

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O_3 /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化的影响

陈瑞¹, 陈华¹, 王定勇^{1,2,3}, 向玉萍^{1,2}, 申鸿^{1,2*}

(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: 为探究三峡水库这一特殊的周期性干湿交替环境中, 硫酸盐还原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 是否在汞的生物甲基化过程中起主导作用, 本文以库区消落带原土为研究对象, 以灭菌土 + 接种硫酸盐还原菌 *Desulfovibrio africanus* (*D. africanus*, DSM-2603) 为对照 (试验 A), 在每公斤土壤分别添加 0、1、5 mg 汞浓度条件下, 模拟研究原土 (试验 B) 中总汞 (THg) 和甲基汞 (MeHg) 含量的动态变化、总硫酸盐还原菌 (SRB) 数量变化, 以及影响土壤中甲基汞含量的环境因子分析。结果表明, 淹水状况有利于 THg 从土壤中释放, 且 Hg 含量越高, 释放越快; 菌株 *D. africanus* 对汞具生态适应性, 其菌数与 MeHg 含量显著正相关: 在 5 mg·kg⁻¹ Hg 条件下, *D. africanus* 菌数可达 3.65 × 10⁴ cfu·g⁻¹, MeHg 含量也高达 7.60 × 10⁴ ng·kg⁻¹。值得注意的是, 试验 B 处理中, 一方面消落区原土中 SRB 菌数较少, 平均仅 193 cfu·g⁻¹; 另一方面, 土壤 MeHg 含量较低: 在 5 mg·kg⁻¹ Hg 条件下, MeHg 含量仅为 5.54 × 10³ ng·kg⁻¹, 且总 SRB 菌数与 MeHg 含量无显著相关性。由此可以推测, 在三峡水库消落区这种非严格厌氧土壤环境中, SRB 并非优势菌群, 其中还存在着其它对生物汞甲基化起主导作用的好氧或兼性厌氧微生物种群。

关键词: 消落带土壤; 汞; 甲基汞; 生物甲基化; SRB

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3774-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.014

Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Rui¹, CHEN Hua¹, WANG Ding-yong^{1,2,3}, XIANG Yu-ping^{1,2}, SHEN Hong^{1,2*}

(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: Soil simulation experiments with or without addition of external mercury and a non-indigenous bacterium were conducted under laboratory conditions, in order to investigate whether sulfate-reducing bacteria (SRB) are the dominant mercury methylators in the water level fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir, which is a typical periodical wet and dry alternating environment, locating in the Shibaozai Xinzhen Village, Zhong County, Chongqing, China (E108°12'3" and N30°24'36"). The original soil from the WLFZ was firstly sterilized and then inoculated with or without *Desulfovibrio africanus* (*D. africanus* DSM-2603, commercially purchased from the Culture Preservation Center of Microorganisms in Germany, DSMZ) as the control (Test A). The sterilized soils were respectively mixed with 0, 1, or 5 mg·kg⁻¹ Hg²⁺ soil under submerged and non-submerged conditions to simulate changes in the concentrations of total mercury, methylmercury and the growth of *D. africanus*, and the effects of environmental factor on such changes. The results showed that under the submerged situation the release of total mercury (THg) from soils (Test B) increased with the increase of external Hg²⁺ addition, and the higher the external Hg²⁺, the quicker the Hg²⁺ release was. Meanwhile, *D. africanus* displayed an ecological adaptability to mercury and its colony numbers were significantly correlated with the MeHg concentrations in the soil. In soil with 5 mg·kg⁻¹ of external Hg²⁺, the total number of *D. africanus* reached the highest (3.65 × 10⁴ cfu·g⁻¹) while the highest MeHg concentration was 7.60 × 10⁴ ng·kg⁻¹. However, on the one hand, the averaged numbers of soil SRB in the test B was only 193 cfu·g⁻¹. On the other hand, in soil with 5 mg·kg⁻¹ of external Hg²⁺, the MeHg concentration was as low as 5.54 × 10³ ng·kg⁻¹, while no significant relationships were observed between SRB and MeHg. As a result, our results indicated that SRB was not a predominant mercury methylator, while other bacterial groups, either aerobic or anaerobic bacteria, might play an important role in mercury methylation in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir, China.

