

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响

游蕊¹, 梁丽¹, 覃蔡清¹, 邓晗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: 为研究植物根系分泌物的主要成分——低分子量有机酸对土壤汞的活化作用, 利用室内模拟实验, 通过分析不同浓度的柠檬酸、酒石酸和草酸溶液对三峡库区消落带土壤中汞赋存形态的影响及其随培养时间的变化特征, 探究了低分子量有机酸对汞迁移能力和生物有效性的作用. 结果表明, 柠檬酸可增强土壤汞的迁移能力, 而草酸和酒石酸则表现出软弱的抑制作用. 3 种低分子量有机酸均能明显地增强土壤中汞的生物有效性, 整体活化效果为: 柠檬酸 > 酒石酸 ≈ 草酸. 有机酸对土壤中汞形态的作用随其浓度的增加而增强, 且当浓度为 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (柠檬酸)、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (酒石酸和草酸) 时开始趋于稳定. 在 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸培养的土壤中, 汞形态分布的变化随培养时间的延长而愈加显著, 直到 14d 时才基本停止, 此时胃酸溶解态汞增加最为明显, 其主要来自于部分被活化的强络合态汞.

关键词: 低分子量有机酸; 三峡水库; 土壤; 汞; 赋存形态

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0173-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.01.023

Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir

YOU Rui¹, LIANG Li¹, QIN Cai-qing¹, DENG Han¹, 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: To investigate the effect of low molecular weight organic acids (LMWOA) on the ability of migration and the species of mercury in the soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, citric acid, tartaric acid and oxalic acid were added into the soil to conduct simulation experiments. The results showed that the percentage of exchangeable mercury increased with the increase of the concentration of citric acid, but the value declined slightly as the concentration of tartaric acid and oxalic acid increased. While all three acids elevated the bioavailability of mercury, which increased with the increase of the concentration of acids. When the concentration of citric acid reached $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the activation effect was the best. But for oxalic acid and citric acid, $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ was the optimal concentration. In general, the effect of three organic acids on the activation of mercury in the soil followed the trend of citric acid > tartaric acid > oxalic acid. In the soil supplemented with $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ citric acid, the change of mercury species was more and more striking with the prolonged incubation, and the conversion did not stop until 14 d, at that time the stomach acid dissolved mercury increased obviously, which was mainly converted from elemental mercury.

Key words: low molecular weight organic acid; Three Gorges Reservoir; soil; mercury; speciation

水库被报道为典型的“汞敏感生态系统”^[1], 汞在其中的环境化学行为成为各国相关学者关注的热点问题之一^[2,3]. 三峡水库作为我国特大型年调节水库, 具有特殊的调度方式, 其库周形成了垂直高度为 30 m, 面积超过 400 km^2 的消落带^[4]. 该消落带在每年 4~9 月的出露期间会生长出大片茂密的草本植被, 随后上涨的水位会淹没消落区. 在土壤干湿交替的同时, 植被也呈现出生长-淹没分解-再生长的更新过程. 当植物在生长过程中受到环境因子的胁迫时, 其根系会向周围土壤分泌大量的有机

物^[5], 这些分泌物在局部环境中积累而达到一定的浓度后, 可降低土壤 pH、提高微生物活性, 从而增加某些元素的溶解性和移动性. 根系分泌物所包含的大量小分子有机酸 (如柠檬酸、草酸、酒石酸等), 能通过络合、吸附、氧化还原等机制影响重金

收稿日期: 2015-08-02; 修订日期: 2015-09-04

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 (XDJK2015C124)

作者简介: 游蕊 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: Yourui_cherish@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

属的迁移转化过程^[6,7]. 国内外的许多报道显示,外加柠檬酸、草酸、酒石酸等能对土壤中 Cd、Cu、Pb 等重金属的赋存形态产生不同程度的影响^[8-11]. 黄国勇等^[8]发现有机酸可使土壤中的铜活化,增加弱酸溶解态 Cu 的含量,且柠檬酸活化效果最强. 另有学者指出,对于不同污染程度的 Cd(I)~Cd(IV) 土壤,单一与复合添加有机酸均能有效活化土壤中重金属 Cd,且添加一定比例的复合酸时土壤中最具活性的可交换态 Cd 百分含量增长率较高^[9]. 虽然大都认为有机酸对土壤中重金属赋存形态分布的影响是络合、还原、酸化以及微生物共同作用的结果,但不同重金属之间的物理化学性质存在差异,且不同类型的低分子量有机酸对不同地区土壤的效果也不尽相同. 因此,关于低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞地球赋存形态影响的分析,仍然有很多内容值得深入探索.

