

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征

王欣悦¹, 唐振亚¹, 张成^{1,2,3}, 王永敏¹, 王定勇^{1,2,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 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; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为了解不同耕作方式对稻田中甲基汞的影响, 在免耕冬水、垄作免耕、厢作免耕、水旱轮作和常规平作等 5 种耕作方式的长期定位试验地, 分层采集土壤和上覆水样品, 分析了汞及甲基汞的垂直分布特征。结果表明, 免耕冬水、垄作免耕以及厢作免耕条件下土壤总汞含量在 10~20 cm 层最高, 其中免耕冬水富集效果相对明显; 而水旱轮作和常规平作处理则随土层加深呈下降趋势, 其中水旱轮作更有利于汞的迁移转化。免耕冬水、厢作免耕、常规平作土壤甲基汞含量在剖面的分布规律与土壤总汞类似, 除水旱轮作土壤汞甲基化能力在底层比表、中层较强外, 其余 4 种处理则相反。5 种耕作方式下稻田上覆水中溶解态汞 (DHg) 和溶解态甲基汞 (DMeHg) 含量均随水深而增加, 且水旱轮作和常规平作相对较高。各处理孔隙水中 DHg 含量与该层次土壤总汞含量有关, 两者在土壤剖面上的波动趋势基本相同。免耕冬水、垄作免耕的孔隙水中 DMeHg 含量及 DMeHg 占 DHg 比例均在 10~20 cm 层出现最大值。水旱轮作和常规平作的孔隙水 DMeHg 含量则相反, 在 10~20 cm 层有最低值, 两种处理的 DMeHg 占 DHg 比例随土壤深度增加而上升。不同处理孔隙水中 DMeHg 含量及 DMeHg 占 DHg 比例均大于对应处理上覆水的值。

关键词: 耕作方式; 紫色水稻土; 上覆水; 汞; 甲基汞

中图分类号: X131; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0910-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.015

Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water

WANG Xin-yue¹, TANG Zhen-ya¹, ZHANG Cheng^{1,2,3}, WANG Yong-min¹, WANG Ding-yong^{1,2,3*}

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

Abstract: A long-term experiment was conducted to evaluate the effect of tillage methods on mercury and methylmercury contents in the purple paddy soil and overlying water. The experiment included five tillage methods: no-tillage and fallow in winter, ridge-no-tillage, compartments-no-tillage, paddy-upland rotation and conventional tillage. The results showed that the content of total mercury in soil had the maximum value in the 10-20 cm layer of no-tillage and fallow in winter, ridge-no-tillage and compartments-no-tillage, and the enrichment effect of no-tillage and fallow in winter was especially significant. The concentration of total mercury in soil of paddy-upland rotation and conventional tillage decreased with the increase of the soil depth, and paddy-upland rotation was specifically beneficial to the migration of mercury. The distribution of soil methylmercury was similar to that of total mercury in the soil profile. The methylation ability of soil mercury in the surface and middle of the soil profile was weaker than that at the bottom, while there was an opposite trend for other tillage methods. The concentrations of dissolved mercury (DHg) and dissolved methylmercury (DMeHg) in the overlying water declined with the rise of the water depth in all treatments. The content of DHg in sediment porewater was related to the value of soil total mercury, and they had the same distribution in the soil profile. The content of DMeHg and its proportion accounted for DHg in porewater owned their largest value in the 10-20 cm layer of no-tillage and fallow in winter and ridge-no-tillage, where showed the lowest value of DMeHg in porewater for paddy-upland rotation and conventional tillage. And the percentage of DMeHg in DHg in porewater grew with the increase of soil depth of the latter two methods. Noticeably, the concentration of DMeHg and its proportion accounted for DHg in porewater were both higher than the values in overlying water for all tillage methods.

Key words: tillage methods; purple paddy soil; overlying water; mercury; methylmercury

收稿日期: 2015-08-28; 修订日期: 2015-11-10

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); 中央高校基本业务费专项(XDJK2015B036)

作者简介: 王欣悦(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wangxinyue1991_6@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

汞(Hg)属于非生命必需、高毒的微量重金属元素,在水环境中能与沉积物中的有机物以及其它无机颗粒产生较强的结合力,因而沉积物是汞的主要分布场所^[1,2]. 由于沉积物既是 Hg 的主要分布相,也是众多水生生物的栖息地,且 Hg 能通过食物链富集,因此成为了许多水生动植物吸收 Hg 的主要来源^[3].