Key words: soil of water-level-fluctuating zone; mercury; methylmercury; biomethylation; SRB

收稿日期: 2016-02-28; 修订日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41573104, 41373113)

作者简介: 陈瑞 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: ererr1chenrui@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shenhong@swu.edu.cn

汞(Hg)是一种普遍存在的有毒重金属,其毒性最强的形式——甲基汞(MeHg)是一种强亲脂性、高神经毒性的有机汞化合物,可以在生物体内富集积累,进而通过食物链进入人体,具有极大危害性^[1]. 生物和非生物因素都可以使环境中的无机汞发生甲基化,其中微生物对环境中的甲基汞的含量起着至关重要的作用. 研究表明,汞的甲基化作用主要发生在厌氧环境下,产甲烷菌(methanogenus)、硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)和铁还原菌(dissimilatory iron-reducing bacteria, FeRB)中均发现有能使汞甲基化的菌株,其中SRB被认为是水库等环境中最主要的汞甲基化因子^[2~5].

三峡库区是我国最大的年调节型水库,其季节性蓄水、放水过程形成一个垂直高度30 m,面积为350 km²的水库消落带,是一个典型的“汞敏感生态系统”^[6, 7]. 库区被淹没土壤和植物主动或被动的将汞释放到水库生态系统中^[8],同时土壤有机质和植物腐解释放的大量营养物质为微生物提供丰富食物来源,使厌氧生长的SRB等细菌大量生长,促进无机汞向甲基汞转化^[9]. 目前对消落带土壤和沉积物汞含量,甲基化特征及汞的迁移转化取得了一定的研究成果. 消落带沉积物中总汞(THg)含量略高于河流沉积物背景值^[10],且MeHg: THg的值表现为淹没沉积物>落干沉积物^[11]. 李飞等^[12]对三峡库区香溪河消落带泄水期(5~8月)不同海拔土壤理化性质及微生物活性进行研究发现,随海拔降低、淹水强度增强,消落带土壤含水量增加,pH值上升,土壤微生物生物量和微生物熵逐渐降低. 干湿交替还导致土壤中氧化还原电位的交替和不同性质微生

物群落的周期性交替^[13]. 但是,对于其中与汞甲基化相关的微生物种类、生物汞甲基化过程及其影响因素的研究比较缺乏. 在本课题组前期研究中,发现库区消落带10~20 cm土层土壤中,可培养细菌与甲基汞含量呈显著或极显著正相关关系^[14]. 本文通过3个汞浓度水平试验,以汞甲基化模式菌株*Desulfovibrio africanus*(*D. africanus*, DSM-2603)接入灭菌的消落带土壤为对照,研究了三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌的数量与甲基汞含量之间的相关性,通过验证消落带土壤中SRB对甲基汞生成的贡献,以期阐明三峡消落区土壤汞的生物甲基化机制,明确库区甲基汞的释放特征及环境效应等后续研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和水样

供试土壤于2015年5月采自三峡水库腹心地带重庆忠县石宝寨新政村(E108°12'3"; N30°24'36"). 土壤鲜样一部分冷冻干燥后用于测定土壤理化性质(见表1)、THg和MeHg;另一部分经风干、过2 mm筛后用于模拟试验,其中,一半土样经高温高压蒸汽灭菌(121℃,120 min)并晾干后,用于接种*D. africanus*试验(试验A);另一半用于原土试验(试验B)硫酸盐还原菌的数量分析及其与甲基汞含量的相关性.

供试水样取自长江支流的嘉陵江北碛段,基本理化性质见表2. 其中,一半水样经高温高压蒸汽灭菌(121℃,25 min)处理,用于试验A;一半水样用于试验B.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of test soil

pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	机械组成/%			THg /μg·kg ⁻¹	MeHg /ng·kg ⁻¹
			>0.25 mm	<0.02 mm	<0.002 mm		
7.94	13.21	10.29	1.73	70.32	27.23	109.69±7.41	891.68±35.73

表2 水样基本性质

Table 2 Properties of water in the Jialing River

pH	DOC /mg·L ⁻¹	阴阳离子/mg·L ⁻¹					THg /μg·kg ⁻¹	MeHg /ng·kg ⁻¹
		Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻		
8.49	4.07	14.59	0.97	4.35	0.24	2.01	26.41±5.98	0.20±0.04

1.2 供试菌株及培养基

1.2.1 供试菌株

供试SRB菌株*D. africanus*购自德国菌种保藏中心(DSMZ),保存于西南大学资源环境学院.