有学者指出,三峡库区消落带土壤中汞含量的平均值为 $(84.2 \pm 54.3) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,基本高于库区土壤汞的背景值,并且不同形态汞所占的比例为:水溶态汞 4.1%、酸溶态 15.5%、碱溶态汞 18.3%、过氧化氢溶态汞 10.9%、残留态汞 51.3%^[12]. 虽然有报道称低分子量有机酸能影响汞的氧化还原^[6],但目前对于有机酸对三峡库区消落带土壤中 Hg 化学形态的转化特征仍不太清楚. 为此,本研究采集了三峡水库消落区土壤,通过室内模拟实验,分别用柠檬酸、酒石酸以及草酸的不同浓度培养土壤,探

讨了有机酸的浓度对土壤中汞赋存形态的影响,并分析了土壤中汞赋存形态分布随培养时间的变化特征,以期评估消落区季节性植被根系分泌物,对土壤汞化学行为的影响及其带来的生态风险提供参考数据.

1 材料与方法

1.1 实验材料与准备

供试土壤于 2014 年 7 月采自三峡水库腹心地带重庆忠县石宝寨新政村(N30°25'7.5", E108°10'5.5")消落区裸露试验地,其基本理化性质见表 1. 将除去植物残体和砂粒的土样用冻干机(LGJ-10C, 北京)避光冻干,再用玛瑙研钵磨碎,并过 60 目尼龙筛,于 -80℃ 超低温冰箱(中科美菱 DW-HW328, 安徽)避光保存待用. 实验所用的柠檬酸、酒石酸以及草酸(成都市科龙化工试剂厂)均为优级纯,其基本性质见表 2. 分别将 3 种有机酸配制成浓度梯度为 0(对照组)、5、10、15、20 mmol·L⁻¹ 的溶液后,均通入 2 h 的氩气以去除溶液中的痕量汞. 实验所需的离心管及其它玻璃器皿在使用前均用硝酸(25%, 体积比)浸泡 24 h 以上,再用超纯水(18.2 MΩ·cm)清洗,离心管在烘箱中烘干后使用,玻璃器皿经马弗炉 500℃ 灼烧 1 h,在洁净无汞的环境下冷却后使用. 实验所用的管子均为聚四氟乙烯管(Brooks Rand). 实验全过程佩戴一次性手套,避免交叉污染,室内温度控制在 25℃ ± 2℃.

表 1 供试土壤的基本理化性质

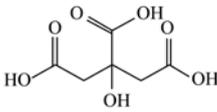
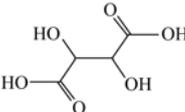
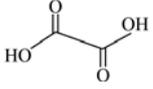
Table 1 Basic physicochemical properties of soils used in this research

pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC ¹⁾ /cmol·kg ⁻¹	机械组成/%			汞含量 THg/μg·kg ⁻¹
			<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm	
7.46	9.55	17.12	19.28	31.00	49.72	45.09 ± 0.12

1) CEC(cation exchange capacity): 阳离子交换量

表 2 3 种低分子量有机酸的基本性质

Table 2 Basic properties of three low molecular weight organic acids

名称	相对分子质量	分子结构	pKa 值(25℃)	主要功能基团
柠檬酸(citric acid)	192.14		pK1 = 3.13 pK2 = 4.76 pK3 = 6.40	3 个羧基(-COOH) 1 个羟基(-OH)
酒石酸(tartaric acid)	150.09		pK1 = 3.04 pK2 = 4.37	2 个羧基(-COOH) 2 个羟基(-OH)
草酸(oxalic acid)	90.04		pK1 = 1.22 pK2 = 4.19	2 个羧基(-COOH)