水稻是当今世界最重要的粮食作物之一,我国的种植面积占全国粮食作物的 25%. 随着我国稻田重金属污染问题日趋严重,稻米中重金属的累积有上升的趋势^[4],使得稻田土壤的汞污染状况及其化学行为成为各国相关学者研究的热点问题. 有研究发现,汞矿区的稻田生态系统具有很强的无机汞甲基化能力,水稻体内甲基汞含量远高于小麦、玉米、油菜等其它农作物^[5]. 汞矿区稻米可以像鱼类一样对甲基汞进行积累,而水稻对甲基汞的累积是一个“吸收-运移-富集”的动态过程,不同于其对无机汞的吸收,在汞矿区稻米已成为局部人群甲基汞暴露的主要途径^[6~9]. 农田土壤中汞等重金属的迁移、转化及其生物可利用性不仅与成土母质有关,还受耕作方式、施肥、灌溉等农田管理措施的影响^[10~13]. 其中,耕作方式是影响土壤重金属含量、垂直分布以及迁移转化的重要因素之一. 有报道显示,相比于常规耕作,免耕条件下由于作物残茬的表面积累、化肥表施及大气沉降作用等因素的影响,

一些元素可能在土壤表层富集^[14]. 而目前针对耕作制影响的研究主要集中在旱地,对水田的研究相对较少,其中关于汞的讨论更是鲜见报道. 由于不同重金属之间存在差异,不同类型土壤的性质也不尽相同,因此,关于不同耕作方式对水田土壤中汞的积累及其有效性影响的研究,有很多内容值得深入探索. 本研究以紫色水稻土长期定位试验为对象,通过测定稻田上覆水和不同深度剖面土壤及其孔隙水中总汞含量和甲基汞含量,分析长期采用不同耕作方式对紫色水稻土中汞累积、迁移和甲基化的影响,以期为研究稻田生态系统中汞的环境化学行为以及合理的选择耕作方式提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 采样点

紫色水稻土不同耕作制长期定位试验地始建于 1990 年,设在重庆市北碚区西南大学试验农场(N30°26',E106°26'),处于北碚向斜的中部,海拔 230 m. 该处气候为亚热带季风性湿润气候,年均降雨量 1 105.4 mm,年日照 1 276.7 h,无霜期年均约 334 d. 试验前一直采用四川盆地稻田传统耕作方法(一季中稻+冬水田)耕制. 该试验地土壤是中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土,为冲沟田,试验前土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soils								
pH	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	土壤质地
7.10	23.09	1.74	0.75	22.71	120.09	7.51	71.12	重壤土

1.2 试验设计

试验地共设置 6 种耕作类型(表 2),每种类型设 4 块平行处理田(每个处理小区面积为 4×5=20 m²),于 2015 年 5 月至 2015 年 7 月每月一次对不同耕作处理共进行了 3 次分层取样,每次取样分别在每个处理田内按 S 型设置 4 个取样点,在每个取样点先后采集上覆水样(分上层水和界面水),然后采集 0~10、10~20、20~30 cm 层次土壤样品,将各点取得的样品按同层次合并,由此得到每个处理的分析样品. 将采集到的水样注入洁净无汞的硼硅玻璃瓶采样瓶中,放入冷藏样品箱内 0~4℃ 保存;土样封存入经过酸预处理的 50 mL 离心管,用封口胶密封,低温 4℃ 保存. 所有采样瓶以及其它硼硅玻璃瓶在使用前均用体积比为 10% 的 HNO₃ 液浸泡 24 h

以上,并于采样前一天用去离子水和超纯水冲洗,离心管在烘箱中烘干后使用,玻璃器皿在马弗炉中 500℃ 下加热 1 h,冷却后用保鲜袋密封,放进采样箱中待用.