1.2.2 培养基

菌株*D. africanus*培养和计数用培养基为乳酸-硫酸根基础选择培养基^[15].

SRB计数用培养基选用GB/T 14643.5-2009中

测定 SRB 所用培养基^[16].

1.2.3 培养基和菌悬液的制备

接种对数生长期的菌液于 *D. africanus* 选择培养基^[15]中,30℃厌氧培养 7d,并采用血球计数法测定菌体细胞数量,备用.

1.3 试验设计

表 3 试验处理的设置¹⁾

Table 3 Experimental treatments

处理	0	1	5
A	灭菌土壤/水 + <i>D. africanus</i>	灭菌土壤(水样) + <i>D. africanus</i> + 1 mg·kg ⁻¹ Hg ²⁺	灭菌土壤(水样) + <i>D. africanus</i> + 5 mg·kg ⁻¹ Hg ²⁺
B	未灭菌原土	未灭菌原土 + 1 mg·kg ⁻¹ Hg ²⁺	未灭菌原土 + 5 mg·kg ⁻¹ Hg ²⁺

1) *D. africanus* 菌株的初始接入浓度为 10⁴ cfu·g⁻¹

1.4 样品采集与分析方法

分别于试验的第 1、2、3、5、8、11、15、20、25 和 30 d,采集各处理的水样和土样. 用聚四氟乙烯管虹吸采集水样至硼硅玻璃瓶中,然后加入 0.5% (体积分数)浓盐酸酸化,4℃冷藏待测. 土样使用自制管状采样器按多点采样法分两份采集于无菌自封袋:一份 4℃冷藏,用于微生物计数;另一份冷冻干燥后碾磨过 0.149 mm 筛, -20℃保藏,用于甲基汞、总汞测定以及理化性质分析.

土样 THg 用 DMA-80 固体进样自动测汞仪直接测定,土样和水样 MeHg 分别采用萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法^[17]、蒸馏-乙基化结合 GC-CVAFS^[18]法测定,水样总汞参照 USA EPA Method 1631 标准方法进行检测^[19]. *D. africanus* 细菌数和总 SRB 菌群数采用 MPN 法^[20]测定.

1.5 质量控制及数据处理

本试验中所用玻璃器皿均在使用前用硝酸(25%,体积分数)浸泡 24 h 以上,超纯水清洗后置于马弗炉 500℃灼烧 30 min,洁净无汞环境冷却后使用. 取样器皿使用前均湿热灭菌(121℃,30 min). 分析过程中采用空白试验、标准物质测定、平行样控制及加标回收率进行质量控制. 试验试剂都为优级纯. 土样总汞标准物质为 GBW07405(GSS-5),测定加标回收率为 89%~108%;氯化甲基汞标准溶液来自 Brooks Rand Ltd(USA),测定加标回收率为 86%~118%.

1.6 数据分析

数据分析和作图使用 Excel、SPSS 18.0 和 Origin 8.0.

2 结果与讨论

2.1 土壤总汞的动态变化

土壤 THg 的动态变化如图 1 所示,各处理 THg

试验装置为高 35 cm、直径 22 cm 玻璃瓶(试验过程中用锡箔纸避光). 称取 6 kg 不同处理的土壤(表 3)倾斜铺于玻璃瓶中(约 45°),再缓慢注入 3.5 L 江水,使其淹至斜面高度的一半. 在室温 30℃ ± 3℃条件下,进行为期 30 d 的模拟试验. 每个处理 3 个平行,每个样品重复测定 3 次.

含量总体上呈下降趋势. 试验 A 中,不同处理总汞降幅表现为 A5 > A1 > A0,其中 A0 处理 THg 含量在 30 d 内降低了 5.39%,A1 和 A5 则分别降低了 7.33% 和 7.70%,各处理前后差异不显著($P > 0.05, n = 30$). 该结果与贺春风^[21]的研究一致,这是由于土壤淹没后会将 Hg 释放到水体中,同时上覆水与间隙水中的 Hg 浓度梯度是 Hg 在土壤-水体界面迁移的重要动力,因而初始汞浓度越高,释放越快.

与试验 A 土壤 THg 的动态变化相一致,在试验 B 中,处理 B0、B1、B5 土样 THg 含量在试验前后差异不显著,THg 含量在第 30 d 较第 1 d 分别降低了 3.02%、6.81% 和 7.14%. 此外,试验 B 各处理中 THg 含量的降低程度比试验 A 稍低,但处理间的差异不显著.