1.2 实验设计与分析方法

称取 100 g 的供试土样于洁净无汞的硼硅烧杯中,加入 50 mL 不同浓度的各个有机酸将土壤浸透混匀(空白处理加同样量的超纯水),轻微覆盖一层保鲜膜后放入人工气候培养箱中(湿度 60%、温度 25℃、光照 0 lx)培养,所有样品均做

3 个重复. 于 0、1、3、7、14、21、30 d 进行取样. 样品取出后立即用冻干机避光冻干,再用玛瑙研钵磨细过 100 目尼龙筛待用. 培养土壤中汞的赋存形态采用改进的逐步萃取法(sequential selective extraction, SCE)分离^[14,15],具体步骤见表 3.

表 3 沉积物中各种形态汞的测定方法

Table 3 Determination method of different mercury speciation in sediments

步骤	萃取操作	形态
1	称取 2 g 土壤于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 超纯水,于室温下振荡 18 h ± 4 h (30 r·min ⁻¹),离心分离(3 000 r·min ⁻¹ , 15 min)将上清液过滤(0.45 μm)后倾入 25 mL 容量瓶中,加入 1 mL 浓硝酸,加入 0.2 mL BrCl,摇匀,放置 5 min 后,加 200 μL 盐酸羟胺,用水稀释至刻度,取 200 μL 测定	F1
2	上述残渣加 20 mL 超纯水后,振荡 15 min,离心,并弃去上清液. 向残渣加入 20 mL pH 为 2 的混合酸 A(0.1 mol·L ⁻¹ CH ₃ COOH + 0.01 mol·L ⁻¹ HCl),于室温下振荡 18 h ± 4 h (30 r·min ⁻¹),离心分离(3 000 r·min ⁻¹ , 15 min),将上清液过滤(0.45 μm)后倾入 25 mL 容量瓶中,加入 1 mL 浓硝酸,加入 0.2 mL BrCl,摇匀,放置 5 min 后,加 200 μL 盐酸羟胺,用水稀释至刻度,取 200 μL 测定	F2
3	上述残渣加 20 mL 混合酸 A 后,振荡 15 min,离心,并弃去上清液. 向残渣加入 20 mL 1 mol·L ⁻¹ KOH,于室温下振荡 18 h ± 4 h (30 r·min ⁻¹),离心分离(3 000 r·min ⁻¹ , 15 min),将上清液过滤(0.45 μm)后倾入 25 mL 容量瓶中,加入 1 mL 浓硝酸,加入 0.2 mL BrCl,摇匀,放置 5 min 后,加 200 μL 盐酸羟胺,用水稀释至刻度,取 200 μL 测定	F3
4	上述残渣加 20 mL KOH(1 mol·L ⁻¹),振荡 15 min,离心,弃去上清液后(需加浓硝酸 HNO ₃ 1.5 mL,中和残渣中过量的 KOH),向残渣先加入 5 mL 12 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 以中和过量的 KOH,之后加入 20 mL HNO ₃ (12 mol·L ⁻¹),于室温下振荡 18 h ± 4 h (30 r·min ⁻¹),离心分离(3 000 r·min ⁻¹ , 15 min),将上清液倾入 25 mL 容量瓶中,加入 1 mL 浓硝酸,加入 0.1 mL BrCl,摇匀,放置 5 min 后,加 200 μL 盐酸羟胺,用水稀释至刻度,取 200 μL 测定	F4
5	上述残渣加 20 mL HNO ₃ (12 mol·L ⁻¹),振荡 15 min,离心,弃去上清液后,将残渣在室温下风干,然后用王水消解,测定残渣的总汞含量	F5

表 3 中 F1、F2、F3、F4、F5 分别指水溶态、胃酸溶解态、有机及其它络合物结合态、强络合态、硫化物结合态. 各种赋存形态的汞均采用冷原子荧光法(CV-AFS)(Model III, BrooksRand, USA)测定. 原供试土样中的总汞用 DMA-80 固体进样自动测汞仪(意大利麦尔斯通公司)直接测定.