1.3 样品分析方法

水样带回实验室后立即抽滤过 0.45 μm 的滤膜(Millipore,美国),用于分析溶解态汞(DHg)和溶解态甲基汞(DMeHg). 供试土壤在 24 h 内于 3 000 r·min⁻¹、4℃ 恒温条件下离心 30 min,结束后上清液用针式过滤器过 0.45 μm(Millipore)滤膜获得孔隙水,用于分析 DHg、DMeHg. 土样经冻干机避光冻干和玛瑙研钵磨细过 100 目筛后,其总汞用 DMA-80 固体进样自动测汞仪(意大利麦尔斯通公司)直接测定,而土壤甲基汞采用硝酸和硫酸铜溶

液浸提,二氯甲烷萃取并结合水相乙基化等温气相色谱-冷原子荧光法(GC-CVAFS)测定^[15].所有用于测定汞含量的水样均用亚沸蒸馏纯化过的盐酸酸

化,使各种形态的汞保持稳定. DHg 和 DMeHg 分别按照美国环境保护署 Method 1631^[16] 和 Method 1630^[17]方法测定.

表 2 长期定位试验的耕作类型及其施肥量¹⁾

Table 2 Treatments of the long-term field experiment and its quantity of fertilizers			
编号	耕作类型	处理方式	施肥量/kg·hm ⁻²
T1	垄作免耕(中稻-冬水田)	作垄规格:一垄一沟 55 cm,垄顶宽 25 cm,沟宽 30 cm,沟深 35 cm;水稻平作,水稻生长期保持沟内水深 25~30 cm;水稻收获后,稻茬留在稻田,自然腐烂,灌冬水休闲至第二年 4 月	尿素:273.1 过磷酸钙:500.3 氯化钾:150.1
T2	垄作免耕(中稻-油菜)	作垄规格和水稻生长期水分管理与 T1 相同;水稻收获后垄埂上种植油菜;油菜生长期降低垄沟水位,保持浸润灌溉,来年油菜收获后灌水种植水稻	
T3	厢作免耕(中稻-油菜)	作厢规格:一厢一沟 120 cm,厢宽 85 cm,沟宽 35 cm,沟深 35 cm;水稻移栽后,水面与厢面齐平,水稻收获前保持厢沟内水深 25~30 cm,收获后,种植油菜;第二年油菜收后将残茬埋在沟底,灌水保持厢沟内水面与厢面齐平,种植水稻	
T4	水旱轮作(中稻-油菜)	淹水平作种植水稻,水稻收获后,排干稻田积水翻耕,将稻茬(50~60 cm 深)翻入土中,种油菜;油菜生长期,保持沟内无积水;油菜收获后灌水翻耕犁耙种水稻	
T5	常规平作(中稻-冬水田)	每年三犁三耙翻耕植稻,水稻收获后灌冬水休闲至第二年 4 月	
CK	空白对照	田间不灌溉,不耕作,不种植,不施肥	

1) 过磷酸钙做底肥一次施用;尿素用量的 2/3 做底肥,1/3 做追肥;氯化钾底肥和追肥各 1/2

分析过程中的质量控制采用空白试验、加标回收率及平行样控制. 方法检出限(MDL,即 3 倍空白的标准偏差)分别为 0.2 ng·L⁻¹ (DHg) 和 0.02 ng·L⁻¹ (DMeHg),而方法空白均低于检出限. 加标回收率为 96%~112% (DHg) 和 86%~109% (DMeHg),平行样分析的相对标准偏差为 5.4% (DHg) 和 6.9% (DMeHg). 试验所用的土壤总汞标准物质分别为 GBW07405 (CSS-5),测定过程中其加标回收率为 94%~109%.

数据处理与图形制作分别使软件 SPASS 18.0

与 Origin 8.1.

2 结果与分析

2.1 长期不同耕作方式下稻田土壤中汞含量的垂直分布

从图 1 可以看出,各个耕作方式下不同深度土壤中总汞以及甲基汞含量均明显高于空白对照组,表明被耕作种植植物的土壤有利于汞在沉积物中的累积和甲基化. 土壤总汞含量的剖面分布状况因耕作方式的不同而异[图 1(a)],5 种耕作方式下稻田