2.2 接种 *D. africanus* 对消落带土壤甲基汞含量变化的影响

在试验 A 中,随培养时间增加,各处理 *D. africanus* 细菌数量均呈先增高后减少趋势(图 2). 试验前 8 d,各处理 *D. africanus* 细菌数量均增长缓慢. 第 15 d 开始,A0 快速增长,至第 20 d 达到最大值 2.26×10^4 cfu·g⁻¹,但第 25 d 开始显著降低;A1 第 11 d 开始较快增长,至第 15 d 达到最大值 2.61×10^4 cfu·g⁻¹,第 20 d 开始显著降低;A5 第 20 d 开始急速增长,达到最大值 3.65×10^4 cfu·g⁻¹,随后开始逐渐降低,该结果符合细菌生长规律.

各处理 *D. africanus* 细菌数量达到最大值时表现为: A0 < A1 < A5,分别为初始值的 23.05 倍(第 20 d)、22.77 倍(第 15 d)、39.50 倍(第 20 d). 可见低浓度外源 Hg(A1)能促进菌株 *D. africanus* 生长,使其较快进入对数生长期,且在整个试验周期内,能保持相对高而稳定的活菌数;高浓度 Hg(A5)

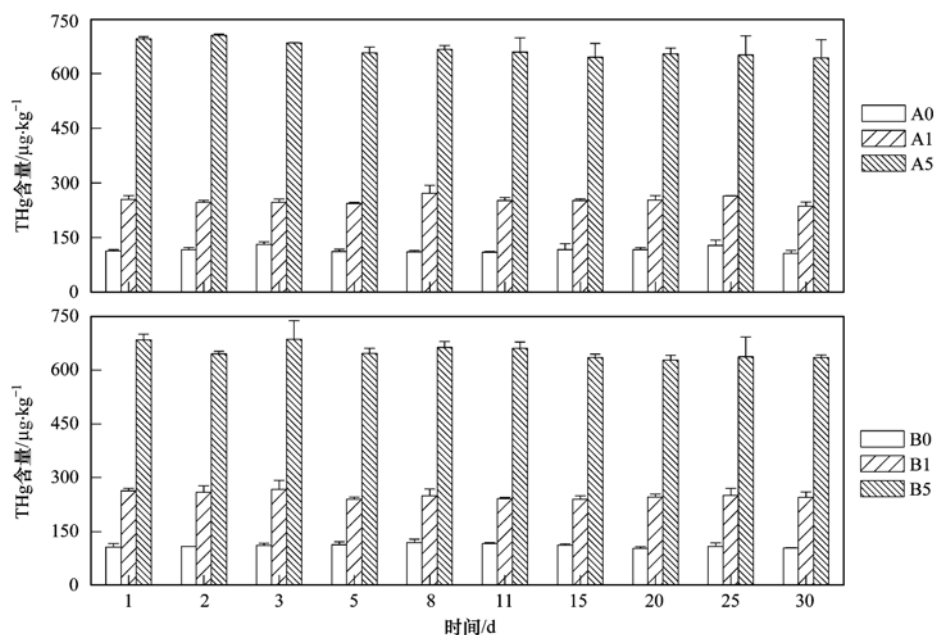


图1 土壤 THg 变化趋势

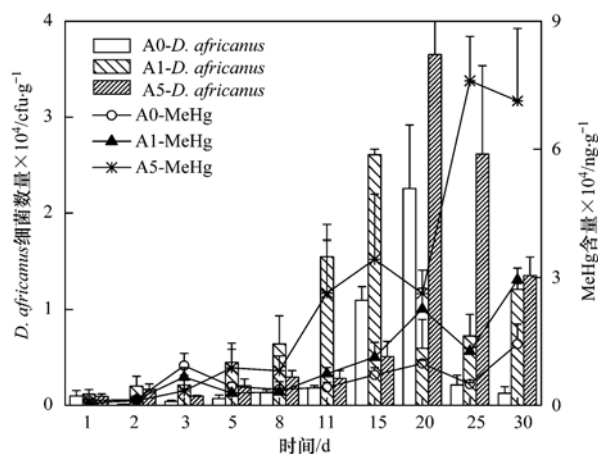
Fig. 1 Variations in soil THg

使菌株 *D. africanus* 的迟缓期延长,因而在前期表现出一定的生长抑制作用,但从 15 d 后,菌株 *D. africanus* 表现出对环境中的汞的生态适应性,且菌数显著高于其余两个处理,这与 Choi 等^[22]的研究结果一致。

