明沉积物重金属对底栖动物具有显著的毒性效应^[7,8],而且可通过食物链富集放大,对生态系统产生毒性效应,威胁生态系统和人类的健康^[9~11].

贵州威宁草海湿地是国家级自然保护区,包括深水域、浅水沼泽和莎草湿地、草甸.草海水生动植物种类丰富,水生生物群落生产力较高,系统功能和结构较完整,是我国典型的亚热带高原湿地生态系统代表.草海曾遭受到大量生活生产废水和周围铅锌冶炼的污染^[12~14],重金属进入水体后一般都沉积于底泥中,因此湖泊沉积物是水体污染物的主要蓄积场所,也是湖泊的潜在污染源.钱晓莉^[15]分析了草海中水和沉积物中汞以及甲基汞的分布特征,但未对汞在草海生物链中的富集特征进行研究.本研究通过测定草海湿地系统底栖动物中汞和甲基汞含量,探究其总汞和甲基汞富集分布规律并评估其生态风险,对保护这个特殊的生态系统有重要意义.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

草海位于贵州省西部威宁彝族苗族回族自治县的西南面(图1),地处东经 $104^{\circ}10'$ ~ $104^{\circ}25'$,北纬 $26^{\circ}45'$ ~ $27^{\circ}00'$,海拔2 172~2 234 m.水深为1~3 m左右,草海植被覆盖面积保持在 30 km^2 以上,其核心区域面积共2 162.05 km^2 .草海底栖动物种类丰富,陈方银等^[16]调查研究发现:大型底栖动物共29种,昆虫纲和腹足纲为绝对优势种,分别为6种、16种,寡毛纲2种,蛭纲2种,甲壳纲2种,瓣鳃纲1种.物种分析表明纹沼螺、静水椎实螺、

赤豆螺、雕翅摇蚊、卵萝卜螺、葛氏米虾、梨形环棱螺、环足摇蚊为草海湿地优势种.

本研究中,底栖动物采样点分为湖中深水区 and 周边浅水区两大类.CL表示湖内深水区采样点,是指草海湖内深水区域(水深1~3 m),SL表示周边浅水区采样点,是指靠近岸边的浅水区域(水深 $\leq 0.5\text{ m}$).本研究共设置9个湖内采样点,8个周边采样点.采样点的布设旨在均匀覆盖湖面和湖边可采集的微点,以便将湖内采样点和周边采样点的研究结果进行对比,观察草海各采样点样品汞含量的分布规律,分析其影响因素.详细采样点位置如图1,采样点的定位均采用便携式全球定位仪(GPS)定位.

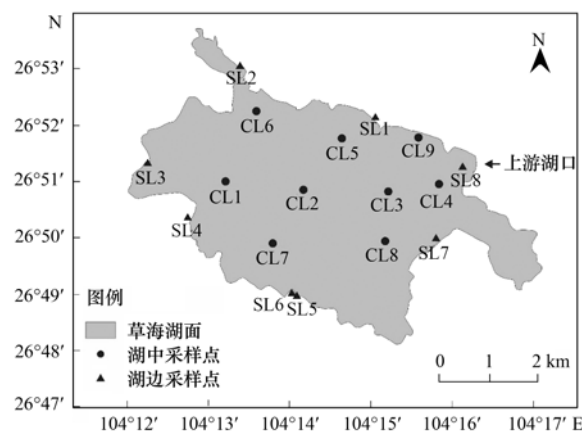


图1 草海湿地采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Caohai Wetland

1.2 样品采集

本研究中的底栖动物采集于丰水期(2014年8月)、枯水期(2015年1月)、平水期(2015年5月),主要通过两种方法收集草海优势底栖动物或个体较大的底栖动物用于汞含量分析:①用 $1/16\text{ m}^2$ 改良型彼得孙采泥器采样,现场用塑料镊子检出较大型底栖动物,用去离子水洗净后分类装到样品保鲜袋中,当天带回草海管理局实验室冷冻.②收集各采样点附近地笼(置于水下的固定渔网)中的底栖动物,用去离子水洗净后分类装到样品保鲜袋中,当天带回草海管理局实验室冷冻.用于种类鉴定的样品用 $1/16\text{ m}^2$ 改良型彼得孙采泥器采集,现场用80目筛筛洗后装入样品瓶中,用75%酒精固定,带回室内分检、鉴定.

1.3 样品分析

底栖动物总汞:动物总汞采用二酸消解,两次金汞齐富集结合冷原子荧光光谱法测定^[17]:①动物样品解冻后,去离子水洗净,称取精确至0.000 1 g

的动物肌肉(田螺取软体部分)鲜样 0.5 ~ 1.0 g(标样称取 0.1 ~ 0.2 g)于 25 mL 比色管中,加入优级纯 H₂SO₄ 和优级纯 HNO₃ 混合酸 10 mL(3:7, 体积比),比色管口用保鲜膜封口,然后用加热板加热到 95 ~ 140℃ 约 2 ~ 3 h,冷却后加入少量水;②加入 0.5 mL BrCl,超纯水定容至接近刻度线 25 mL,封口胶密封后放置 24 h 以上,将各形态 Hg 氧化为 Hg²⁺;③测定前加入 200 μL 的 NH₂OH·HCl 去除游离态卤素并准确定容至 25 mL;④在气泡瓶中加入约 50 mL 超纯水、0.5 mL 优级纯 HNO₃、3 mL SnCl₂ 和 1 mL 消解的处理样,SnCl₂ 将 Hg²⁺ 还原为汞蒸气,以纯氮作载气,用金捕管进行汞蒸汽富集;⑤使用 CVAFS 汞分析仪进行分析测定(MODEL III 型, U. S. A Brooks Rand LLC).