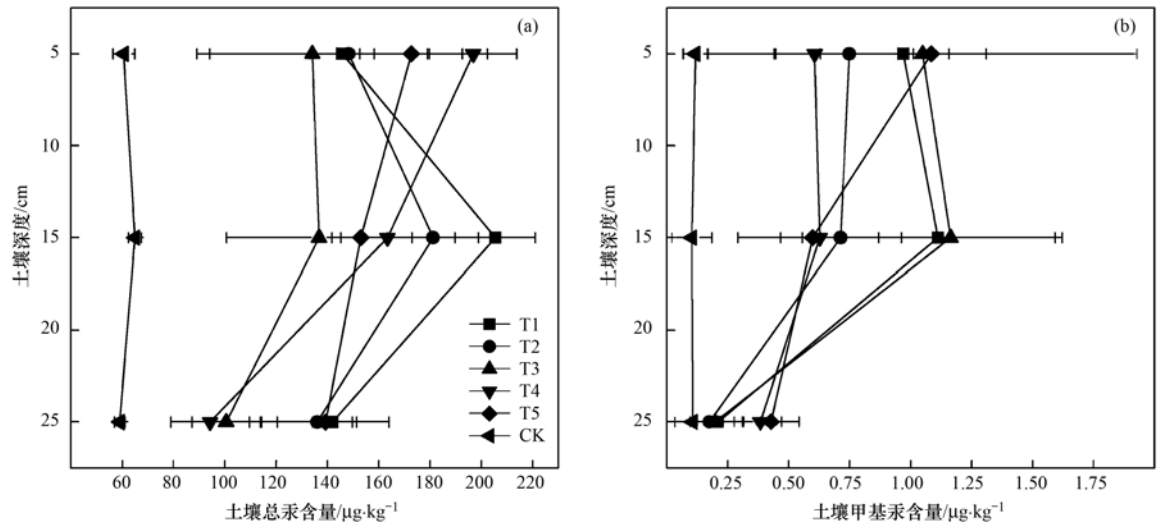


图 1 不同耕作方式下土壤中总汞和甲基汞含量

Fig. 1 Contents of total mercury and methylmercury in purple paddy soil of different tillage systems

土壤总汞含量的变化范围为: 94.23 ~ 205.45 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对照组(CK)的土壤总汞含量受土壤深度的影响较小,水旱轮作(T4)和常规平作(T5)条件下土壤总汞含量随土层加深呈下降趋势,其中T4下降最为显著,而免耕冬水(T1)、垄作免耕(T2)以及厢作免耕(T3)处理下都在10~20 cm层次达到最高. 除CK外,在0~10 cm和10~20 cm土层,土壤总汞含量分别以T4和T1最高,但均以T3最低;20~30 cm土层T1、T2、T5接近,高于T3和T4. 这可能是因为常规平作(翻耕深度20 cm左右,每年两次)和水旱轮作(翻耕深度20 cm左右,每年三犁三耙)均有人为翻耕土壤的处理,使下层土壤Hg在长期淹水或周期性干湿交替的作用下释放到孔隙水中,其中大部分随水体迁移到土壤表层,二者相比水旱轮作更有利于汞的迁移转化. 而T1条件下虽然也长期淹水,且T2和T3为沟水浸润种植,但这3种耕作方式下土壤均不翻不耕,导致Hg向下淋失,因此有表层土壤总汞含量减少而在中层相对富集的趋势,其中免耕冬水处理效果最为明显. 空白处理中各层次的土壤总汞含量接近,说明不经扰动的耕作土在没有上覆水的情况下不会出现浓度梯度的特征,其少量的外源汞(湿沉降作用等)在未渗入前可能再次挥发而进入大气,亦或渗入后完成了均匀分配.

对比图1可以发现,CK土壤甲基汞含量基本不受土壤深度的影响,其波动幅度比土壤总汞还小. 5种处理下土壤甲基汞含量的变化范围为:0.17 ~

1.16 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 图1(b)显示,除CK外的5种耕作方式中,T1与T3土壤甲基汞含量在中层出现峰值,这一趋势与其土壤总汞变化相似;T2和T4均为表层与中层接近,且高于下层;T5呈现出与其土壤总汞剖面分布相似的趋势,即随土壤深度增加而逐渐降低. 此外,各个土层在不同耕作方式下土壤甲基汞含量顺序与土壤总汞相比也不尽相同,0~10 cm土层为T5 $\approx$ T3 $\approx$ T1 > T2 > T4; 10~20 cm土层为T3 $\approx$ T1 > T2 > T4 $\approx$ T5; 而20~30 cm土层为T5 $\approx$ T4 > T1 $\approx$ T2 $\approx$ T3,这可能与影响甲基化与去甲基化的因素有关,稻田生态系统复杂,不同的耕作方式也会使得稻田土壤pH值、温度、氧化还原电位等有所差异.