分析过程中采用空白实验、加标回收率及平行样进行质量控制. 方法检出限(MDL,即 3 倍空白的标准偏差)为 0.1 ng·L⁻¹,而方法空白均低于检出限. 加标回收率为 96%~109%,平行样分析的相对标准偏差为 4.9%.

数据处理与图形分别使用软件 Excel 2013 与 Origin 8.1 制作.

2 结果与分析

2.1 不同浓度有机酸对土壤中 Hg 赋存形态的影响

在 30 d 的培养实验中,所有土壤中 Hg 的形态分布在第 14 d 时都已完全稳定,因此,在分析有机酸浓度对汞赋存形态的影响时均采用培养 14 d 的

土壤. 另外,各汞形态之和占总汞的比例在 95.37%~103.74%之间,说明用该方法提取各形态汞所得到的数据是可靠的. 从图 1(a)可以看出,F1、F2、F3 所占的百分比都随着柠檬酸浓度的增加而上升,F4 的变化趋势相反,F5 的变化幅度很小. 当柠檬酸浓度为 15 mmol·L⁻¹时,培养土壤中汞的 5 种赋存形态均达到稳定状态,之后基本保持不变,此时 F1、F2、F3、F4、F5 所占的百分比各自为:8.67%、16.11%、13.11%、26.92%、36.09%,与对照组相比,F1、F2、F3 分别增加了 3.72%、12.40%、3.88%,F4 减少了 19.09%,说明培养土壤中 Hg 的赋存形态主要由强络合态变成了胃酸溶解态,且当柠檬酸浓度达到 15 mmol·L⁻¹时,基本转化完全.

用不同浓度酒石酸培养的土壤中,除 F5 基本保持不变外,F2 和 F3 所占比例随着酒石酸浓度的升高而上升,而 F1 和 F4 的比例则有所降低[图 1(b)]. 当酒石酸浓度为 10 mmol·L⁻¹时,四者占总汞的百分比基本达到稳定,分别为:2.33%(F1)、5.19%(F2)、12.67%(F3)和 42.63%(F4),与对

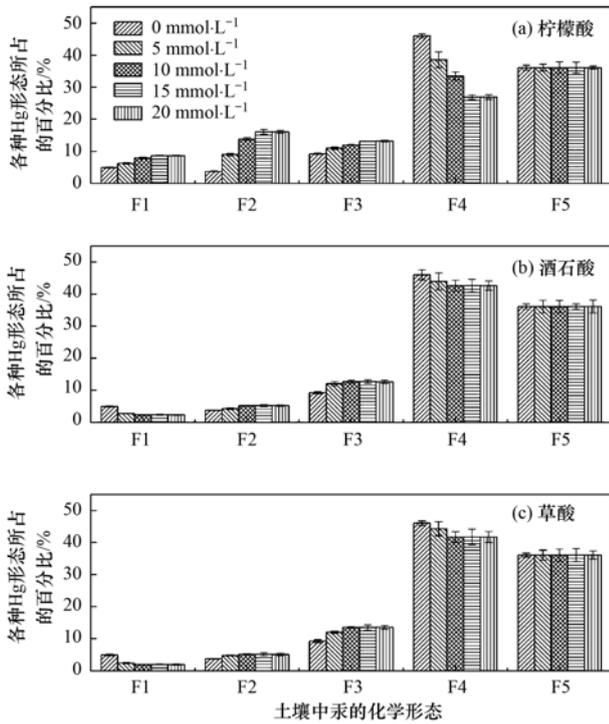


图 1 不同有机酸浓度对土壤中 Hg 赋存形态的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of organic acids on Hg speciation in soils

对照组相比 F1 和 F4 降低了 2.62%、3.38%，而 F2 和 F3 各自增加了 1.48% 和 3.44%。

对比图 1(c) 和 1(b) 可以发现，土壤中 Hg 的赋存形态随草酸浓度的变化趋势与酒石酸的基本相同。当草酸浓度达到 10 mmol·L⁻¹ 时，培养土壤中汞

