

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测

李培中¹, 吕晓健², 王海见¹, 杨苏才¹, 魏文侠¹, 宋云^{1*}

(1. 轻工业环境保护研究所 工业场地污染与修复北京市重点实验室, 北京 100089; 2. 河北地质大学勘查技术与工程学院, 石家庄 050031)

摘要: 针对目前国内进行六价铬污染土壤修复过程关键性控制参数相对缺乏, 且中长期稳定性效果相对较差等问题. 选取北方某电镀厂六价铬污染严重的表层土壤, 使用 5 组还原试剂进行还原稳定化试验, 同时通过在线 ORP (氧化还原电位) 测试仪在线监测和定期取样测试, 探索不同还原剂的反应效率和最终效果. 其中试剂 4 对六价铬的还原稳定化率最高, 基本上均在 99.5% 以上, 六价铬浓度最低可达到 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从反应速率来看试剂 1 和 4 反应速率最快. 反应过程的 ORP、pH 值监测数据也出现较大的区别, 其中第 1 组土壤样品整个过程中 ORP 始终处于 -400 mV 左右; 第 4 组反应在 30 h 以后, 由 -200 mV 逐步升高并稳定在 100 mV 左右. 从反应体系中的 pH 值变化情况看, 唯一使土壤 pH 保持在 7 左右的是试剂 4. 综合判断试剂 4 (多硫化钙和亚铁盐复配试剂) 的综合还原效果最佳. 以试剂 4 为基础进行单独放大试验, 通过 ORP 和电导率两个关键参数的变化情况发现还原反应过程大概需要 160 h, 从而为后期实际土壤修复过程中控制还原土壤的养护条件和过程监控提供理论支撑.

关键词: 重金属; 六价铬; 还原; 稳定化; 土壤修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0368-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201604098

Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring

LI Pei-zhong¹, LÜ Xiao-jian², WANG Hai-jian¹, YANG Su-cai¹, WEI Wen-xia¹, SONG Yun^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Industrial Land Contamination and Remediation, Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 2. College of Exploration Technology and Engineering, Hebei Ditzhi University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: There are lots of problems in the domestic remediation of Cr(VI) contaminated soil field, such as lack of the key processing parameters, poor long-term effect and so on. The Cr(VI) heavy polluted surface soil was sampled from an electroplating site in North-China, and then treated with five different reducing reagents. At the same time, the on-line ORP probes and interval sampling test were chosen to monitor the reaction process, and to explore the reaction rate and effect. The results showed that No.4 reagent had the highest Cr(VI) reduction effect, reaching up to 99.5%, and the minimum soil Cr(VI) concentration could reach $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The No.1 and No.4 reagents had relatively faster reducing rates. There were obvious difference in ORP and pH monitoring values between different reductants, for example, the No.1 reagent kept the ORP value stable at around -400 mV . The No.4 reagent gradually increased the value from -200 mV to 100 mV since 30h, and then kept stable. According to the pH difference among different reductants, the No.4 reagent was the best and kept the pH value at around 7. Taking together the final effect and process key parameters, the No.4 reagent was the best. The scale-up experiment was operated with process monitoring, and the ORP and conductivity values showed that the reduction reaction took about 160 h. This work would provide theoretical basis for controlling the maintenance condition and reaction process in soil Cr(VI) remediation.

Key words: heavy metal; hexavalent chromium; reduction; stabilization; soil remediation

重金属铬及其化合物常用于皮革加工、电镀、颜料、木材防腐、冶金、军工等行业, 是我国无机化工主要系列产品之一. 在这些产品的生产和使用过程中产生的含铬废水、废气和废渣的排放, 可能会导致周边场地的土壤和地下水污染. 根据《铬渣污染综合整治方案》中的统计, 我国先后有 70 余家单位生产过铬盐, 累计产生铬渣约 600 万 t. 尽管国家已发布规定要求这些铬渣进行解毒后安全处置, 但

