

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫酸脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究

郑家传¹, 张建荣^{1*}, 刘希雯¹, 许倩², 施维林²

(1. 苏州市环境科学研究所, 苏州 215007; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 通过采集苏州某化工原址场地铬污染土壤, 首先加入石硫合剂使大部分六价铬[Cr(VI)]还原, 再加入营养液促进土著微生物大量生长, 利用微生物还原稳定化土壤中的铬。培养 60 d 后, 通过毒性浸出、土壤中剩余 Cr(VI) 测定等实验确定稳定化效果, 结果表明, 加入 5% 营养液培养后, 土壤毒性浸出液中 Cr(VI) 浓度由原来的 $8.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降低了 96.8%, 总铬浓度由原来 $14.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降低了 95.7%。另外, 通过高锰酸钾氧化实验和灭菌实验确定稳定化的持久性, 高锰酸钾氧化后, 仅通过还原处理的土壤浸出液中 Cr(VI) 由 $8.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而经稳定化后的土壤浸出液中 Cr(VI) 降低到 $2.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。稳定化后的土壤样品经紫外灭菌, 发现微生物消亡后, 对稳定化效果没有显著影响。因此, 初步证明了高浓度高毒性的 Cr(VI) 污染土壤经初步还原后再经微生物稳定化治理是可行的, 为 Cr(VI) 污染场地治理提供了一种高效低成本的修复技术。

关键词: Cr(VI); 稳定化; 土壤; 还原; 微生物

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3882-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.034

Bioremediation of Chromium (VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium

ZHENG Jia-chuan¹, ZHANG Jian-rong¹, LIU Xi-wen¹, XU Qian², SHI Wei-lin²

(1. Suzhou Environmental Science Research Institute, Suzhou 215007, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Chromium(VI) contaminated soil samples were collected from a chemical plant in Suzhou. Firstly, the reduced soil was prepared by adding reagent (Stone-sulfure reagent) into polluted soil to transfer most chromium(VI) into chromium(III), then a nutrient solution was introduced into the reduced soil, and the stabilized soil was obtained after 60 days culturing. The chromium(VI) content of the three kinds of soil was analyzed. The results showed that the chromium(VI) content in toxicity characteristic leaching liquid (TCLL) dropped by 96.8% (from $8.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and the total chromium content dropped by 95.7% (from $14.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) after bioremediation in 5% nutrient solution. Additionally, the durability of chromium stabilization was tested by potassium permanganate oxidation and sterilization of microbe-treated soil. After oxidation, the chromium(VI) content in TCLL of the reduced soil was increased from $8.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. However, the content after bioremediation was decreased to $2.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The results of sterilization demonstrated that the death of microbe had no significant effect on the stabilization of chromium. Consequently, the research in this paper demonstrated the feasibility of bioremediation of chromium(VI) polluted soil through reduction followed by stabilization/soilidification, and provided a technique with low cost but high efficiency.

Key words: Cr(VI); stabilization; soil; reduction; microorganism

铬盐是我国无机化工主要系列产品之一^[1], 广泛应用于冶金、制革、颜料、染料、香料、金属表面处理、木材防腐、军工等众多工业^[2~5], 被列为最具有竞争力的 8 种资源性原材料产品之一^[6]。铬在自然界中最常见的价态是 Cr(III) 和 Cr(VI), Cr(III) 毒性较小, 而且在土壤中容易被土壤胶体吸附或形成沉淀, 活性较低, 对生物的毒害作用相对较轻, 而 Cr(VI) 与土壤胶体的吸附较弱, 容易随地表径流污染周边地表水或下渗污染地下水^[7~9]。Cr(VI) 对人体的危害较大, 据报道, Cr(VI) 可渗入动物细胞, 与细胞内的大分子结合, 导致蛋白质变性, 引起遗传秘密的改变, 进而引起细胞的突变或癌变^[10]。

我国是铬盐的主要生产国家, 年产量约 40 万 t,

并以每年 10% 的速度在递增, 总产量约占世界产量的 40%^[11,12]。目前生产铬盐的方法主要是钙焙烧法^[13], 通常每生产 1 t 铬盐就要排出 2.5~3 t 铬渣, 大量的铬渣堆积导致场地受到严重污染。随着退“二进三”战略的实施, 许多生产铬盐的化工厂搬离城区, 留下了大量被污染的土壤亟待治理。