甲基汞占总汞的比例可用来判断甲基汞产率并间接反映汞的甲基化能力^[18~20]. 5种处理的土壤甲基汞占总汞比例见表3,其变化范围为:0.128% ~ 0.851%. 在0~10 cm层,土壤甲基汞占总汞比例表现为:T3 > T1 > T5 > T2 > T4; 10~20 cm层的顺序与0~10 cm相似:T3 > T1 > T2 $\approx$ T5 > T4; 但在20~30 cm层,5种耕作方式的大小为:T4 > T5 > T3 > T1 > T2. 此外,T1、T2、T3以及T5在20~30 cm层的比例均低于0~10 cm与10~20 cm层的值,而T4则相反. 另外,5种耕作方式土壤甲基汞占总汞比例整体上大于对照组,表明稻田在耕作条件下汞的甲基化能力有所提高,这可能与微生物的根际活动有关.

表3 土壤甲基汞占总汞的比例/%
Table 3 Proportion of methylmercury in total mercury in soil/%

土层深度/cm	T1	T2	T3	T4	T5	CK
0~10	0.665 $\pm$ 0.233	0.505 $\pm$ 0.207	0.782 $\pm$ 0.656	0.308 $\pm$ 0.081	0.628 $\pm$ 0.042	0.193 $\pm$ 0.050
10~20	0.541 $\pm$ 0.234	0.393 $\pm$ 0.087	0.851 $\pm$ 0.334	0.384 $\pm$ 0.205	0.391 $\pm$ 0.086	0.157 $\pm$ 0.082
20~30	0.148 $\pm$ 0.082	0.128 $\pm$ 0.104	0.196 $\pm$ 0.080	0.406 $\pm$ 0.169	0.307 $\pm$ 0.031	0.180 $\pm$ 0.119

2.2 长期不同耕作方式对稻田上覆水及土壤孔隙水中汞含量的影响

有研究发现,沉积物水是沉积物形成及其与周围水体进行物质交换的敏感指示器^[21]. 从图2(a)可以看出,稻田上覆水中DHg含量的变化范围为:31.32 ~ 44.77 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,而土壤孔隙水的变化范围是:36.12 ~ 70.80 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 5种处理DHg含量均随水深而略有增加,且在上层水中差别很小,这可能是因为水体逐渐进入缺氧还原状态,湖底沉积物吸附的汞解析再悬浮进入界面水. 另外,界面水中除T4、T5偏高外,其余3种也很接近. 对比图2(a)与图1(a)可以发现,各个耕作方式下孔隙水DHg含

量与对应土壤总汞含量在剖面上的波动趋势基本相同,T1、T2以及T3的孔隙水DHg含量均在10~20 cm层出现最大值,而T4和T5则随土层加深逐渐降低. 区别在于DHg含量在0~10 cm层以T4最高,T3、T5次之;但T5和T4在10~20、20~30 cm层均为最低及次低;10~20 cm层以T3最大;20~30 cm层T1、T2、T3接近. 这表明孔隙水中DHg含量与对应层次土壤总汞含量有关,且相比而言免耕冬水更容易使汞富集在土壤中,而干湿交替的水旱轮作则有利于汞的活化,使其向孔隙水中迁移.