由图 2 可见,处理 A0、A1、A5 土壤 MeHg 含量均呈增加趋势。试验前 8 d,3 个处理土壤 MeHg 含量差异不显著,这是外源 Hg 的添加导致微生物汞甲基化活动延迟所致^[23]。随后,A0 土壤 MeHg 含量继续缓慢增长,至第 30 d 达到最大值 1.43×10^4 ng·g⁻¹,为初始值的 12.85 倍;A1 土壤 MeHg 含量变化与 A0 相比差异不显著,到第 30 d 达到最大值 2.94×10^4 ng·g⁻¹,为初始值的 92.74 倍;A5 在第 25 d 达到最大值 7.60×10^4 ng·g⁻¹,为初始值的 122.47 倍。从第 8 d 开始,土壤 MeHg 含量始终表现为 A5 > A1 > A0。结果表明,在不添加外源 Hg 时,菌株 *D. africanus* 仍能利用背景环境下的 Hg,从而表现出一定的汞甲基化能力;添加外源 Hg 后,汞甲基化活动增强,且在试验 Hg 浓度范围内,Hg 浓度越高,甲基化活动越强。该结果与 Randall 等^[24]的研究结果一致。

土壤 MeHg 含量不仅与 THg 含量有关,而且与 *D. africanus* 细菌数量显著正相关性(图 2):A0、A1 和 A5 处理的 *D. africanus* 细菌数量与 MeHg 含量的相关性系数(r^2)分别为 0.36 ($P < 0.05$, $n = 30$)、0.44 ($P > 0.05$, $n = 30$)和 0.56 ($P < 0.01$, $n =$

30)。随着 *D. africanus* 细菌数量的增加,MeHg 含量呈延滞增高趋势:A1 处理在第 5 d 菌体数量显著增加,而 MeHg 含量则在第 11 d 开始显著提高;A5 处理在第 20 d 菌体数量显著增加,而 MeHg 含量则在第 25 d 后跃升。

图2 接种试验 *D. africanus* 菌数与甲基汞含量变化趋势Fig. 2 Variations in *D. africanus* bacteria numbers and MeHg levels over a period of 30 incubation days in the inoculation experiment

2.3 原土 SRB 菌数与 MeHg 含量相关性分析

试验 B 中,各处理的 SRB 菌数量表现为“消-涨”的周期性变化特征(图 3):B0 处理 SRB 菌在 5 d 达到 306 cfu·g⁻¹ 的峰值,然后显著降低,到 30 d 又回升到 410 cfu·g⁻¹ 的峰值水平。与该趋势类似,B1、B5 处理的土壤总 SRB 菌数分别在 8 d 达到第

一个峰值: 分别为 $119 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $541 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$, 在 30 d 达到第二个峰值: 分别为 $421 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1\,105 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$. 总 SRB 菌数量整体表现为 $B0 < B1 < B5$, 表明高 Hg 环境有利于“诱导”土壤总 SRB 数量的增加. 但总体而言, 在非严格厌氧条件下, 三峡库区消落带土壤中 SRB 含量较低, 在整个试验周期内, 3 个处理的总 SRB 菌数平均仅约 $190 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$, 相同 Hg 浓度下均显著小于试验 A 的 3 个处理中 *D. africanus* 细菌数量.

试验 B 处理的土壤 MeHg 含量也呈一定的“消涨”趋势. B0、B1 和 B5 处理在 3~5 d 达到最大值: 2.55×10^3 、 4.08×10^3 和 $5.54 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是第 1 d 的 2.71、7.12 和 7.02 倍. 导致该结果的原因可能在于, 淹水初期形成厌氧水底环境, 有利于汞的甲基化^[25]. 第 30 d, B5 处理的 MeHg 含量为 $1.93 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于 B0 ($0.34 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 B1 处理 ($0.57 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$), 相同 Hg 浓度下均显著小于试验 A 的 3 个处理中 MeHg 含量. 总体上, 土壤 MeHg 含量在整个试验周期内表现为: $B0 < B1 < B5$, 该结果与仇广乐等^[26]的研究一致, 表明外源高汞环境有利于土壤甲基汞的生成.