的 5 种赋存形态所占的比例分别为 1.94%、5.12%、13.51%、41.15%、36.08%，与对照组相比，F2 和 F3 增加了 1.41% 和 4.28%，而 F1、F4 各自降低了 3.01%、4.26%，F5 的变化同样可忽略不计。从图 1 不难发现，添加不同有机酸后，F5 基本不随浓度的变化而改变，表明硫化物态汞的稳定性很高，很难发生形态的转变。

由于土壤中汞的 5 种赋存形态中，强络合态 (F4) 与硫化物态 (F5) 的迁移性最弱，有机及其它络合物态 (F3) 具有一定的迁移性，而水溶态 (F1) 和胃酸溶解态 (F2) 的迁移性最强^[20]。因此，在本研究中用 F1 + F2 (F12) 来表示库区消落带沉积物中可交换态汞，用以反映汞迁移能力的大小。而土壤经历淹水与退水后，F3 的迁移性增大，其中包含的汞容易进入水相中被水生生物吸收富集，故可用 F12 与 F3 之和 (F123) 代表生物可利用态 Hg^[16]。

从图 2(a) 可以看出，不同种类的有机酸培养土壤后，F123 所占的比例与对照组相比均有不同程度的上升，且随着有机酸浓度的增加先增大，而后趋于稳定，表明有机酸能够增加土壤中 Hg 的生物有效性，其中柠檬酸的效果最为显著，草酸和酒石酸的作用相当。而图 2(b) 显示，F12 所占的百分比除了随柠檬酸浓度的增加而明显增大之外，其随草酸及酒石酸浓度的增加而呈现出轻微的下趋势，说明柠檬酸能将土壤中其它形态的汞活化为迁移能力强的水溶态和胃酸溶解态汞，从而增加汞的迁移能力，而

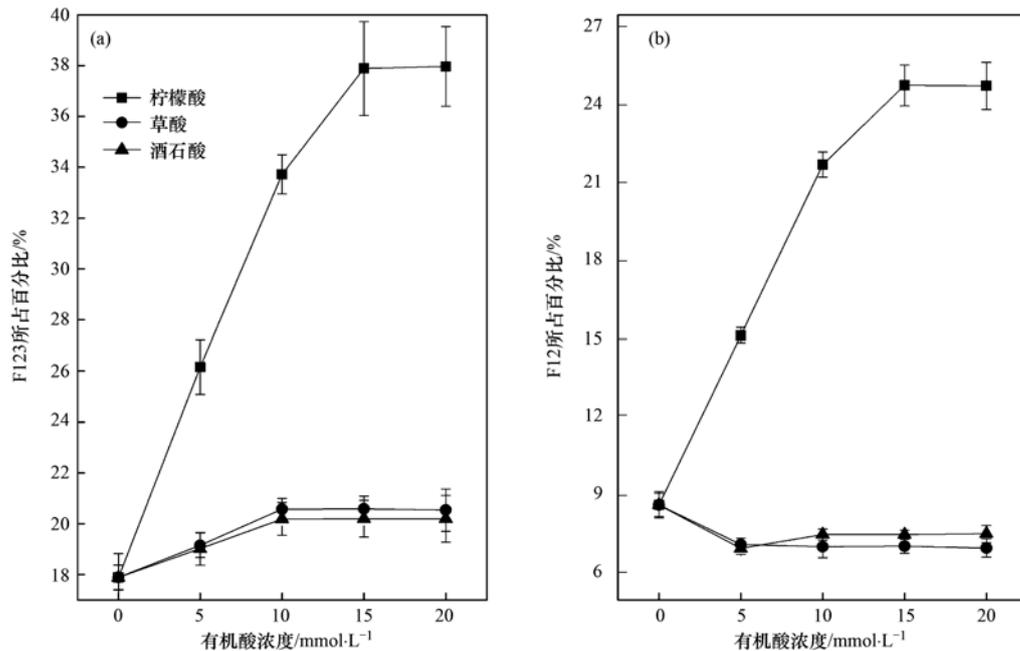


图 2 F123 与 F12 占总汞的百分比随有机酸浓度的变化

Fig. 2 Variation of percentages of F12, F123 in total Hg with organic acid concentration