稻田上覆水和土壤孔隙水中DMeHg含量的变化范围分别为:0.82 ~ 3.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、4.43 ~ 9.34

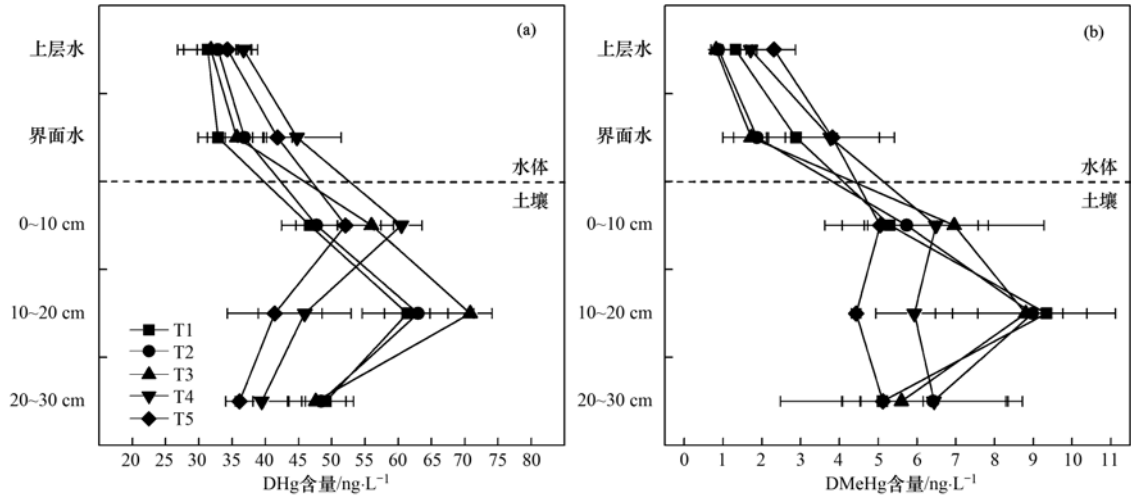


图 2 不同耕作方式下稻田上覆水及土壤孔隙水中 DHg 和 DMeHg 含量

Fig. 2 Contents of DHg and DMeHg in overlaying water and sediment porewater of different tillage systems

ng·L⁻¹,其剖面分布如图 2(b)所示. 不同耕作方式下各个土层孔隙水中 DMeHg 含量均大于对应上覆水的值,这可能是因为底泥中具有更有利于微生物甲基化的环境,且在长期非扰动状态下,与颗粒物结合的甲基汞易于下沉而进入沉积物. 就上覆水而言,上层水中 DMeHg 含量均小于对应水土界面水的值,这可能与光照引发的水体表层 MeHg 降解有关^[22]. 5 种耕作方式在表层水和界面水中 DMeHg 含量均为: T5 > T4 > T1 > T2 ≈ T3. 就土壤孔隙水中 DMeHg 含量的剖面分布而言, T4 和 T5 均在 10~20 cm 层出现最小值,且 T4 在各个土层的值均大于 T5. 而 T1、T2 以及 T3 的 DMeHg 含量分布规律则相反,三者均在 10~20 cm 层出现最大值且此时基本接近. 在 0~10、10~20 以及 20~30 cm 层,土壤孔隙水中 DMeHg 含量分别为: T3 > T4 > T2 > T1 > T5、T1 > T2 ≈ T3 > T4 > T5、

T4 ≈ T2 > T3 > T5 ≈ T1,但均远大于对应层次土壤甲基汞含量.

从表 4 可以看出, DMeHg 占 DHg 的比例范围为: 2.58% ~ 9.13% (上覆水)、9.70% ~ 16.33% (孔隙水). 各个处理在界面水处 DMeHg 占 DHg 的比例均高于上层水,这与图 2 中 DHg 含量与 MeHg 含量的趋势一致. 而在不同深度的土壤孔隙水中, DMeHg 占 DHg 的比例大小与表 3 也有相似之处,即在 20~30 cm 层,5 种耕作方式的大小为: T4 > T5 > T3 > T1 > T2. 而在 0~10 cm、10~20 cm 层分别以 T3、T1 最大,均以 T5 最小. T4、T5 的 DMeHg 占 DHg 比例随土壤深度增加而上升,这与图 1(a)中土壤总汞含量以及图 2(a)中孔隙水 DHg 含量的变化趋势相反. T1、T2 均在 10~20 cm 层达到最大值. 整体而言,土壤孔隙水中 DMeHg 占 DHg 比例高于上覆水的值.