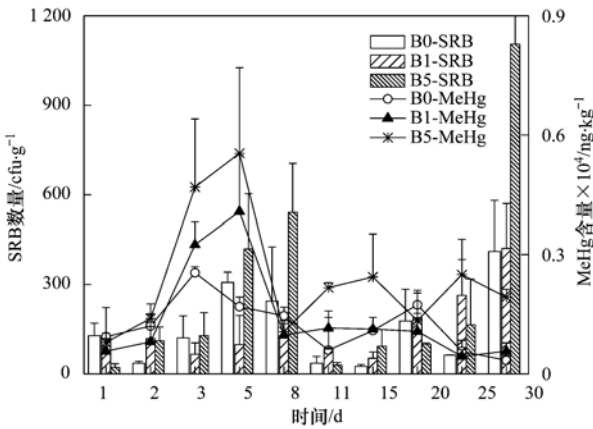


图3 原土试验 SRB 菌数与甲基汞含量变化趋势

Fig. 3 Variations in SRB numbers and MeHg levels over a period of 30 incubation days in the inoculation experiment

值得注意的是, 试验 B 处理中, 原土中 MeHg 含量的消涨与总 SRB 数量不存在显著的相关性 ($P > 0.05, n = 30$), 其相关性系数 (r^2) 分别为: 0.01、0.36、0.02. 结果表明, 在三峡水库消落区土壤中, 硫酸盐还原菌等厌氧微生物并不是最重要的汞生物甲基化微生物. 这可能是由于: ①本次所采土样为 5 月落干期土壤, 而 SRB 为严格厌氧微生物, 其含量本身可能处于较低水平; ②本试验模拟的消落带淹水过程属于非严格厌氧环境, 而 SRB 的汞甲基化作

用是在严格厌氧条件下进行的^[27]. 除厌氧微生物外, 可能存在某些能使汞甲基化的好氧或兼性厌氧微生物^[14], 且库区消落带土壤可培养细菌与甲基汞含量呈显著或极显著正相关关系. 因而推测, 在三峡水库消落区土壤中, 产生汞生物甲基化的微生物种群并不仅仅是硫酸盐还原菌等厌氧微生物, 而其它好氧或兼性厌氧微生物菌群的菌群结构、数量和汞甲基化能力对于甲基汞的生成更为重要.

2.4 土壤 MeHg 占 THg 比例变化

MeHg 占 THg 百分比 (% MeHg) 被认为是判断 MeHg 产率的一个重要指标^[21]. 本试验中, 各处理 MeHg 占 THg 比例如图 4 所示. 试验 A 土壤中 % MeHg 整体呈上升趋势, A0、A1 和 A5 的初始值分别为 1.00%、0.13% 和 0.08%, 并且分别在 25~30 d 达到最大值: 8.88%、12.46% 和 11.05%, 但各处理间差异不显著. 可以看出, 土壤 % MeHg 与汞浓度不是简单的线性关系, 土壤汞浓度越高的处理, 土壤甲基化程度不一定越高. 该结果与李楚娴等^[28]的研究结果类似.

试验 B 中 MeHg 含量呈先增后减趋势, 整体变化较小, B0、B1 和 B5 达到最大值时仅分别较初始值提高 1.46%、0.85% 和 0.73%, 且显著低于处理 A, 可见其甲基化过程较弱.

此外, 在处理 A 中, % MeHg 比率与 *D. africanus* 菌数显著正相关, A0、A1 和 A5 的相关系数 (r^2) 分别为 0.41 ($P < 0.05, n = 30$)、0.34 ($P > 0.05, n = 30$) 和 0.56 ($P < 0.01, n = 30$); 而处理 B 中土壤 % MeHg 含量比率与总 SRB 菌数并没有显著相关性 ($P > 0.05, n = 30$).