目前, 针对铬污染场地的常用治理方法包括: 化学还原、化学清洗、电动修复等技术^[14~16], 化学还

收稿日期: 2014-03-31; 修订日期: 2014-05-07

基金项目: 江苏省环境保护科研课题项目(2012041); 苏州市科技计划项目(SS201233)

作者简介: 郑家传(1979~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为污染场地调查修复, E-mail: zhengjc@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: 2huorong08@163.com

原法不仅大量消耗还原剂,而且,经还原之后的Cr(Ⅲ)在土壤复杂环境下一段时间后,容易再次转化为Cr(Ⅵ);化学清洗法成本极高,很难被推广应用;电动修复技术需要消耗大量电能,而且修复效果不理想。本研究利用微生物原位稳定化技术治理铬污染土壤,首先将高浓度高毒性Cr(Ⅵ)部分还原为低毒Cr(Ⅲ),再向土壤注入营养液,增加土著微生物的生长,利用微生物代谢作用将剩余的Cr(Ⅵ)还原,并将其稳定化,与土壤形成团聚体,避免Cr(Ⅲ)溶出或再次转化为Cr(Ⅵ),从而达到治理铬渣污染场地的目的。

1 材料与方法

1.1 实验土壤

实验土壤采自苏州某化工厂,取约500 kg土壤,剔除石块和杂草等杂质,放置集装箱内,搅拌均匀,加盖后备用。经检测土壤中铬(Ⅵ)含量为964 mg·kg⁻¹,总铬含量为4 352 mg·kg⁻¹。

1.2 实验方法

1.2.1 铬(Ⅵ)还原实验

本研究选用价格低廉的石硫合剂(主要成分为多硫化钙)作为还原剂。取1 kg土壤4份,分别按照0.35%、0.5%、0.7%和1%的比例,将石硫合剂溶解于50 mL蒸馏水中,再将溶液缓慢加入实验土壤,充分搅拌后放置24 h,测定土壤中铬(Ⅵ)含量。

1.2.2 微生物还原稳定化实验

本研究采用乳酸乙酯溶液作为生物营养剂,用2 L的塑料桶加入2 kg经还原剂还原后的土壤,分别加入不同比例的营养剂,搅拌均匀,置于培养箱中28℃培养,分别在3、7、14、28、40、60 d取一定量的土壤样品,测定土壤中剩余Cr(Ⅵ)浓度、毒性浸出液中Cr(Ⅵ)和总铬浓度以及用高锰酸钾溶液氧化后再测定毒性浸出液中Cr(Ⅵ)浓度,确定微生物稳定化效果,实验设置1个不加营养液(营养液为0%)28℃培养和1个加入10%营养液冰箱4℃冷藏的对照实验(抑制微生物生长),每组实验设置1个平行样。

1.2.3 土壤中Cr(Ⅵ)、总铬的测定

土壤中Cr(Ⅵ)的测定参照《固体废物六价铬的测定 碱消解/火焰原子吸收分光光度法》(HJ 687-2014)^[17],称取(2.5±0.10) g土壤样品于250 mL消解容器中,依次加入(50±1) mL消解液、400 mg MgCl₂和0.5 mL 1.0 mol·L⁻¹磷酸缓冲溶液,加盖,移至磁力搅拌器上搅拌5 min,然后加热至90~

95℃,保持至少60 min,冷却后过滤,用5.0 mol·L⁻¹的硝酸调节滤液pH至7.5±0.5,再参考文献[18],折算出土壤中总Cr(Ⅵ)浓度。

土壤中总铬的测定参照火焰原子吸收光谱法:称取0.20 g土壤样品于50 mL聚四氟乙烯坩埚中,用水湿润后加入10 mL盐酸,低温加热蒸发至约3 mL,取下稍冷,然后加入5 mL硝酸、5 mL氢氟酸、3 mL高氯酸,中温加热1 h左右,开盖继续加热保持150℃,除硅时经常摇动坩埚,驱赶白烟蒸至内溶物呈黏稠状,取下坩埚稍冷,加入3 mL 1:1盐酸,全量转移至50 mL容量瓶中,加入5 mL 10%氯化铵水溶液,冷却后定容,用ICP-AES(Optima 8000,美国,铂金埃尔默公司)测土壤中总铬浓度。