底栖动物甲基汞:动物甲基汞采用碱消解结合 GC-CVAFS 法测定^[18]:①称取精确至 0.000 1 g 的动物样品 0.5 ~ 1.0 g(标样 0.1 ~ 0.2 g)置于 50 mL 离心管中,加入 5 mL 200 g·L⁻¹ 的 KOH 溶液,在 75℃ ± 3℃ 水浴锅中水浴消解 3 h,随后用 60℃ 超纯水定容至 25 mL,摇匀待测;②装有 80 mL 超纯水的反应瓶中依次加入 50 μL 待测样、200 μL 缓冲溶液及

100 μL 乙基化试剂,立即盖上瓶盖摇匀,反应 15 min. 以纯氮作载气,用 TENAX 管进行有机汞富集;③使用 GC-CVAFS 汞分析仪进行分析测定.

1.4 质量控制

样品处理与分析质量采用试剂空白、平行重复样和标准参考样品(TORT-2)进行控制. 标准工作曲线线性回归系数 $R > 0.998 4$, 标准样品总汞和甲基汞测定次数分别为 6 次,测定结果回收率 $[(测定值/标准参考值) \times 100\%]$ 为 90% ~ 110%,平行样品的相对偏差小于 10%,实验结果可靠.

1.5 数据处理

本研究中,数据均使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 11.0 统计软件进行数据分析及差异显著性检验,使用 Origin 8.6 进行相关图件的绘制.

2 结果与分析

2.1 底栖动物

本研究用来分析汞和甲基汞的底栖动物主要包括秀丽白虾、中华圆田螺、摇蚊幼虫、蜻蜓幼虫等 9 种底栖动物,详细样品信息见表 1.

表 1 草海湿地底栖动物样品信息
Table 1 Sample information for benthic animals in Caohai Wetland

种类	科	纲	门	生活类型
秀丽白虾(<i>Exopalaemon modestus</i>)	长臂虾科	甲壳纲	节肢动物门	自由移动型
蜻蜓幼虫(<i>Dragonfly larva</i>)	蟌科	昆虫纲	节肢动物门	自由移动型
小划椿(<i>Sigara subtrai</i>)	划椿科	昆虫纲	节肢动物门	自由移动型
摇蚊幼虫(<i>Chironomid larvae</i>)	摇蚊科	昆虫纲	节肢动物门	自由移动型
水蚌(<i>Anodonta woodiana woodiana</i>)	珠蚌科	瓣鳃纲	软体动物门	底埋型
中华圆田螺(<i>Cipangopaludina cahayensis</i>)	田螺科	腹足纲	软体动物门	底栖型
豆螺(<i>Bithynia fuchsiana</i>)	觿螺科	腹足纲	软体动物门	底栖型
水蛭(<i>Whitmania pigra whitman</i>)	水蛭科	蛭纲	环节动物门	自由移动型
蝌蚪后期(<i>Rana limnocharis boie</i>)	蛙科	两栖纲	脊索动物门	自由移动型

秀丽白虾、中华圆田螺、蜻蜓幼虫及摇蚊幼虫都大量存在于草海湿地中. 秀丽白虾属食杂性动物,中华圆田螺则以水生植物和低等藻类为食^[19]. 蜻蜓幼虫的早期稚虫以小甲壳动物和原生动物等水生动物为食,后期稚虫以摇蚊幼虫、水生甲虫和螺类为食. 春季采样发现,摇蚊幼虫几乎出现在每一个采样点,摇蚊幼虫是许多鱼类的饵料,也是环境监测和水质评价的指示生物,因其大量摄取水体中的有机碎屑,对污水自净有一定作用^[20].

2.2 底栖动物总汞含量特征

各季节底栖动物样品总汞(THg)含量见表 2. 通过 SPSS 独立性检验可知,不同底栖动物之间的

总汞含量差异性并不显著. 草海湿地中所有底栖动物总汞含量范围为 0.70 ~ 46.55 ng·g⁻¹(均值 7.82 ng·g⁻¹). 与其他区域相比,草海湿地中底栖动物总汞含量明显低于李崇德等对黄海近海甲壳动物(均值 23 ng·g⁻¹)和软体动物(均值 29 ng·g⁻¹)的研究结论^[21],低于张翠对上海市黄浦江上游饮用水源地支流中底栖动物螺蛳的汞含量(32 ng·g⁻¹)的研究结果^[22],也低于刘志刚等对舟山的甲壳类(均值 134 ng·g⁻¹)和贝类(均值 188 ng·g⁻¹)的测定结果^[23],可见草海湿地中底栖动物整体汞含量处在较低水平. 本课题组同一时期对草海沉积物汞含量调查发现,表层沉积物总汞含量范围为 36.5 ~

表 2 夏、冬、春三季底栖动物样品总汞测定结果/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Concentration of THg in benthic animals in summer, winter, and spring/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

样品名称	湖中点		湖边点	
	含量范围	平均值	含量范围	平均值
秀丽白虾	1.19 ~ 12.76	4.49	6.92 ~ 24.09	11.66
中华圆田螺	0.70 ~ 12.01	4.42	2.92 ~ 46.55	15.57
蜻蜓幼虫	3.83 ~ 14.43	6.28	3.70 ~ 19.64	13.48
豆螺	5.51 ~ 6.63	5.87	0.91 ~ 15.12	8.58
水蛭	1.03 ~ 7.43	3.35	3.21 ~ 23.92	15.60
水蚌	7.32	7.32	— ¹⁾	—
蝌蚪后期	4.41 ~ 16.23	8.22	11.57 ~ 14.33	12.95
摇蚊幼虫	3.80	3.80	8.87 ~ 19.26	14.07
小划椿	—	—	13.86	13.86

1) “—”表示文章中没有相关数据

$236.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[24], 相对低于同一流域的红枫湖(平均值 $424\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[25] 和阿哈水库(平均值 $210\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[26] 沉积物总汞含量, 由此可见草海湿地生态系统尚未受到严重汞污染.