2.5 甲基汞含量影响因子分析

土壤 MeHg 含量与 THg、pH 值、有机质和 Eh 等因素的相关性分析见表 4. 结果表明, 试验 A、B 处理中, 土壤甲基汞含量与总汞含量均无显著相关性, 这可能是由于生物可利用性汞只占总汞小部分, 总汞的变化并不能直接反映生物可利用性汞的变化^[29]. 此

表 4 土壤 MeHg 含量与土壤性质的关系¹⁾

Table 4 Correlations between soil MeHg and soil properties				
处理	THg 含量	pH 值	有机质含量	Eh
A0	0.16	-0.39 *	-0.60 *	-0.37
A1	-0.20	-0.45 *	-0.66 **	-0.02
A5	-0.32	-0.43 *	-0.80 **	0.02
B0	0.05	0.16	0.23	0.09
B1	0.06	0.23	-0.05	0.08
B5	0.19	0.31	0.21	-0.07

1) ** 表示 $P < 0.01$ 极显著水平, * 表示 $P < 0.05$ 显著水平; $n = 30$; 负值表示负相关

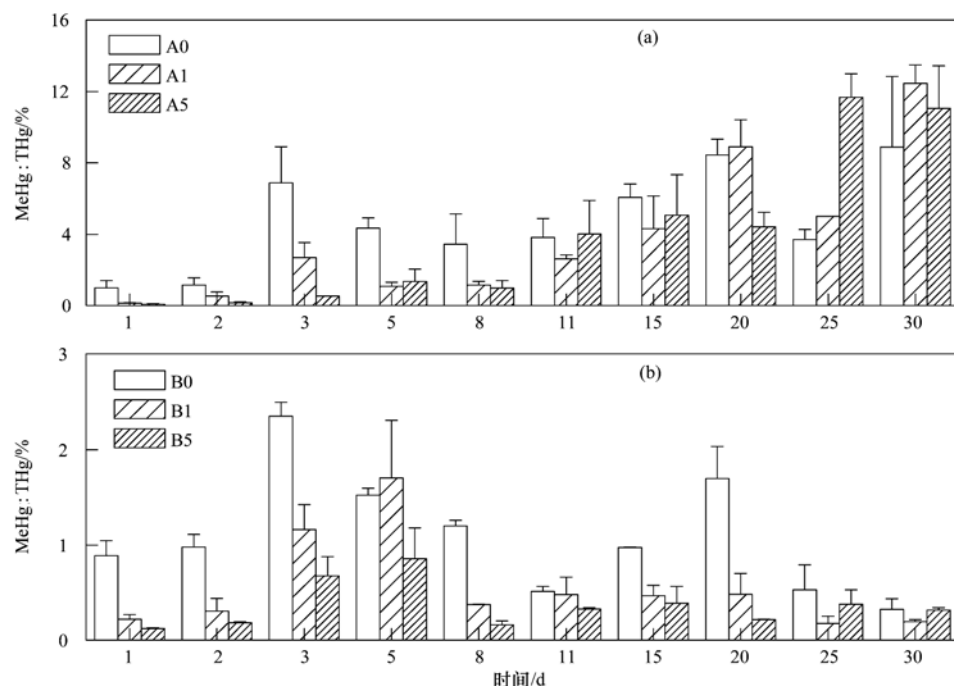


图4 土壤甲基汞占总汞百分比变化趋势

Fig. 4 Variations in the percentage of MeHg in THg over a period of 30 incubation days

外,甲基汞含量与电导率也无显著相关性。

在本研究中,试验 A 中 pH 值和有机质含量均与 MeHg 含量呈显著负相关($P < 0.05, n = 30$);而试验 B 的 pH 值和有机质含量则与 MeHg 无显著相关,该结果与张成等^[30]的研究结果不一致,而与丁小勇^[31]的结果较为吻合,出现这种结果可能是因为试验处理不同所致。

3 结论

(1) 淹水状况有利于 THg 从土壤中释放,且 Hg 含量越高,释放越快。

(2) 三峡库区消落带土壤中总 SRB 菌群数量较低,且总 SRB 数与 MeHg 含量无显著相关性。

(3) 菌株 *D. africanus* 对环境中的 Hg 具有生态适应性,且 *D. africanus* 细菌数量与 MeHg 含量显著正相关。

(4) 受三峡水库季节性蓄水、放水的影响,库区消落带土壤表现为非严格厌氧环境,其中硫酸盐还原菌也并非优势菌群,因此,土壤中甲基汞含量与总 SRB 菌数无显著相关,推测三峡库区消落带土壤中还存在其他主导汞生物甲基化作用的好氧或兼性厌氧微生物种群。

参考文献:

[1] Orihel D M, Paterson M J, Blanchfield P J, *et al.* Experimental evidence of a linear relationship between inorganic mercury

loading and methylmercury accumulation by aquatic biota[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41** (14): 4952-4958.