表 4 上覆水和孔隙水中 DMeHg 占 DHg 的比例/%

Table 4 Proportion of DMeHg in DHg in overlaying water and sediment/%

位置	T1	T2	T3	T4	T5
上层水	4.21 ± 1.25	2.68 ± 0.43	2.58 ± 0.19	4.66 ± 1.98	6.73 ± 2.17
界面水	8.76 ± 3.21	5.10 ± 0.57	4.82 ± 0.74	8.42 ± 0.81	9.13 ± 1.03
0~10 cm	11.35 ± 0.99	12.01 ± 1.07	12.44 ± 2.09	10.73 ± 0.78	9.70 ± 1.48
10~20 cm	15.23 ± 2.12	14.26 ± 1.99	12.43 ± 3.06	12.91 ± 2.36	10.69 ± 1.40
20~30 cm	10.41 ± 0.94	9.26 ± 3.17	11.76 ± 0.43	16.33 ± 3.58	14.17 ± 2.74

3 讨论

北碚缙云山降雨中总汞含量范围为 7.47 ~ 120.11 ng·L⁻¹^[23],大气湿沉降虽然对没有上覆水的稻田土壤中汞含量的深度分布没有明显影响,但应是稻田上覆水中汞的主要来源之一. 此外,除对照

外其它耕作制下不同层次土壤中汞含量的梯度分布可能是外援输入的汞(施肥、灌溉)在土壤各层次进行了二次分配. 稻田是一种独特的湿地生态系统,通常在水淹条件下,湿地环境中丰富的可溶性碳和腐殖酸,为甲基化细菌提供了理想的生存条件,进而导致汞的甲基化作用增强. 垄作免耕和厢作免耕因

表中层(0~20 cm)长期以毛管水浸润,水热状况稳定,为微生物的生长创造了良好的条件。并且不同耕作处理土壤酶活性大小顺序为: 垄作免耕 > 水旱轮作 > 冬水免耕 > 常规平作,各个处理的土壤酶活性从表层到底层均依次降低^[24]。所以在 0~20 cm 层垄作免耕及厢作免耕的甲基汞含量相对较高,而常规平作较低,但在 0~10 cm 层以及 10~20 cm 层之间仍然有所波动,表明还有其它因素的影响。如作物根系主要集中分布在 0~20 cm 土层,根系分泌物过度积累而达到较高的浓度时可通过降低土壤 pH、络合、还原以及与微生物共同作用来增加某些元素的溶解性和移动性,从而影响作物对汞的吸收。而对于空白对照组,可能由于汞源及微生物甲基化所需的能量等有所不足,从而其微生物作用较小,使其未出现不同层次土壤的梯度分布。不同的耕作方式对稻田的影响也有所不同,使得汞及甲基汞含量差异明显,其具体的作用机制还有待进一步研究。

该试验地自 1990 年起已运行约 25 年,投放了大量的 N、P 养分及有机物质,其初级生产力水平较高,有机质的降解可消耗土壤中大量氧气,从而形成厌氧环境,另外,微生物内源代谢活动强烈^[25],这均有利于 MeHg 的生成。但免耕冬水(T1)、垄作免耕(T2)、厢作免耕(T3)常年未翻动土壤,土层人为干扰小,且 T1 一直处于淹水状态,T2 和 T3 也是沟水浸润种植,这会造成土壤底层长期过度缺氧。有研究发现,在高度缺氧条件下,由于部分汞转变成了稳定的硫化汞,使得可利用的活性二价汞减少,从而降低了汞的甲基化速率,这也是沉积物中甲基汞占总汞比例通常小于 1% 的原因之一^[26]。而水旱轮作(T4)与常规平作(T5)每年翻耕土壤,从而提高了土壤养分含量,并增强了土壤的通气性,避免高度缺氧。有报道表明,水体、沉积物中的甲基汞含量随有机物含量的增高而上升^[27,28],且 T4 的干湿交替特点有助于甲基化反应的发生^[29]。因此,在 20~30 cm 层虽然 T4、T5 的土壤总汞含量以及孔隙水中 DHg 含量相对低于 T1、T2、T3,但其土壤甲基汞含量以及孔隙水中 DMeHg 含量却相对较高,其土壤甲基汞占总汞的比例以及孔隙水中 DMeHg 占 DHg 的比例也相对较大。