2.3 底栖动物甲基汞含量特征

从表 3 可以看出, 不同种类底栖动物体内甲基汞(MeHg)含量差异很大. 从总体来看, 草海湿地中底栖动物甲基汞含量范围为 $0.04\sim15.46\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (均值 $4.31\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 低于 Tremblay 等^[27] 对加拿大

魁北克省一个自然湖泊中水生昆虫的甲基汞含量 ($0.03\sim0.09\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 也低于童银栋等对渤海湾底栖动物中螺类的研究结果 ($30.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[28], 也远低于我国鲜、冻动物性水产品卫生标准(GB 2733-2015)中对动物性水产品甲基汞标准含量 ($\leq 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 这些底栖动物大部分时间生活在底泥中, 受沉积物影响较大, 也受到浮游生物和水生植物的影响, 底栖动物的甲基汞含量均未超标, 说明草海湿地的底栖动物受甲基汞污染较小.

表 3 夏、冬、春三季底栖动物样品甲基汞测定结果

Table 3 Concentration of MeHg in benthic animals in summer, winter and spring

样品名称	湖中点				湖边点			
	含量范围 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	甲基汞比率 /%	平均甲基汞比率 /%	含量范围 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	甲基汞比率 /%	平均甲基汞比率 /%
秀丽白虾	0.04 ~ 5.41	1.32	1.9 ~ 56	29	0.19 ~ 15.46	7.13	2.7 ~ 94	56
中华圆田螺	0.05 ~ 0.66	0.21	0.3 ~ 15	6	0.19 ~ 15.24	3.10	0.7 ~ 55	28
蜻蜓幼虫	3.01 ~ 9.60	4.98	73 ~ 89	79	1.68 ~ 14.19	7.15	40 ~ 72	53
豆螺	0.06 ~ 1.77	0.71	5 ~ 27	11	0.82 ~ 12.08	4.12	17 ~ 90	48
水蛭	0.07 ~ 0.21	0.14	0.9 ~ 20	8	2.67 ~ 8.59	5.52	18 ~ 97	47
蝌蚪后期	0.23 ~ 1.12	0.72	3 ~ 19	10	0.19 ~ 0.53	0.36	1 ~ 5	3
水蚌	0.3	0.3	4	4	— ¹⁾	—	—	—
摇蚊幼虫	3.30	3.30	87	87	6.02 ~ 11.26	8.64	58 ~ 68	63
划椿类	—	—	—	—	10.85	10.85	78	78

1) “—”表示文章中没有相关数据

底栖动物甲基汞与总汞的比率范围为 3% ~ 87%, 各种类底栖动物甲基汞比率差异较大, 其中蜻蜓幼虫和摇蚊幼虫湖边点和湖中点甲基化率均高于 50%, 远高于以食草动物为代表的中华圆田螺平均甲基汞比例(湖中点 6%, 湖边点 28%). 这可能与水生生物的食性有关, 研究文献指出, 肉食性水生生物, 其体内甲基汞在总汞中所占的质量分数往往比其他水生生物要高, 其富集甲基汞的能力也相对较强^[29, 30]. 蜻蜓幼虫在生长过程中以原生动物、摇蚊幼虫和水生甲虫等为食, 摇蚊幼虫主要以水体

中的有机碎屑为食, 比其他底栖动物更容易吸收富集汞和甲基汞. 图 2 给出了所有采集到的底栖动物中甲基汞、总汞含量的线性关系 ($r = 0.65$, $P < 0.01$), 可见底栖动物总汞含量与甲基汞含量相关性极为显著, 这可能是因为水生动物汞含量主要来自于水体或食物中甲基汞的吸收.

3 讨论

3.1 底栖动物总汞和甲基汞季节分布特征

为分析草海底栖动物总汞和甲基汞含量的季节

性变化规律, 选取至少两个季节都能采集到的底栖动物进行分析, 其平均含量如图 3 和图 4 所示。

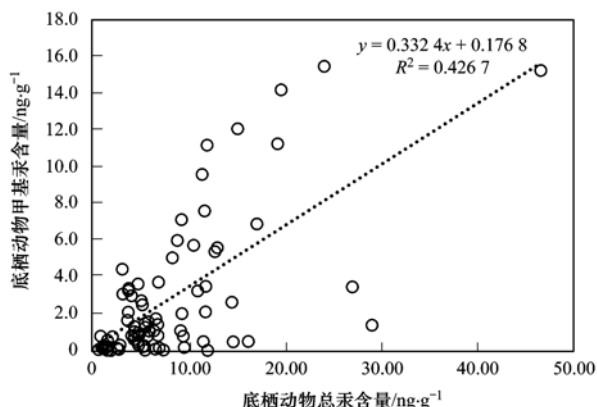


图 2 底栖动物总汞和甲基汞线性关系

Fig. 2 Relationship between MeHg and THg in benthic animals

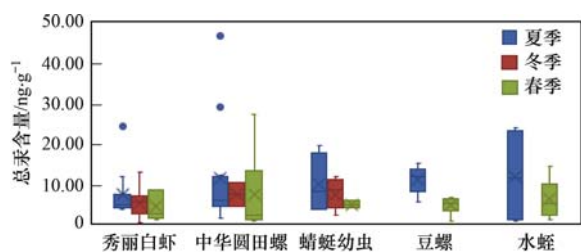


图 3 草海底栖动物总汞含量季节性分布

Fig. 3 Seasonal distribution of THg content in benthic marine animals in Caohai Wetland

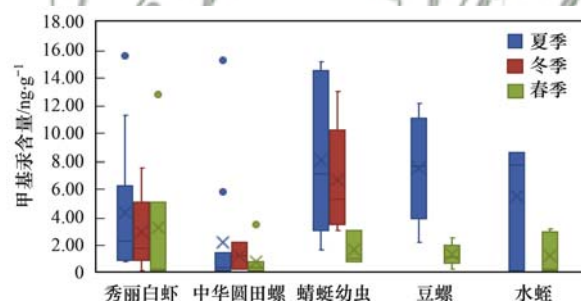


图 4 草海底栖动物甲基汞含量季节性分布

Fig. 4 Seasonal distribution of MeHg content in benthic marine animals in Caohai Wetland