是残留土壤中的六价铬的修复问题是亟待进行修复处理的潜在环境污染源^[1]. 土壤中铬主要以三价和六价两种价态存在, 其中六价铬主要以阴离子

收稿日期: 2016-04-13; 修订日期: 2016-08-22

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409047); 北京市科技计划项目(D16110900470000)

作者简介: 李培中(1982~), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为污染土壤与地下水调查、风险评价与修复, E-mail: liepi_li@163.com

* 通信作者, E-mail: liepi_song@163.com

(CrO_4^{2-}) 存在, 因此不易被表面带负电荷的土壤颗粒吸附捕集^[2], 相应地在土壤中的迁移性能较强, 容易造成大面积的污染扩散以及地下水污染. 六价铬由于具有较高的氧化能力和穿透生物膜的特性 (CrO_4^{2-} 具有和 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 类似的结构, 因此可以通过阴离子交换通道自由穿透细胞膜), 因此认为六价铬的生物毒性比三价铬高 1 000 倍以上^[3].

目前城市人口密集区和水源地区域等环境敏感性较强的铬渣堆场, 国内已经率先进行了铬污染土壤和地下水的调查、研究与修复示范. 现有的六价铬污染土壤和地下水修复主要采取使用铁化合物、硫化物、有机质等还原性物质进行化学还原性稳定化修复^[4~7]. 另外还有采用还原细菌或者刺激土壤微生物等方法进行六价铬微生物还原^[8~10]. 这些修复研究的基本原理主要是提供电子供体, 促进溶解性的六价铬还原生成溶解性较低的三价铬沉淀吸附到固体颗粒上, 进而降低溶解性六价铬的含量^[11,12]. 这些研究都取得了相对较为明显的效果, 并且逐步应用到实际修复工程中^[13,14].

然而在六价铬污染土壤的实际修复工程或者中试研究过程中, 仍然面临着土壤 pH 值变化过大、长期稳定性较弱等诸多问题^[2,11,15], 需要进一步的研究. 例如, Moon 等^[16] 研究发现虽然 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 还原铬渣在 400 多天内浸出效果均能到达相应的标准, 但是由于其中起主要还原作用的 Fe^{2+} 被氧气不断氧化, 从而造成 420 d 以后 Cr^{6+} 的浸出浓度超过相应的修复标准, 同时外加的硫酸盐在碱性条件下不断与土壤矿物质形成钙矾石, 造成固化体体积膨胀率达到 50% 左右, 从降低其固化稳定化效果.

Apte 等^[17] 和 Wadhawan 等^[18] 分别发现在含铬污泥和河流沉积物中, 相对稳定的三价铬在氧气、水以及锰氧化物的作用下被缓慢氧化成六价铬, 造成了六价铬从土壤环境中持续不断释放, 造成潜在的污染风险.

本研究针对目前国内进行六价铬污染土壤还原修复过程关键性控制参数相对缺乏, 且中长期稳定性效果相对较差等问题. 选取北京郊区某电镀厂六价铬污染严重的表层土壤, 使用 5 组还原试剂分别按照一定的配比进行还原稳定化试验, 同时选用平衡时间较短、测试精度和重现性较高^[19,20] 的去极化在线 ORP 测试仪动态监控每组反应过程, 结合定期取样测试探索不同还原剂的反应效率和最终效果, 探索六价铬污染土壤化学还原法修复的规律, 以期在实际工程化应用提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 污染土壤

本试验选用北京郊区某电镀厂实际六价铬污染土壤, 该电镀厂主要进行镀铬、镀锌等表面处理加工, 主要设施包括镀铬车间、镀锌车间和喷塑车间以及污水处理站. 其中镀铬主要采用常见的铬酸液镀铬, 镀液中主要成分为铬酸根 (CrO_4^{2-}) 和重铬酸根 ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). 目前, 该电镀厂已经停产搬迁, 设备和构筑物均已拆除. 现场采集该场地原电镀池周边的表层颜色呈黄绿色的疑似污染土壤. 土壤采集后风干, 过 2 mm 筛后放置在聚乙烯塑料袋后保存. 土壤中的重金属类污染物的含量及理化特性如表 1 所示.