草酸和酒石酸则表现出一定的抑制作用。

2.2 培养土壤中 Hg 形态分布随培养时间的变化

由上面结果可知, 供试土壤中汞赋存形态的变化在添加柠檬酸后最为显著, 且当柠檬酸浓度为 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始稳定. 因此本部分主要分析添加 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸后的土壤随培养时间的变化特征. 由图 3(a) 可知, 有机酸浓度为 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组土壤中 Hg 的赋存形态分布也随培养时间产生

了弱小的变化, 培养 14 d 后 F1、F2、F3 所占的百分比(摩尔分数)分别为: 4.95%、3.71%、9.23%, 比起始比例降低了 0.80%、0.68%、0.31%, 而 F4、F5 的比例为 46.01%、36.10%, 与第 0d 相比略有升高(1.25% 和 1.88%). 这可能是由于所采用的是刚退水的土壤, 对其进行有氧培养时改变了周围环境, 使得土壤中的无机汞随培养时间的延长而逐渐转移结合到更强的结合位点^[17].

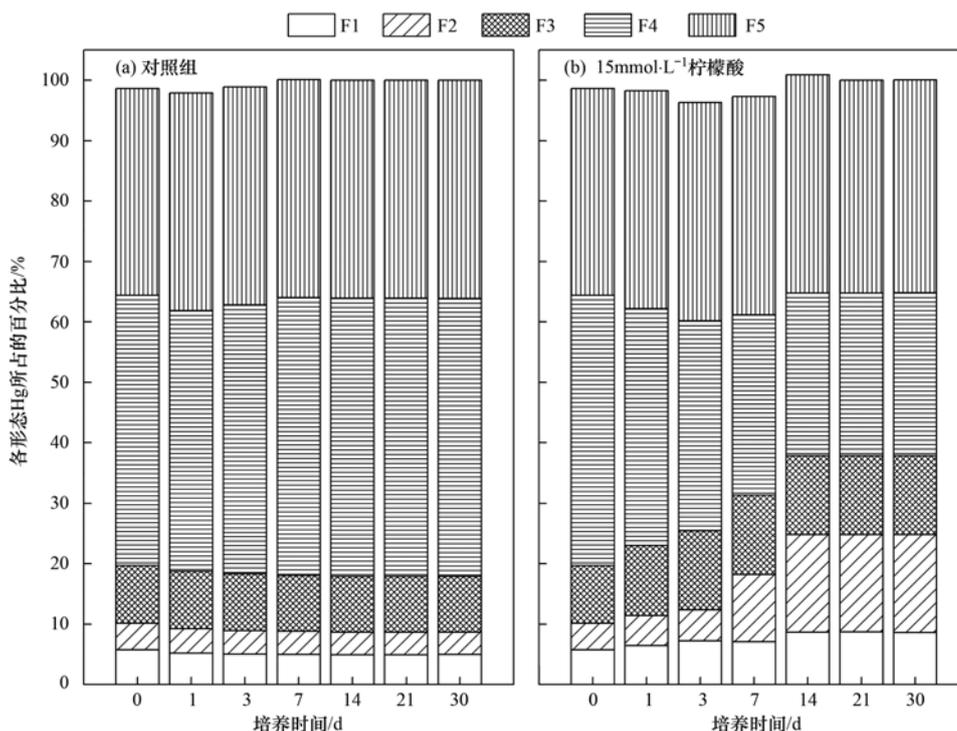


图 3 土壤中汞的形态分布随培养时间的变化

Fig. 3 Variation of distribution of mercury species with incubation time

用 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸培养供试土壤后, 汞赋存形态分布随培养时间的变化与对照组相比呈现出相反的趋势[图 3(b)], 到第 14 d 各个形态不再变化时, F1、F2、F3、F4、F5 所占的比例各自是: 8.67%、16.11%、13.11%、26.92%、36.09%, 其中前 3 种形态汞的比例与初始值相比增长了 2.92%、11.72%、3.58%, F5 仅有小幅度的上升(34.22% ~ 36.09%), 而 F4 降低了 14.85%. F12 增加的幅度随时间的延长先小后大, 表明柠檬酸对土壤汞迁移能力的作用效果随培养时间的增加而愈加显著. F3 在培养初期增加较快, 第 3 d 后趋于平缓, 或许是因为从 F4 中释放出的汞首先会与有机物结合而进入 F3, 当 F3 中的结合位点逐渐趋于饱和时, 汞便进入 F1、F2, 这也可能是 F12 的增幅在后期明显变大的原因之一。