1.2.4 毒性浸出实验

本研究参照《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007)制备土壤浸出液^[19]。称取100 g样品,置于提取瓶中,按液固比为10:1计算所需浸提剂的体积,加入质量比为2:1的浓硫酸和浓硝酸混合液配制的pH为3.20±0.05的浸提剂,盖紧后固定在翻转式振荡装置上(固体废物毒性浸出设备,美国,默克密理博公司),转速为(30±2) r·min⁻¹,于(23±2)℃下振荡(18±2) h,过滤收集浸出液,测定毒性浸出液中的Cr(Ⅵ)浓度和总铬浓度。

1.2.5 高锰酸钾氧化实验

为了证明微生物稳定化效果的长期稳定性,本研究将培养一定时间的土壤样品取出100 g后,加入50 mL用提取液配制的高锰酸钾溶液,充分搅拌后放置4 h,使体系充分反应后,按液固比为10:1补充相应剂量的浸提剂进行毒性浸出实验,测定浸出液中残留Cr(Ⅵ)浓度。

1.2.6 稳定化效果实验

为了确定微生物死后,经微生物稳定化的Cr(Ⅵ)是否会溶出,本研究将培养60 d的土壤经紫外灯灭菌24 h后,测定土壤及毒性浸出液中Cr(Ⅵ)浓度,并用高锰酸钾氧化后测定浸出液中Cr(Ⅵ)浓度,确定稳定化效果。

2 结果与讨论

2.1 还原剂使用量的优化

土壤中Cr(Ⅵ)浓度较高时会对微生物生长产生抑制作用^[20,21],本研究使用还原剂先将土壤中大部分Cr(Ⅵ)还原成Cr(Ⅲ)后,再加入营养剂,促进微生物生长,利用微生物将剩余的Cr(Ⅵ)还原后再

稳定化.

本研究选择价廉易得的石硫合剂(主要成分为多硫酸钙)作为还原剂还原土壤中Cr(VI). 随着石硫合剂加入量的增加,土壤中Cr(VI)浓度逐渐下降,然而下降趋势并不呈线性关系,实验结果见表1,原土中Cr(VI)浓度为 $964\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每 kg 土壤中加入石硫合剂 3.4 g ,搅拌后放置 1 d ,土壤中剩余Cr(VI)为 $195\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,石硫合剂与Cr(VI)的质量比为 $3.78:1$,当石硫合剂加入量增加至 10.2 g 时,土壤中剩余的Cr(VI)为 $1.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,石硫合剂与Cr(VI)的质量比达到 $11.4:1$,因此仅仅依靠还原剂还原土壤中Cr(VI)的方法,不仅大量消耗还原剂,而且可能会破坏原土的性质和生态环境,另外,根据报道,仅仅通过还原的方法将Cr(VI)还原成Cr(III)是不稳定的,随着时间的推移,土壤中氧气等氧化性物质的存在,Cr(III)会缓慢地回到Cr(VI)^[22~24],因此,本研究使用石硫合剂将土壤中高浓度的Cr(VI)还原到大约 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,再加入营养剂,利用微生物将剩余的Cr(VI)还原后实现稳定化,避免Cr(III)再次转化为Cr(VI).

表 1 还原剂使用量的优化

Table 1 Optimization of reductant amount			
编号	石硫合剂加入量 /g	Cr(VI)剩余 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\frac{m(\text{石硫合剂})}{m[\text{Cr(VI)}]}$
1	0	964	0
2	3.4	195	3.78
3	5.1	19.8	5.68
4	6.8	2.7	7.57
5	10.2	1.3	11.4