表 1 试验土壤的基本理化特性及污染物含量

Table 1 Physiochemical properties and heavy metals contents of the tested soil

pH	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	总铬 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	六价铬 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ni / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.5	18.6	15160.8	9441.6	23.3	77.6	1420	51.6

1.2 试验试剂

本研究所用的还原稳定化试剂 (七水合硫酸亚铁、硫化钠、腐殖酸) 和六价铬测试用药剂 (氢氧化钠、碳酸钠、氯化镁、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、二苯并碳酰二肼、重铬酸钾、浓硫酸) 均为优级纯 (国药). 多硫化钙为体积分数为 45% 的工业产品.

1.3 还原稳定化试验

六价铬还原主要采用的还原试剂包括亚铁盐、

硫化物以及多硫化物, 本研究根据前期研究基础确定了 5 组还原试剂, 主要包括硫酸亚铁及其复配组合、多硫化钙及硫化钠. 具体药剂使用情况如表 2 所示. 还原反应在具密封筛的 250mL 玻璃瓶中进行, 塑料瓶盖中空放置在线的温度和 ORP 测试电极 (如图 1), 通过定期读取数据监测反应过程中的泥浆体系的氧化还原点位和温度的变化情况, 同时定期通过取样口取适量的土壤样品测试中的六价铬浓度和 pH 值变化情况.

表 2 六价铬污染土壤还原稳定化修复关键试验条件

Table 2 Key parameters of Cr⁶⁺-contaminated soil reducing stabilization experiments

项目	样品编号					
	土 1	土 2	土 3	土 4	土 5	土 6
药剂种类	多硫化钙	七水合硫酸亚铁	硫化钠	多硫化钙 + 七水合硫酸亚铁	七水合硫酸亚铁 + 腐殖酸	空白对照
药剂配比/%	10	10	2	5 + 5	10 + 2	—
养护条件	添加 40% 水搅拌均匀后,隔绝空气封存					

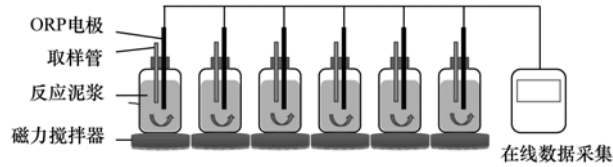


图 1 六价铬土壤污染还原稳定化反应与过程监测体系示意

Fig. 1 Schematic diagram of the Cr⁶⁺-contaminated soil reducing and operation monitoring system

1.4 效果测试

对于每组反应体系,定期打开取样管口用注射器抽取少量的泥浆溶液,风干后用美国 USEPA method 3060A 碱式消解法对土壤进行预处理,然后采用美国 USEPA method 7196A 分光光度法测试消解液中的六价铬,最终通过质量衡算的方法计算出土壤中的六价铬浓度(mg·kg⁻¹). 土壤泥浆反应器中的温度和 ORP 测试采用南京传滴仪器公司的 CD-1 多通道 ORP 去极化数据采集系统在线测试,同时采用美国 Hach 公司 HQ40 便携式 ORP 电极测试进行校正. 土壤中的 pH 值采用玻璃电极法测试,反应体系的电导率采用 Hach HQ40 便携式电导率电极进行测试. 土壤中的总铬和其它重金属浓度采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解后进 ICP-OES(美国 Thermo iCAP 7400)进行总量浓度测试. 由于在线 ORP 测试电极数量限制,本次过程监测试验并未设置平行样,但是在每次样品取样进行 pH、六价铬浓度测试时,均测试 3 组平行样并取均值.