3 讨论

水溶态汞主要包括氯化汞; 胃酸溶解态汞通常有氧化汞以及硫酸汞等; 而与有机及其它络合物结合态汞包含了汞与胡敏酸、富里酸、氨基酸、微生物残体等的络合物以及部分被甲基化的汞; 强络合态汞则指汞与铁锰氧化物、无定形有机硫化物等的络合物; 最稳定的硫化物结合态汞一般指与硫结合的汞(如硫化汞等)^[14,15]. 添加有机酸后能降低土壤的 pH 值, 有利于矿物的溶解而释放重金属^[8]. 同时在 H^+ 浓度较高的酸性环境下, 由于土壤表面电荷性质的影响及 H^+ 离子的代换作用在消耗土壤胶体和矿物表面阳离子吸附位点上占重要地位^[18], 使得强络合态汞所占的比例有所降低, 且随有机酸浓度的增加而减少地更加明显。

培养土壤中汞赋存形态的变化也可能与有机酸的配位体种类、配位体浓度以及 pH 值有关^[18]。许多报道显示在其研究中柠檬酸解吸及活化土壤中 Cu、Pb 的效果最好, 主要是因为柠檬酸是三元酸, 含有的羧基功能团及活性位点较多^[8,19,20]。且从表 2 可以看出, 柠檬酸有 3 个羧基, 柠檬酸与 Hg 络合的稳定性也较高, 柠檬酸-Hg 络合物的稳定系数为 $10^{10.9}$ ^[21]。此外, 柠檬酸不但可以减弱金属离子的专性吸附, 而且可以减弱其电性吸附^[22]。因此本实验中虽然添加不同有机酸后土壤中 F123 占总汞的百分比均有不同程度的上升, 但柠檬酸的作用效果明显高于另外两种二元酸。

添加草酸和酒石酸后 F12 的比例出现微弱的减小, 可能是因为这两种酸具有一定的还原性, 使得 F1 中的汞向 F3 中转化。赵士波等研究表明^[6], 酒石酸对汞的还原反应有明显的促进作用, 而柠檬酸则表现为抑制作用。也有研究指出^[23], 添加柠檬酸会降低土壤对 Pb、Cd 的吸附; 但草酸却能增加其吸附能力。

在研究汞形态分布随培养时间的变化时, 对照组中 F4 在开始阶段出现小幅度下降, 其原因可能是酸可挥发性硫化物 (AVS) 在有氧培养的初期会大量损失。有研究显示沉积物中的 AVS 主要是由无定型硫化铁和弱结晶铁氧化物为主, 汞与他们的结合主要存在 F4 中^[21]。而随后 F4 的比例有所上升, 可能是因为 AVS 基本挥发完全后, F1、F2、F3 中的汞会向结合力更强的形态转移。在添加 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸的实验组中, 由于腐殖酸含多种含氧功能团, 如羧基、酚羟基和醇羟基等, 它们容易与汞发生络合或螯合反应^[24], 所以 F4 中释放出来的汞会首先与包括腐殖酸在内的有机物结合进入 F3, 因此在开始阶段无机汞会在有机物表面上快速吸附。但结合量上升的幅度随培养时间逐步减缓, 并很快达到平衡, 这可能是因为被吸附在有机物表面的无机汞进入微孔结构的速度相对较慢, 无机汞的渗入速率大于有机物表面的吸附速率, 当 F3 中有机物上的结合位点饱和后, 由于溢出效应^[25], 无机汞会进入 F1 和 F2 中, 这也是 F1 和 F2 所占的比例在培养 3 d 后明显增加的原因。培养 14 d 后土壤中汞的形态分布开始趋于稳定, 表示此时能被活化的汞基本反应完全。

4 结论

(1) 柠檬酸能提高三峡水库消落区土壤中汞的

迁移性以及生物有效性, 且作用效果随柠檬酸浓度的增加而愈加显著, 在 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到顶点。