2.2 微生物还原研究

在每 kg 实验土壤中加入 3.4 g 石硫合剂,待Cr(VI)还原后,稳定放置1周,加入微生物生长营养剂——乳酸乙酯,乳酸乙酯是工程上常用的微生物营养剂,价廉易得,对土壤负面影响小. 本研究通过向已还原土壤中加入不同量的营养剂,搅拌均匀后,放置培养箱中 28°C 培养 60 d ,并在不同时间间隔取样,测定土壤中剩余Cr(VI)浓度,结果见图1,可以看出,未加入营养液的土壤,Cr(VI)的浓度下降非常缓慢,培养 60 d 后,土壤中Cr(VI)浓度为 $165\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低约 13.6% ;加入营养液的土壤,Cr(VI)浓度随着培养天数的增加迅速降低,营养液浓度越高,Cr(VI)转化效果越明显,加入 1% 和 5% 的营养液培养 60 d 后,Cr(VI)转化率分别达到 80.4% 和 89.8% ,加入 10% 的营养液培养 60 d 后,剩余Cr(VI)为 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,转化率为 89.5% ,营养

液浓度增加到 5% 以后,效果增加不明显. 为了消除营养液的干扰,本实验将加入 10% 营养液的土壤放入冰箱中 4°C 冷藏,抑制微生物的生长, 60 d 后测定土壤Cr(VI)含量,实验发现Cr(VI)转化率非常低,仅有 15.2% ,与未加入营养液培养的结果相近. 因此,表明营养液的加入,大大促进了土壤中微生物的生长,Cr(VI)在微生物还原酶的作用下转化为Cr(III),使土壤中总Cr(VI)浓度显著降低.

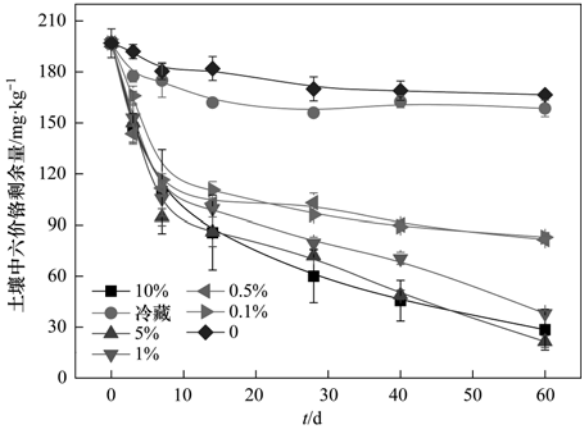


图 1 营养液加入量对土壤中剩余Cr(VI)浓度的影响

Fig. 1 Influence of the amount of nutrient solution on the residual Cr(VI) concentration in soil

2.3 毒性浸出研究

毒性浸出指标是固体废物管理领域常用的监测指标,也是衡量重金属污染场地治理效果的关键指标之一^[25~27]. 为了进一步阐明微生物还原稳定化Cr(VI)的效果,本研究对微生物稳定化效果进行了毒性浸出研究. 对微生物稳定化实验不同时间间隔取样测定毒性浸出液中Cr(VI)和总铬浓度,实验结果见图2和图3. 可以看出当培养体系在未加入营养液或冷藏条件下,毒性浸出液中Cr(VI)和总铬下降不明显. 当培养体系加入 0.1% 的营养液在 28°C 下培养 3 d 后,浸出液中Cr(VI)的浓度迅速降低为 $3.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低 60.4% ,总铬浓度降低为 $8.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低 40.5% ;随着培养时间的延长,浸出液中Cr(VI)和总铬的浓度缓慢降低,培养 60 d 后,降低到 $0.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低 91.0% ,总铬浓度降低到 2.51 ,降低 82.9% . 当营养液浓度增加到 1% 时,微生物稳定化效果也有所增加,培养 60 d 后,浸出液Cr(VI)浓度下降为 $0.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低 95.0% ,总铬浓度下降为 $1.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低 89.4% . 当营养液浓度再增加对稳定化效果的影响不明显. 可以看出微生物可以较好地还原土壤中的Cr(VI),并且稳定化Cr(III),避免溶出. 稳定化后的土壤浸出液能够达到

《铬渣污染治理环境保护技术规范》(HJ/T 301-2007) (暂行) 标准中铬渣综合利用的要求^[28]. Cr(Ⅲ) 稳定化机制可能是由于耐铬微生物将Cr(Ⅲ) 摄入体内并与土壤形成团聚体, 从而避免溶出.