2 结果与讨论

2.1 还原反应过程 ORP 变化

在各组试剂的还原过程中,通过在线 ORP 测试和定期取样测试土壤 ORP,发现不同的还原反应的氧化还原电位变化情况具有较大的差异(图 2). 其中土 1 组土壤样品整个过程中 ORP 始终处于 -400 mV 左右,表示该组还原具有较强的还原性和稳定性. Chrysochoou 等^[15]在使用 CPS(多硫化钙)还原六价铬土壤时也发现氧化还原点位能够快速降低至 -500 mV 左右,并且能够稳定在相对较长的时间范围内,这非常有利于六价铬快速转化为三价铬,并形

成稳定的沉淀物. 其次是 ±3 组 ORP 基本上也处均低于 0 mV,表现出相对较强的还原性,但是数值逐步增加表明该还原体系的稳定性相对较弱;土 4 组反应在反应初始的 ORP 值快速降低至 -200 mV 左右,随后在 1 d 后快速升高至 0 mV 以上,并且最终稳定在 100 mV 以下,说明该组反应相对较快,在 pH 低于 10 的环境中基本能稳定起到还原作用^[11]. 另外两组土 2、土 5 反应体系的 ORP 值相对较高,基本上在 200 mV 以上,与对照土壤样品(土 6)的反应体系基本处于一致的状态,说明其还原能力相对较弱.

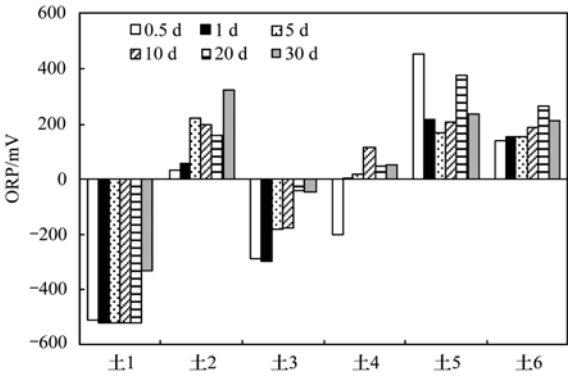
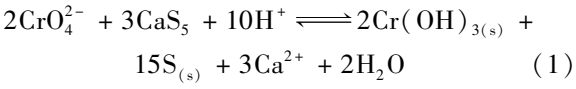


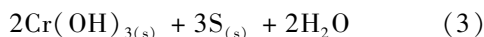
图 2 不同还原剂反应过程中的 ORP 变化情况

Fig. 2 Variation of ORP in the reducing process with different reagents

2.2 还原反应过程 pH 变化

从不同反应体系中的 pH 值变化情况来看(图 3),不同的稳定化试剂对土壤的 pH 值影响相对较大. 其中土 1 和土 3 均大幅提高至 11 左右,而空白对照土壤的 pH 值为 7 左右,说明此两种还原试剂会造成土壤 pH 值大幅增加. 这可能与还原性硫化物参与铬酸根还原反应的过程中消耗了大量的 H⁺,从而导致溶液体系的 OH⁻ 浓度相对增加[如公式(1)~(3)]^[21]有关. 相对偏碱性的环境条件能够促进形成 Cr(OH)₃ 沉淀,提高还原反应速率,但如果 pH 值大于 11.5 则容易在弱还原条件下(氧化还原电位大于 -50 mV)形成六价铬酸根离子,从而不利于六价铬的还原^[22,23].





而土 2 和土 5 两组反应中 pH 值均降低至 5 左右,可能是由于还原剂中的 Fe^{2+} 水解过程中产生 H^+ 造成土壤酸化作用^[7,12,15]. pH 值是控制土壤氧化还原电位平衡的重要因素之一, Fe^{2+} 和有机质等电子供体更喜欢在 $\text{pH} < 6$ 的环境条件下起作用^[2,24]. 与其它几组还原剂不同的是,土 4 是唯一能将 pH 保持在 7 左右的,这可能是其中的 Fe^{2+} 的水解过程和过硫酸根的还原反应起到中和作用,从而使反应体系的 pH 值维持在中性条件下.