对比发现, 大部分草海底栖动物中夏季总汞和甲基汞含量明显比其他季节高。可能是由于夏季降雨量大, 水体温度升高, 被淹没的植物生物分解加快, 向水体释放大量的有机酸和二价汞, 同时形成厌氧环境, 使得厌氧微生物活动频繁, 加快了无机汞的生物甲基化进程。同时夏季温度升高, 也加快了沉积物甲基汞向水体的释放过程, 从而更容易被底栖动物吸收。很多研究也表明, 在水体淹没形成的缺氧状态下, 有机质降解释放的汞容易在水体和沉积物中甲基化而被底栖动物富集^[31, 32]。此外, 不

同季节底栖动物的物种组成也存在差异, 故对于肉食动物如蜻蜓幼虫来说, 不同季节不同的食物来源也可能是造成体内汞含量存在季节差异的原因之一。

3.2 底栖动物汞与沉积物汞的响应关系

为研究不同采样点同种底栖动物汞含量与沉积物汞含量的关系, 本研究选取生活类型为底栖型其活动范围较小且几乎每个采样点都采集到的中华圆田螺为例来进行分析。与底栖动物采样点对应点位沉积物汞和甲基汞含量见图 5^[24]。从中可以看出, 湖中深水区 (CL) 沉积物总汞含量普遍高于周边浅水区 (SL) 沉积物总汞含量, 而甲基汞分布却恰好相反, 表明湖边浅水区普遍甲基化程度更高。

从图 6 可看出, 中华圆田螺总汞及甲基汞含量均与沉积物总汞不存在相关关系, 但田螺甲基汞与沉积物甲基汞存在显著相关关系 ($r = 0.52$, $P < 0.05$), 田螺总汞虽然与沉积物甲基汞不存在显著相关性, 但也存在相似的分布趋势 ($r = 0.40$, $P = 0.07$) (图 7), 表明底栖动物中总汞和甲基汞浓度主要取决于沉积物中甲基汞而不是总汞浓度。在被底栖动物大量滤食食物颗粒的过程中, 附着在沉积物颗粒上的甲基汞污染物也同时被吸收进体内并蓄积下来^[33], 造成沉积物中的甲基汞被底栖动物所富集。在过去一些研究中也发现, 表层沉积物甲基汞浓度和湖泊中鱼或螺汞含量高度相关^[34-36]。另有研究发现, 底栖动物体内的汞含量及其分布特征除了与水体或沉积物汞含量相关外, 还与其种类、大小、年龄、生理状态、环境和其它理化因子等有关^[2, 37]。

3.3 不同栖息环境对底栖动物汞含量的影响

为研究不同栖息环境对底栖动物的影响, 本研究对比了环境差异较大的湖边采样点和湖中采样点同种底栖动物的总汞和甲基汞含量的差异。湖边采样点水深通常小于 0.5m, 且存在季节干湿交替情况, 而湖中点各季节水深 1~3m, 处于长期淹水状态。湖中深水区域和湖边浅水区域水体温度、溶解氧以及沉积物 pH 差异均不大^[38], 水-沉积物界面氧化还原电位均处于好氧状态, 但湖边点电位稍高于湖中点; 与此相反, 两个区域有机质却存在很大差异, 湖中点沉积物有机质含量 ($31.2\% \pm 7.8\%$) 远高于湖边点 ($9.91\% \pm 19.71\%$), 且有机质含量和沉积物总汞存明显正相关性^[24]。