(2) 草酸和酒石酸对土壤中汞的迁移能力表现为一定的抑制作用。两种酸在增加汞的生物有效性方面能力相似, 但不及柠檬酸。其对土壤中汞形态的影响随其浓度的增加而上升, 并均在 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始保持稳定。

(3) 用 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸培养的土壤中, 汞形态分布的变化随培养时间的延长而愈加显著, 直到 14 d 时才基本停止。

参考文献:

- [1] Wiener J G, Krabbenhoft D P, Heinz G H, *et al.* Ecotoxicology of mercury [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 2003. 409-462.
- [2] Hall B D, Rosenberg D M, Wiens A P. Methyl mercury in aquatic insects from an experimental reservoir [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, **55**(9): 2036-2047.
- [3] Gray J E, Hines M E. Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA [J]. Chemical Geology, 2009, **258**(3-4): 157-167.
- [4] Yan H Y, Rustadbakken A, Yao H, *et al.* Total mercury in wild fish in Guizhou reservoirs, China [J]. Journal of Environmental Science, 2010, **22**(8): 1129-1136.
- [5] Cieśliński G, Van Rees K C J, Szmigielska A M, *et al.* Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation [J]. Plant and Soil, 1998, **203**(1): 109-117.
- [6] 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 等. 低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2193-2200.
- [7] Balogh S J, Swainand E B, Nollet Y H. Characteristics of mercury speciation in Minnesota rivers and streams [J]. Environmental Pollution, 2008, **154**(1): 3-11.
- [8] 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 等. 低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3091-3095.
- [9] 钱翌, 刘莹. 单一及复合有机酸对土壤中镉形态的影响研究 [J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 186-189.
- [10] Qin F, Shan X Q, Wei B. Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils [J]. Chemosphere, 2004, **57**(4): 253-263.
- [11] Han F, Shan X Q, Zhang S Z, *et al.* Enhanced cadmium accumulation in maize roots-the impact of organic acids [J]. Plant and Soil, 2006, **289**(1-2): 355-368.
- [12] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤中汞形态分布与风险评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [13] Smolińska B, Król K. Leaching of mercury during phytoextraction assisted by EDTA, KI and citric acid [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2012, **87**(9): 1360-1365.

- [14] Bloom N S, Preus E, Katon J, *et al.* Selective extractions to assess the biogeochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediments and soils [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **479**(2): 233-248.
- [15] Shi J B, Liang L N, Jiang G B, *et al.* The speciation and bioavailability of mercury in sediments of Haihe River, China [J]. *Environment International*, 2005, **31**(3): 357-365.
- [16] 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. 71-102.
- [17] Sverdrup L E, Jensen J, Krogh P H, *et al.* Studies on the effect of soil aging on the toxicity of pyrene and phenanthrene to a soil-dwelling springtail[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, **21**(3): 489-492.
- [18] 胡红青, 刘华良, 贺纪正. 几种有机酸对恒电荷和可变电荷土壤吸附 Cu^{2+} 的影响[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(2): 232-237.
- [19] 倪才英, 田光明, 骆永明, 等. 有机化合物和硝酸溶液对复合污染土壤中 Cu、Zn、Pb 释放的影响[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(2): 237-244.
- [20] 钱翌, 刘莹, 彭晓丽. 低分子量有机酸对土壤中 Pb 形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(4): 261-264.
- [21] Ravichandran M. Interactions between mercury and dissolved organic matter-a review[J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(3): 319-331.
- [22] 杨亚提, 张一平. 土壤胶体表面吸附态铜的解吸动力学特征[J]. *土壤与环境*, 2001, **10**(3): 181-184.
- [23] Hammer D, Keller C. Changes in the rhizosphere of metal-accumulating plants evidenced by chemical extractants [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(5): 1561-1569.
- [24] Yin Y J, Allen H E, Huang C P. Kinetics of mercury (II) adsorption and desorption on soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(2): 496-503.
- [25] Varekamp J C, Buchholtz ten Brink M R, Mccray E L, *et al.* Mercury in long island sound sediments[J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, **16**(3): 613-626.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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. 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