4 结论

(1) 5 种耕作方式均有利于土壤总汞的累积和甲基化。其中总汞富集效果相对明显的现象出现在免耕冬水制下的 10~20cm 层。而水旱轮作更有利

于汞的迁移转化,且其底层土壤中汞甲基化能力比表中层强,相反,其余 4 种处理下则是表中层较强。

(2) 5 种耕作方式中,水旱轮作和常规平作的稻田上覆水中 DHg 和 DMeHg 含量相对其它 3 种处理较高,因此这两种方式对上覆水中汞含量的影响较大。

(3) 各个处理下,土壤孔隙水中 DHg 含量与该层次土壤总汞含量有关,两者在土壤剖面上的波动趋势基本相同。免耕冬水、垄作免耕的孔隙水 DMeHg 含量及其甲基化能力均在 10~20 cm 层出现最大值。水旱轮作和常规平作土壤孔隙水的 DMeHg 含量在 10~20 cm 层有最低峰,这两种处理的孔隙水中汞的甲基化率随土壤深度的增加而上升。

参考文献:

- [1] Fang W H, Wang W X, Chen J S. Geochemistry of Cd, Cr, and Zn in highly contaminated sediments and its influences on assimilation by marine bivalves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(23): 5164-5171.
- [2] 鍾寰, 王文雄. 沉积物中汞的生物可利用性研究进展[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 165-178.
- [3] US EPA. Framework for metals risk assessment [M]. Washington DC: Office of the Science Advisor, 2007.
- [4] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下 Cd 和 Pb 在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(4): 792-797.
- [5] Cui L W, Feng X B, Lin C J, *et al.* Accumulation and translocation of ¹⁹⁸Hg in four crop species [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2014, **33**(2): 334-340.
- [6] Feng X B, Li P, Qiu G L, *et al.* Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou province, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(1): 326-332.
- [7] Li L, Wang F Y, Meng B, *et al.* Speciation of methylmercury in rice grown from a mercury mining area [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(10): 3013-3107.
- [8] 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.
- [9] Zhang H, Feng X B, Jiang C X, *et al.* Understanding the paradox of selenium contamination in mercury mining areas: high soil content and low accumulation in rice [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 27-36.
- [10] 周利强, 尹斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. *土壤*, 2013, **45**(2): 227-232.
- [11] 王昌全, 代天飞, 李冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. *生态学报*, 2007, **27**(3): 889-897.
- [12] Zhao X L, Wang D Y. Mercury in some chemical fertilizers and

- the effect of calcium superphosphate on mercury uptake by corn seedlings (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(8): 1184-1188.
- [13] Abedin M J, Cotter-Howells J, Meharg A A. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water[J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**(2): 311-319.
- [14] Lavado R S, Porcelli C A, Alvarez R. Concentration and distribution of extractable elements in a soil as affected by tillage systems and fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **232**(3): 185-191.
- [15] 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.
- [16] United States EPA-821-R-02-019, Method 1631, Revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [17] United States EPA-821-R-01-020, Method 1630: Methyl Mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [18] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4095-4102.
- [19] 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.
- [20] Moingt M, Lucotte M, Paquet S, *et al.* Deciphering the impact of land-uses on terrestrial organic matter and mercury inputs to large boreal lakes of central Québec using lignin biomarkers[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, **41**: 34-48.
- [21] Todorova S G, Driscoll C T, Effler S W, *et al.* Changes in the long-term supply of mercury species to the upper mixed waters of a recovering lake [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 314-321.
- [22] Sellers P, Kelly C A, Rudd J W M, *et al.* Photodegradation of methylmercury in lakes[J]. *Nature*, 1996, **380**(6576): 694-697.
- [23] 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 等. 重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 809-816.
- [24] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(7): 1177-1181.
- [25] Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* The variations of mercury in sediment profiles from a historically mercury contaminated reservoir, Guizhou province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **407**(1): 497-506.
- [26] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [27] He T R, Lu J L, Yang F, *et al.* Horizontal and vertical variability of mercury species in pore water and sediments in small lakes in Ontario[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **386**(1-3): 53-64.
- [28] Balogh S J, Swain E B, Nollet Y H. Characteristics of mercury speciation in Minnesota rivers and streams [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(1): 3-11.
- [29] Rothenberg S E, Feng X B. Mercury cycling in a flooded rice paddy [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): G03003.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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