本研究选取 3 个季节中湖边点与湖中点都采集到的底栖动物进行分析 (秀丽白虾、中华圆田螺、

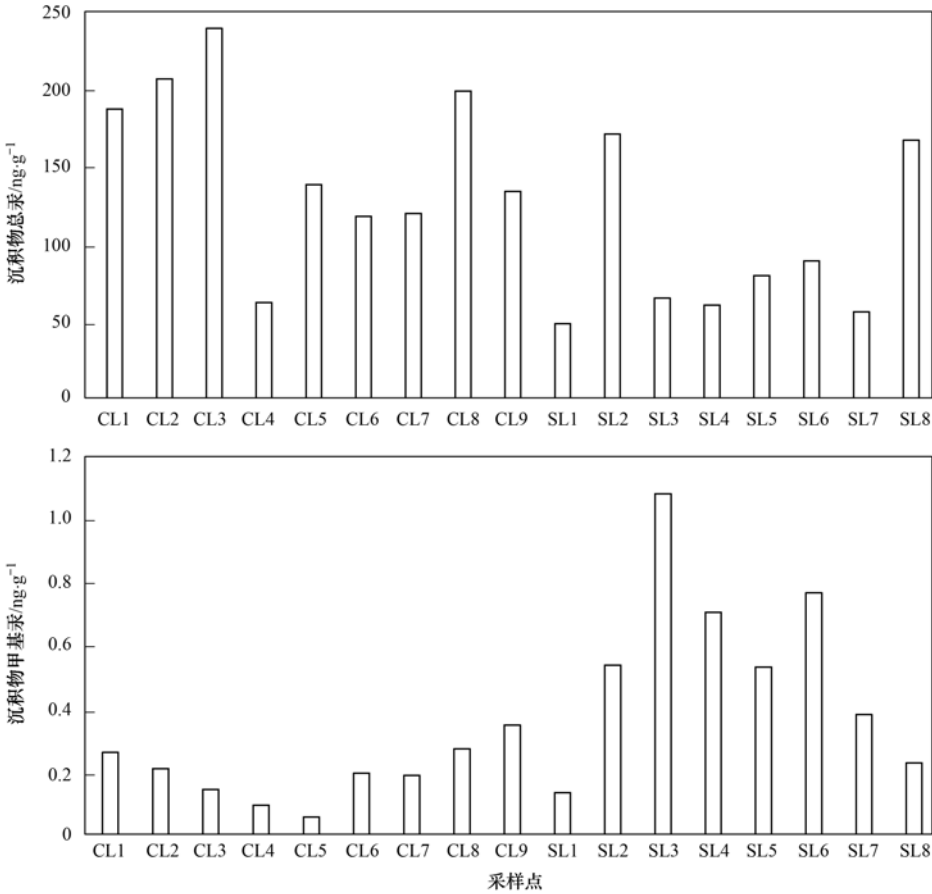


图 5 草海湿地表层沉积物总汞和甲基汞含量分布

Fig. 5 Distributions of THg and MeHg in sediments in Caohai Wetland

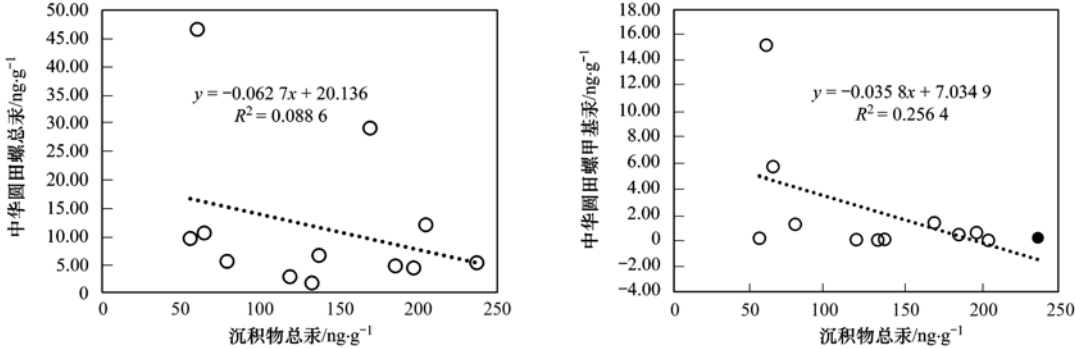


图 6 中华圆田螺总汞、甲基汞含量与沉积物总汞含量关系

Fig. 6 Relationship between MeHg and THg in *Cipangopaludina cahayensis* and THg in sediments

蜻蜓幼虫、豆螺、水蛭、摇蚊幼虫), 可以发现湖边浅水区底栖动物总汞和甲基汞含量均明显高于湖中深水区同种底栖动物汞含量(如图 8), 这与沉积物中甲基汞含量的空间分布特征一致, 却与沉积物总汞含量空间分布特征相反(沉积物总汞和甲基汞分布特征见图 5), 表明湖边浅水区沉积物汞的甲基化程度、生物可利用性都明显高于湖中深水区域, 使得湖边浅水区底栖动物富集了更高的汞和甲基汞. 同时从表 3 可以看出, 湖边点底栖动物平均甲

基化比率($47\% \pm 44\%$)也高于湖中点($29\% \pm 57\%$), 这可能与湖边区域更高的甲基汞有关, 也可能由于湖边区域存在更利于生物富集甲基汞的条件.

有研究表明, 同一流域内淹水区域要比岸边裸露区域的汞含量高; Schwesig 等^[39]曾经对德国同一个流域内裸露地表与湿地环境内的汞进行对比分析研究, 结果显示湿地中的汞含量要高于裸露的地表土壤中汞的含量. 国内的刘汝海等^[40]对三江平原

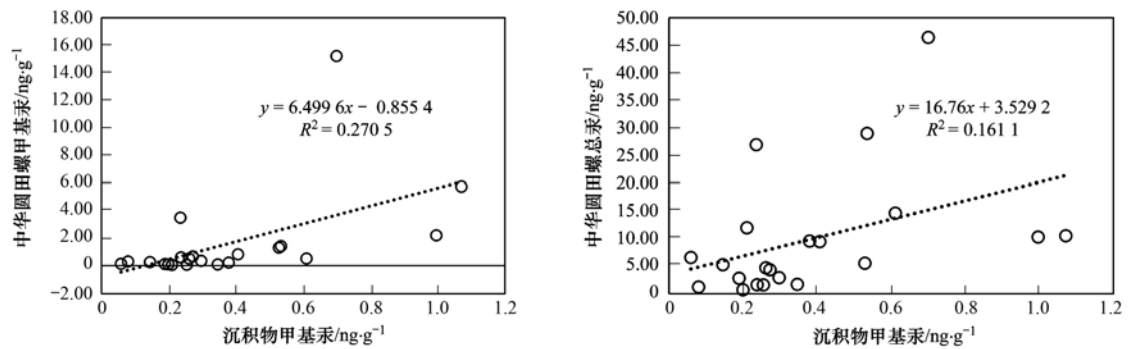


图7 中华圆田螺总汞、甲基汞含量与沉积物甲基汞含量关系

Fig. 7 Relationship between MeHg and THg in *Cipangopaludina cahayensis* and MeHg in sediments

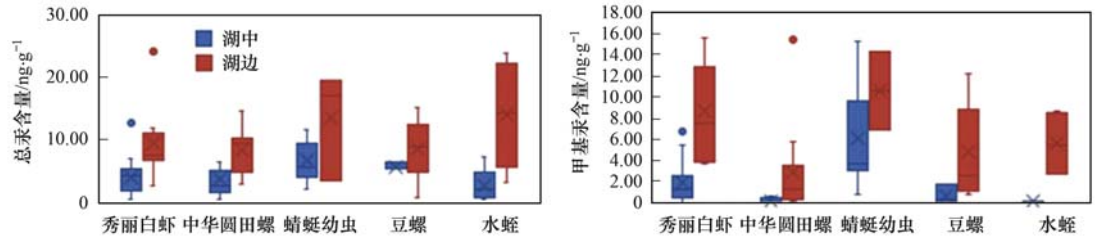


图8 底栖动物湖边点与湖中点总汞、甲基汞含量

Fig. 8 Concentration of THg and MeHg in benthic animals in the shallow-water and deep-water areas