[2] Fischer R G, Rapsomanikis S, Andreae M O, *et al.* Bioaccumulation of methylmercury and transformation of inorganic mercury by macrofungi [J]. Environmental Science & Technology, 1995, **29**(4): 993-999.

[3] Vaithyanathan P, Richardson C J, Kavanaugh R G, *et al.* Relationships of eutrophication to the distribution of mercury and to the potential for methylmercury production in the peat soils of the everglades[J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(8): 2591-2597.

[4] Siciliano S D, Lean D R S. Methyltransferase: an enzyme assay for microbial methylmercury formation in acidic soils and sediments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, **21**(6): 1184-1190.

[5] Shao D D, Kang Y, Wu S C, *et al.* Effects of sulfate reducing bacteria and sulfate concentrations on mercury methylation in freshwater sediments [J]. Science of the Total Environment, 2012, **424**: 331-336.

[6] Lucotte M, Schetagne R, Thérien N, *et al.* Mercury in the biogeochemical cycle: natural environments and hydroelectric reservoirs of northern Québec (Canada) [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 1-334.

[7] Wiener J G, Krabbenhoft D P, Heinz G H, *et al.* Ecotoxicology of mercury[A]. In: Hoffman D J, Ratter B A, Burton Jr G A, *et al.* (Eds.). Handbook of Ecotoxicology (2nd ed.) [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 2003. 409-463.

[8] Ikingura J R, Akagi H. Total mercury and methylmercury levels in fish from hydroelectric reservoirs in Tanzania[J]. Science of the Total Environment, 2003, **304**(1-3): 355-368.

[9] Louis V L S, Rudd J W M, Kelly C A, *et al.* The rise and fall of

- mercury methylation in an experimental reservoir [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(5): 1348-1358.
- [10] Wang F Y, Zhang J Z. Mercury contamination in aquatic ecosystems under a changing environment: implications for the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(2): 141-149.
- [11] 朱金山. 三峡库区消落带汞的形态转化与释放特征[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [12] 李飞, 张文丽, 刘菊, 等. 三峡水库泄水期消落带土壤微生物活性[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(4): 968-974.
- [13] 牛志明, 解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. *科技导报*, 1998, **16**(4): 61-62, 6.
- [14] Xiang Y P, Du H X, Shen H, *et al.* Dynamics of total culturable bacteria and its relationship with methylmercury in the soils of the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(24): 2966-2972.
- [15] Widdel F, Bak F. Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria[A]. In: Balows A, Trüper H G, Dworkin M, *et al* (Eds.). *The Prokaryotes* [M]. New York: Springer, 1992. 3352-3378.
- [16] GB/T 14643.5-2009, 工业循环冷却水中菌藻的测定方法 第5部分: 硫酸盐还原菌的测定 MPN 法[S].
- [17] 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.
- [18] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琰, 等. 蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法测定天然水体中的甲基汞[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 568-571.
- [19] United States EPA-821-R-02-019, Method 1631: Mercury in water by oxidation, purge, and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [20] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] 贺春风. 三峡库区消落带土壤淹水过程汞释放与甲基化特征的模拟研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [22] Choi S C, Chase Jr T, Bartha R. Enzymatic catalysis of mercury methylation by *Desulfovibrio desulfuricans* LS[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, **60**(4): 1342-1346.
- [23] Gilmour C C, Elias D A, Kucken A M, *et al.* Sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio desulfuricans* ND132 as a model for understanding bacterial mercury methylation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(12): 3938-3951.
- [24] Randall P M, Fimmen R, Lal V, *et al.* In-situ subaqueous capping of mercury-contaminated sediments in a fresh-water aquatic system, Part I—Bench-scale microcosm study to assess methylmercury production[J]. *Environmental Research*, 2013, **125**: 30-40.
- [25] Ikingura J R, Akagi H. Methylmercury production and distribution in aquatic systems [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **234**(1-3): 109-118.
- [26] 仇广乐, 冯新斌, 王少峰, 等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 550-555.
- [27] 梁小兵. 汞甲基化细菌研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(3): 755-761.
- [28] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2721-2727.
- [29] 包正铎, 王建旭, 冯新斌, 等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞的形态分布特征[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 907-913.
- [30] 张成, 宋丽, 王定勇, 等. 三峡库区消落带甲基汞变化特征的模拟[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 499-504.
- [31] 丁小勇. 珠三角地区土壤与北江沉积物中汞污染现状与评价初步研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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