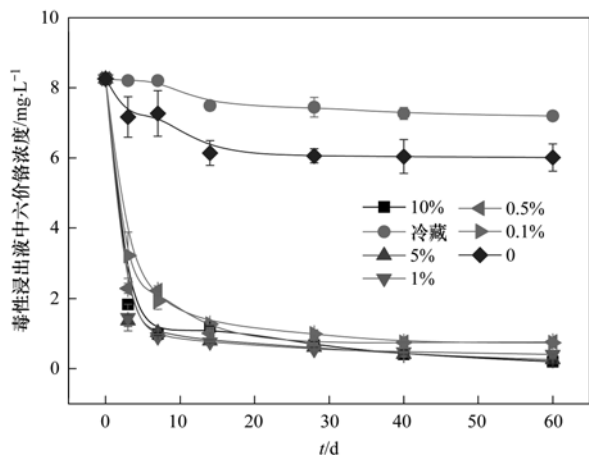


图2 营养液加入量对土壤毒性浸出液中Cr(VI)浓度的影响

Fig. 2 Influence of the amount of nutrient solution on the Cr(VI) concentration in soil leachate

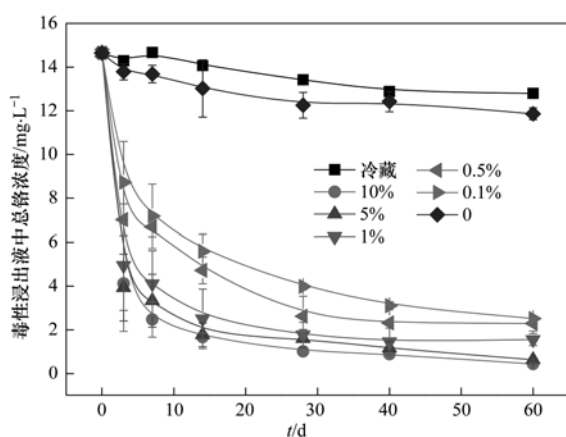


图3 营养液加入量对土壤毒性浸出液中总铬浓度的影响

Fig. 3 Influence of the amount of nutrient solution on the total Cr concentration in soil leachate

2.4 高锰酸钾氧化研究

目前铬污染土壤修复常用硫酸亚铁还原法, 向土壤中加入硫酸亚铁粉末或溶液搅拌, 使Cr(VI)还原为Cr(Ⅲ)^[29~31]. 然而根据文献报道, 用这种方法还原的Cr(Ⅲ) 不稳定, 在强氧化剂或氧气等长期作用下Cr(Ⅲ) 会缓慢再次转化为Cr(VI)^[22~24]. 为了证明微生物稳定化效果的长期稳定性, 本研究将培养一定时间的土壤样品取出后, 加入一定浓度的高锰酸钾溶液, 充分搅拌后放置4 h, 使体系充分反应后, 进行毒性浸出实验, 测定浸出液中残留Cr(VI) 浓度, 实验结果见图4, 可以看出, 仅通过还原处理

的土壤样品(以下称还原土壤)经高锰酸钾氧化后浸出液浓度(以下称氧化后浓度)由 $8.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图2)上升至 $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 未加营养液体系和加入营养液冷藏体系培养60 d后, 氧化后浓度分别为 $13.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与还原土壤基本相当, 不能有效地阻止Cr(Ⅲ) 氧化为Cr(VI). 而当加入营养液28℃培养一段时间后, 取样进行毒性浸出实验, 浸出液浓度较还原土壤的相应浓度显著降低, 当加入1%的营养液培养60 d后, 高锰酸钾氧化后浸出液浓度为 $3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 加入10%的营养液培养60 d后, 浓度为 $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较还原土壤氧化后浓度的 $14.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低了86.7%. 可以看出微生物可以稳定土壤中的Cr(Ⅲ), 大大减少Cr(Ⅲ) 再次氧化为Cr(VI) 的风险.