沼泽湿地及周边土壤进行了对比试验，研究表明沼泽湿地中的汞含量高于周边土壤中的汞含量，且一旦湖边的沉积物处于干涸状态，湿地就会从汞汇迅速转变成汞源^[41]，附着在湿地沉积物中的汞就会被释放出来，在草海湖边浅水区域存在季节的干湿交替的条件下，这些附着在沉积物中的汞可能被释放出来，直接被底栖动物吸收富集或被甲基化再被生物富集，使得湖边点底栖动物中汞和甲基汞含量高于湖中点。同时湖边和湖中具有明显差异的有机质含量也可能导致湖边区域具有更强的甲基化能力及生物可利用性。虽然很多研究发现，水体、沉积物、生物体中甲基汞浓度随着有机碳浓度的升高而增加^[25, 42]，但也有研究表明^[43, 44]，因有机质和汞具有强有力的结合能力而成为沉积物汞的主要结合态，从而使得过高含量的有机物因和二价汞结合，降低了生物可利用汞的浓度，从而降低了汞的甲基化率，特别是在中性 pH 环境中，高的溶解有机碳浓度在很大程度上可抑制甲基化的进行。在本研究中，湖中深水区沉积物有机质含量(31.2% ± 7.8%)远高于湖边浅水区域(9.91% ± 19.71%)，有机质对汞极强的吸附能力导致湖中点沉积物中总汞含量高于湖边点，但同时也限制了二价活性汞的释放，降低了间隙水和上覆水体中可利用性二价汞的浓度，从而间接降低了汞的甲基化及生物可利用性，故使得湖中深水区底栖动物总汞和甲基汞含量

均低于湖边点。

3.4 草海底栖动物汞污染评价

富集系数(bioaccumulation coefficient, BCF)是衡量生物重金属累积能力大小的一个重要指标。反映了重金属元素从沉积物或水体到生物体内的迁移能力，其计算公式为：

$$BCF = C_p / C_w$$

式中，BCF 为生物的富集系数； C_p 为生物中某种元素的质量分数，(mg·kg⁻¹)； C_w 为生物生长环境中某元素的质量分数，(mg·kg⁻¹)^[28]。

底栖动物同时活动在底层水体和沉积物中，其汞含量同时受到两者汞含量和物理化学特征的影响，故本研究同时计算了底栖动物对沉积物和水体汞的富集系数(见表4)。

根据同时期对草海的研究发现，草海湿地中水体溶解态总汞均值为 4.51 ng·L⁻¹，溶解态甲基汞为 0.16 ng·L⁻¹^[29]，可计算得出底栖动物对水体甲基汞的富集系数为 1.86 × 10³ ~ 67.81 × 10³ mL·g⁻¹ (均值 2.60 × 10⁴ mL·g⁻¹) 远高于对水体总汞的富集系数为 1.25 × 10³ ~ 3.07 × 10³ mL·g⁻¹ (均值 1.87 × 10³ mL·g⁻¹)，该结论也与已有的研究报道值较为相近，如蒋红梅^[45]测定在乌江渡水库鱼体总汞的 BCF 值为 5.6 × 10³ mL·g⁻¹，甲基汞的 BCF 值为 4.9 × 10⁴ mL·g⁻¹；Sjöblom 等^[46]的研究结果：总汞 BCF 值为 2.8 × 10³ mL·g⁻¹，甲基汞 BCF 值为

$2.7 \times 10^4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 底栖动物对沉积物甲基汞富集系数为 0.84 ~ 30.20 (均值 11.40), 也显著高于其对沉积物总汞的富集系数 (0.05 ~ 0.11, 均值 0.07). 对比甲基汞在底栖动物体内的富集情况, 除水蚌外, 其他底动物对沉积物甲基汞富集系数均 >1, 最高可达到 30 倍, 说明大多数底栖动物对其生境中甲基汞有着较强的富集能力.

从结果可以看出, 底栖动物对于水体或沉积物的甲基汞生物富集系数比总汞生物富集系数高一个数量级以上, 说明与总汞相比, 甲基汞在生物中具有更强的富集特性. 分析草海底栖动物中总汞和甲基汞含量可以知道, 草海底栖动物暂时还未受到汞污染, 但其甲基汞富集系数足够引起对草海湿地水生食物链中汞污染风险的重视.

表 4 草海湿地底栖动物汞富集系数

Table 4 Bioconcentration factor of mercury in benthic animals in Caohai Wetland

组别	BCF	秀丽白虾	中华圆田螺	蜻蜓幼虫	豆螺	水蛭	摇蚊幼虫	蝌蚪后期	水蚌	小划椿
沉积物	总汞	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.11
	甲基汞	9.85	4.34	18.21	10.47	7.88	19.10	1.70	0.84	30.20
水体	总汞 $\times 10^3$	1.25	1.29	1.76	1.90	1.88	1.94	2.12	1.62	3.07
	甲基汞 $\times 10^3$	22.16	9.75	40.86	23.5	17.69	42.88	3.81	1.88	67.81

4 结论

(1) 底栖动物总汞含量范围 0.51 ~ 46.55 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值 7.82 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 甲基汞含量范围 0.04 ~ 15.46 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值 4.31 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 所有底栖动物甲基汞含量均未超标, 说明草海湿地的底栖动物受汞污染较小.

(2) 夏季底栖动物总汞和甲基汞含量均高于其他季节, 夏季降雨量大, 水温升高, 外源性有机质丰富, 微生物活动频繁, 促进了底栖动物汞的吸收富集.

(3) 底栖动物以中华圆田螺为例, 其总汞和甲基汞含量均与沉积物总汞含量无关, 但中华圆田螺甲基汞含量与沉积物甲基汞含量显著相关, 表明底栖动物汞含量与汞污染并不存在相关关系, 而和环境是否存在汞的甲基化及汞生物富集的有利条件有关.

(4) 湖边浅水区底栖动物中总汞和甲基汞含量明显高于湖中深水区相同种类的底栖动物, 这与沉积物中甲基汞含量的空间分布特征一致, 却与沉积物总汞含量空间分布特征正好相反, 表明湖边点沉积物汞的甲基化程度、生物可利用性都明显高于湖中点. 湖中、湖边沉积物有机质的含量差异以及湖边沉积物存在干湿交替可能导致了这种明显的差异, 其具体影响机制还需进一步深入研究.

(5) 底栖动物对水体甲基汞的富集系数 $1.86 \times 10^3 \sim 67.81 \times 10^3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值 $2.60 \times 10^4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 明显高于底栖动物对水体总汞的富集系数 $1.25 \times 10^3 \sim 3.07 \times 10^3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ (均值 $1.87 \times 10^3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$), 底栖动物沉积物甲基汞生物富集系数 0.84 ~ 30.20

(均值 11.40) 也显著高于底栖动物沉积物总汞生物富集系数 (0.05 ~ 0.11, 均值 0.07), 这些底栖动物的高生物富集系数应引起对草海湿地水生食物链中汞污染风险的重视.

参考文献:

[1] Kolkwitz R, Marsson M. Ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologischen Gewässerbeurteilung[J]. International Review of Hydrobiology, 1909, 2(1-2): 126-152.

[2] 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 等. 长江口潮流大型底栖动物对重金属的累积特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 309-314.

Bi C J, Chen Z L, Xu S Y, et al. Heavy metals accumulation in macrobenthos in intertidal flat of Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(2): 309-314.

[3] 张洁, 宋晓兰, 陈渊, 等. 江阴市河流底栖动物中重金属含量及评价研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(10): 150-154.

Zhang J, Song X L, Chen Y, et al. Concentrations and assessment of heavy metals in benthos in main rivers of Jiangyin City[J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(10): 150-154.

[4] 夏爱军, 陈校辉, 蔡永祥, 等. 长江江苏段底栖动物群落结构现状及其水质的初步评价[J]. 海洋渔业, 2006, 28(4): 272-277.

Xia A J, Chen X H, Cai Y X, et al. The status of zoobenthos community structure and preliminary evaluation of water quality in the Jiangsu section of the Yangtze River[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(4): 272-277.

[5] 张璐璐, 刘静玲, Lassoie J P, 等. 白洋淀底栖动物群落特征与重金属潜在生态风险的相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 612-621.

Zhang L L, Liu J L, Lassoie J P, et al. The correlational study between the community characteristics of benthic macroinvertebrates and the potential ecological risk of heavy metal in Baiyangdian[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 612-621.

[6] 戴奇, 李双, 周忠良, 等. 上海城区河道底栖动物群落特征

- 与沉积物重金属潜在生态风险[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(10): 1985-1992.
- Dai Q, Li S, Zhou Z L, *et al.* Characteristics of zoobenthos community and potential ecological risk of heavy metals in urban rivers in Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, **29**(10): 1985-1992.
- [7] 杨丽, 蔡立哲, 童玉贵, 等. 深圳湾福田潮滩重金属含量及对大型底栖动物的影响[J]. 应用海洋学学报, 2005, **24**(2): 157-164.
- Yang L, Cai L Z, Tong Y G, *et al.* Heavy metal contents on Futian tidal flat in Shenzhen Bay and their effect on macrobenthos[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, **24**(2): 157-164.
- [8] 付荣想, 杜作滨. 铅、镉污染对水丝蚓的急性毒性效应[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, **23**(4): 93-95.
- Fu R S, Du Z B. Acute toxicity effect of single and combined of Pb and Cd on *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2008, **23**(4): 93-95.
- [9] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(5): 945-951.
- Yang Z, Li G B, Wang D W, *et al.* Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24**(5): 945-951.
- [10] Clearwater S J, Farag A M, Meyer J S. Bioavailability and toxicity of dietborne copper and zinc to fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2002, **132**(3): 269-313.
- [11] De Schampelaere K A C, Canli M, van Lierde V, *et al.* Reproductive toxicity of dietary zinc to *Daphnia magna*[J]. Aquatic Toxicology, 2004, **70**(3): 233-244.
- [12] 张建利, 吴华, 喻理飞, 等. 贵州草海湿地流域典型喀斯特森林植物群落结构特征[J]. 南方农业学报, 2013, **44**(3): 471-477.
- Zhang J L, Wu H, Yu L F, *et al.* Structure feature of typical Karst forest plant community in Caohai wetland watershed of Guizhou Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, **44**(3): 471-477.
- [13] 李广辉. 贵州省土法炼锌中环境汞污染研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [14] 张槐安, 雷吉华. 贵州草海湿地保护措施研究[A]. 见: 第十二届中国科协年会论文集[C]. 福州: 中国科学技术协会年会, 2010.
- [15] 钱晓莉. 贵州草海汞形态分布特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [16] 陈方银, 梁正其, 何天容, 等. 贵州草海湿地大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(18): 4446-4450.
- Chen F Y, Liang Z Q, He T R, *et al.* Community structure of macrozoobenthos and biological water quality assessment in Caohai wetlands in Guizhou[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, **54**(18): 4446-4450.
- [17] 阎海鱼, 冯新斌, 李仲根, 等. 半封闭溶样冷原子荧光测定鱼体中总汞分析方法的建立[J]. 地球与环境, 2005, **33**(1): 89-92.
- Yan H Y, Feng X B, Li Z G, *et al.* A methodological development in measuring total mercury in fish using semi-closed digestion and CVAFS[J]. Earth and Environment, 2005, **33**(1): 89-92.
- [18] 阎海鱼, 冯新斌, Liang L, 等. GC-CVAFS 法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究[J]. 分析测试学报, 2005, **24**(6): 78-80.
- Yan H Y, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methyl mercury in fish using GC-CVAFS[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2005, **24**(6): 78-80.
- [19] 郭明新, 林玉环. 用中华圆田螺作为底泥重金属毒性和生物可给性的指示生物[J]. 环境与开发, 1997, **12**(2): 8-11.
- Guo M X, Lin Y H. River snail *Cipangopaludina cathayensis* as an indicator for toxicity and bioavailability of heavy metals in sediment[J]. Environment and Exploitation, 1997, **12**(2): 8-11.
- [20] 王俊才, 方志刚, 鞠复华, 等. 摇蚊幼虫分布及其与水质的关系[J]. 生态学杂志, 2000, **19**(4): 27-37.
- Wang J C, Fang Z G, Ju F H, *et al.* Distribution of *Chironomidae* larvae and its relation to water quality[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, **19**(4): 27-37.
- [21] 李崇德, 李波, 柴松芳. 黄海近海底栖动物总汞含量的初步分析[J]. 海洋环境科学, 1990, **9**(1): 18-22.
- [22] 张翠. 上海饮用水源地 Hg、As 等重金属的分布特征及其风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [23] 刘志刚, 乐忠奎. 舟山滩涂生物体内汞的化学形态及其分布特征[J]. 海洋科学, 1986, **10**(6): 25-29.
- Liu Z G, Le Z K. Chemical forms and distributional characteristics of mercury in organisms of Zhoushan Seabeach[J]. Marine Science, 1986, **10**(6): 25-29.
- [24] 高钊. 贵州草海湿地汞污染特征研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2016.
- [25] 何天容. 贵州红枫湖汞的生物地球化学循环[D]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [26] 白薇扬. 阿哈水库中不同形态汞迁移转化规律的初步探讨[D]. 广州: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2006.
- [27] Tremblay A, Cloutier L, Lucotte M. Total mercury and methylmercury fluxes via emerging insects in recently flooded hydroelectric reservoirs and a natural lake[J]. Science of the Total Environment, 1998, **219**(2-3): 209-221.
- [28] 童银栋, 张巍, 邓春燕, 等. 海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 942-949.
- Tong Y D, Zhang W, Deng C Y, *et al.* Pollution characteristics analysis and risk assessment of total mercury and methylmercury in aquatic products of the Haihe Stem River[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 942-949.
- [29] 姚珩, 冯新斌, 闫海鱼, 等. 乌江洪家渡水库鱼体汞含量[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(6): 1155-1160.
- Yao H, Feng X B, Yan H Y, *et al.* Mercury concentration in fish body in Hongjiadu reservoir of Guizhou province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, **29**(6): 1155-1160.
- [30] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(8): 1357-1361.
- Yan H Y, Feng X B, Liu T, *et al.* Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Baihua reservoir in Guizhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, **27**(8): 1357-1361.