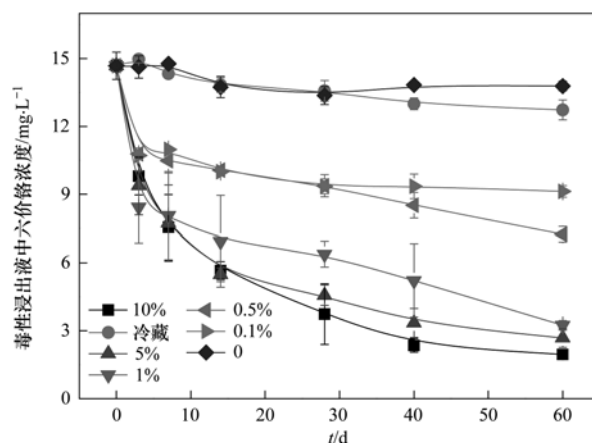


图4 高锰酸钾氧化后土壤毒性浸出液中Cr(VI)浓度

Fig. 4 Cr(VI) concentration in soil leachate after oxidation using potassium permanganate solution

2.5 稳定化效果研究

通过以上研究发现, 营养液的加入, 促进了土著微生物的大量生长, 将剩余的Cr(VI) 大部分转化为Cr(Ⅲ), 并将Cr(Ⅲ) 稳定化, 不易溶出或再次被氧化成Cr(VI). 为了验证微生物死后, 稳定化效果是否会有明显降低, 本研究通过灭菌的方法, 使微生物失活, 再进行碱消解、毒性浸出和高锰酸钾氧化等实验, 与灭菌前进行对比. 为了防止高温灭菌发生Cr(Ⅲ) 和Cr(VI) 的转化, 本研究采用紫外灭菌法, 取加入1%营养液培养60 d的土壤样品, 均匀铺放于玻璃板上, 厚度约1~2 mm, 放在紫外灯下灭菌24 h, 期间经常翻动土壤样品, 保证灭菌充分. 测定结果见表2, 可以看出灭菌前后, 土壤、毒性浸出液以及使用高锰酸钾氧化后毒性浸出液中Cr(VI) 浓度均没有发生显著变化, 因此可以看出微生物对Cr(VI) 的还原效果非常稳定, 不会因微生物的消亡而溶出.

表 2 稳定化效果研究

Table 2 Effect of bio-stabilization

检测项目	1% 营养液培养 60 d 的土壤	1% 营养液培养 60 d 的土壤灭菌后
土壤中Cr(VI)浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	38 ± 1.4	43 ± 3.9
毒性浸出液中Cr(VI)浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.41 ± 0.02	0.38 ± 0.06
高锰酸钾氧化后毒性浸出液中Cr(VI)浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.24 ± 0.21	3.07 ± 0.63

3 结论

(1)通过加入一定比例的石硫合剂将土壤中部分高毒性高浓度的Cr(VI)还原到大约 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,再加入乳酸乙酯营养剂,促进土壤中微生物的生长,Cr(VI)在微生物还原酶的作用下转化为Cr(III),使土壤中总Cr(VI)浓度显著降低。

(2)毒性浸出研究表明微生物可以较好地还原Cr(VI)和稳定化Cr(III),加入1%的营养液培养60 d后,可以将土壤毒性浸出液中Cr(VI)浓度降低95.0%,总铬浓度降低89.4%。

(3)将培养一定时间的土壤样品进行高锰酸钾氧化研究,发现微生物可以稳定土壤中的Cr(III),大大减少Cr(III)再次氧化为Cr(VI)的风险。

(4)培养60 d后的土壤样品经过灭菌实验表明微生物对Cr(VI)的还原效果非常稳定,不会因微生物的消亡而溶出。

参考文献:

- [1] 王少娜,郑诗礼,张懿. 铬盐清洁生产工艺中铝硅的脱除[J]. 中国有色金属学报, 2007, **17**(7): 1188-1194.
- [2] 那贤昭,齐渊洪. 铬渣在钢铁冶金过程中的资源化利用[J]. 钢铁研究学报, 2009, **21**(4): 1-4.
- [3] 张焕祯,李淑芳,赵韵琪,等. 利用含铅粉尘制铬黄颜料的研究[J]. 环境工程, 1997, **15**(6): 50-53.
- [4] 周立祥,方迪,周顺桂,等. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 62-66.
- [5] 黄德荣. 冶金厂含铬废水还原吸附治理[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 2000, **22**(3): 61-64.
- [6] 石玉敏,李俊杰,都兴红,等. 采用固相还原法利用工业废渣治理铬渣[J]. 中国有色金属学报, 2006, **16**(5): 919-923.
- [7] 龙腾发,柴立元,傅海洋,等. 铬渣浸出毒性试验研究[J]. 环境工程, 2004, **22**(6): 71-73.
- [8] 戴宇,杨重法,郑袁明. 土壤-植物系统中铬的环境行为及其毒性评价[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3432-3440.
- [9] 王凤花,罗小三,林爱军,等. 土壤Cr(VI)污染及微生物修复研究进展[J]. 生态毒理学报, 2010, **5**(2): 153-161.
- [10] 张忠义,刚葆琪. 铬及其化合物的遗传毒性研究进展[J]. 工业卫生与职业病, 1995, **21**(4): 245-250.
- [11] 纪柱. 中国铬盐近五十年发展概况[J]. 无机盐工业, 2010, **42**(12): 1-5, 15.
- [12] 丁翼. 中国铬盐生产状况与展望[J]. 化工进展, 2004, **23**(4): 345-348.
- [13] 彭聘,刘旋,刘大银,等. 铬盐行业清洁生产审核探讨[J], 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 128-131.
- [14] 尹晋,马小东,孙红文. 电动修复不同形态铬污染土壤的研究[J], 环境工程学报, 2008, **2**(5): 684-689.
- [15] 王兴润,刘雪,颜湘华,等. 铬渣污染土壤清洗筛选研究[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(11): 1405-1409.
- [16] 梁金利,蔡焕兴,段雪梅,等. 还原法修复六价铬污染土壤的研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(3): 80-83.
- [17] HJ 687-2014, 固体废物 六价铬的测定 碱消解/火焰原子吸收分光光度法[S]
- [18] GB/T 15555. 4-1995, 固体废物 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法[S]
- [19] HJ/T 299-2007, 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法[S]
- [20] Gurung A, Oh S E. Use of sulfur-oxidizing bacteria for assessment of chromium-contaminated soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(1): 139-143.
- [21] Long D Y, Tang X J, Cai K, *et al.* Cr(VI) resistance and removal by indigenous bacteria isolated from chromium-contaminated soil [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, **23**(8): 1123-1132.
- [22] Viti C, Giovannetti L. The impact of chromium contamination on soil heterotrophic and photosynthetic microorganisms[J]. Annals of Microbiology, 2001, **51**(2): 201-213.
- [23] Viti C, Giovannetti L. Characterization of cultivable heterotrophic bacterial communities in Cr-polluted and unpolluted soils using Biolog and ARDRA approaches [J]. Applied Soil Ecology, 2005, **28**(2): 101-112.
- [24] Viti C, Pace A, Giovannetti L. Characterization of Cr(VI)-resistant bacteria isolated from chromium-contaminated soil by tannery activity[J]. Current Microbiology, 2003, **46**(1): 1-5.
- [25] Rekesi M, Feigl V, Uzinger N, *et al.* Effects of leaching from alkaline red mud on soil biota: modelling the conditions after the Hungarian red mud disaster[J]. Chemistry and Ecology, 2013, **29**(8): 709-723.
- [26] Song F Y, Gu L, Zhu N W, *et al.* Leaching behavior of heavy metals from sewage sludge solidified by cement-based binders [J]. Chemosphere, 2013, **92**(4): 344-350.
- [27] Tsang D C W, Olds W E, Weber P A, *et al.* Soil stabilisation using AMD sludge, compost and lignite: TCLP leachability and continuous acid leaching[J]. Chemosphere, 2013, **93**(11): 2839-2847.
- [28] HJ/T 301-2007, 铬渣污染治理环境保护技术规范[S]
- [29] Guan X H, Dong H R, Ma J, *et al.* Simultaneous removal of chromium and arsenate from contaminated groundwater by ferrous sulfate: Batch uptake behavior [J]. Journal of Environmental

- Sciences, 2011, **23**(3): 372-380.
- [30] Moon D H, Wazne M, Koutsospyros A, *et al.* Evaluation of the treatment of chromite ore processing residue by ferrous sulfate and asphalt[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(1): 27-32.
- [31] Su C M, Ludwig R D. Treatment of hexavalent chromium in chromite ore processing solid waste using a mixed reductant solution of ferrous sulfate and sodium dithionite [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(16): 6208-6216.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行