- [31] Balogh S J, Swain E B, Nollet Y H. Elevated methylmercury concentrations and loadings during flooding in Minnesota rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(1): 138-148.
- [32] Belger L, Forsberg B R. Factors controlling Hg levels in two predatory fish species in the Negro river basin, Brazilian Amazon [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(1): 451-459.
- [33] 杨丽华, 方展强, 郑文彪, 等. 广州市场食用鱼和贝类重金属含量及评价[J]. *环境科学与技术*, 2002, **25**(6): 15-16, 34.
Yang L H, Fang Z Q, Zheng W B, *et al.* Evaluation of heavy metals in edible fishes and bivalves available in a market in Guangzhou city [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **25**(6): 15-16, 34.
- [34] Kannan K, Smith Jr R G, Lee R F, *et al.* Distribution of total mercury and methyl mercury in water, sediment, and fish from South Florida estuaries [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, **34**(2): 109-118.
- [35] Rasmussen P E, Villard D J, Gardner H D, *et al.* Mercury in lake sediments of the Precambrian Shield near Huntsville, Ontario, Canada [J]. *Environmental Geology*, 1998, **33**(2-3): 170-182.
- [36] 苏秋克, 祁士华, 蒋敬业, 等. 武汉城市湖泊汞的迁移与富集[J]. *水资源保护*, 2007, **23**(3): 44-47.
Su Q K, Qi S H, Jiang J Y, *et al.* Migration and enrichment of mercury from urban lakes in Wuhan [J]. *Water Resources Protection*, 2007, **23**(3): 44-47.
- [37] 甘居利, 贾晓平, 蔡文贵. 水生动物体汞污染的生物学特征[J]. *动物学杂志*, 1999, **34**(4): 48-52.
Gan J L, Jia X P, Cai W G. Characteristic of the mercury pollution in aquatic fauna [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1999, **34**(4): 48-52.
- [38] 朱玉珍, 何天容, 高钊, 等. 贵州草海沉积物重金属分布及其对底栖动物群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1859-1866.
- Zhu Y Z, He T R, Gao Z, *et al.* Distribution of heavy metals in sediments and its impact on zoobenthos community of Lake Caohai in Guizhou [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1859-1866.
- [39] Schwesig D, Ilgen G, Matzner E. Mercury and methylmercury in upland and wetland acid forest soils of a watershed in NE-Bavaria, Germany [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **113**(1-4): 141-154.
- [40] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地汞的地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(5): 661-663.
Liu R H, Wang Q C, Lv X G, *et al.* The geochemistry characteristic of mercury in Sanjiang Plain Marsh [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(5): 661-663.
- [41] 王起超, 刘汝海, 吕宪国, 等. 湿地汞环境过程研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, **17**(6): 881-885.
Wang Q C, Liu R H, Lv X G, *et al.* Progress of study on the mercury process in the wetland environment [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, **17**(6): 881-885.
- [42] Fjeld E, Rognnerud S. Use of path analysis to investigate mercury accumulation in brown trout (*Salmo trutta*) in Norway and the influence of environmental factors [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, **50**(6): 1158-1167.
- [43] Driscoll C T, Blette V, Yan C, *et al.* The role of dissolved organic carbon in the chemistry and bioavailability of mercury in remote Adirondack lakes [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **80**(1-4): 499-508.
- [44] Hammerschmidt C R, Fitzgerald W F, Lamborg C H, *et al.* Biogeochemistry of methylmercury in sediments of Long Island Sound [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **90**(1-4): 31-52.
- [45] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响[D]. 广州: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
- [46] Sjöblom Å, Meili M, Sundbom M. The influence of humic substances on the speciation and bioavailability of dissolved mercury and methylmercury, measured as uptake by *Chaoborus* larvae and loss by volatilization [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **261**(1-3): 115-124.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)