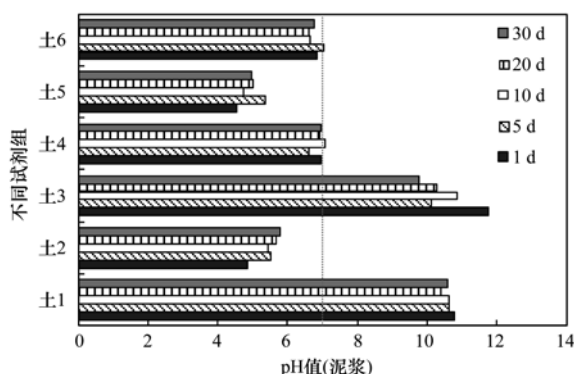


图 3 不同还原剂反应过程中的 pH 值变化情况

Fig. 3 Variation of pH in the reducing process with different reagents

2.3 不同还原剂处理效果对比分析

通过定期从土壤还原反应器中取适量的土壤样品,风干后进行碱式消解后测试六价铬浓度,发现不同还原剂的效果差异较大(如图 4). 其中土 4 对六价铬的还原稳定化率最高,基本上均在 99.5% 以上,土壤中六价铬浓度最低可达到 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其次为土 1,还原稳定化效率均在 99% 以上,土壤中六价铬浓度最低可达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 这两组还原试剂均可使高浓度六价铬污染土壤还原至较低的水平,基本满足北京市地方标准《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB 11/T-2011)中居住用地土壤中六价铬浓度标准限值 ($30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 相对而言,其余 3 组还原试剂的最大稳定化率基本上在 90%,最终土壤中的六价铬浓度均在 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右. Graham 等^[25]也发现了多硫化钙以及其复配物具有较强的六价铬还原效果,基本上能够将土壤或铬渣中六价铬从浓度 $8000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水平. Chrysochoou 等^[15,26]采用 μXANES 和 μXRD 等微 X 射线同步辐射技术对多硫化钙还原前后的六价铬污染土壤进行微观表征,发现了还原后土壤颗粒中形

成了大量的单质硫沉淀和硫代硫酸钠沉淀,能够使土壤持续保持还原环境,有效抑制氧气等氧化剂对铬的氧化作用.

如果从不同还原组中六价铬浓度随时间变化的情况来看,虽然土 2、土 3 和土 5 组的反应效果相对较差,但是随时间变化较小,还原体系相对比较稳定. 相对而言,土 1 和土 4 组虽然反应速率和效果均好于其他组,但是存在六价铬浓度随着时间的增加持续升高的趋势,说明该试剂可能存在长期稳定性变弱的潜在风险. 从各反应组不同时间所取样品的 ORP 测量结果来看(图 2),也表明在 20 d 内随着时间的增加反应体系的氧化还原电位从 -200 mV 以下持续升高到 50 mV 左右,并且开始保持稳定,这种反应体系的氧化还原电位的持续变化可能是影响铬元素的最终赋存形态主要原因^[18,27]. Chrysochoou 等^[15]对多硫化钙还原六价铬污染土壤进行了长达一年的长期稳定性监测,发现其中的氧化还原电位会在第 21 ~ 60 d 左右从初始的 -500 mV 逐步升高至 -70 mV 左右,然后保持稳定不变,这与本试验中的 ORP 监测结果基本一致,结合相应的土壤六价铬浓度测试结果,可以认为经过 20 d 左右的还原稳定化过程,土 1 和土 4 中的六价铬基本保持稳定状态. 尤其是土 4 中的 Fe 元素可能参与还原反应,形成了具有催化作用的 FeS_2 增强了还原硫的持续抗氧化能力,比单独的多硫化钙对六价铬的还原效果更好^[26,28].

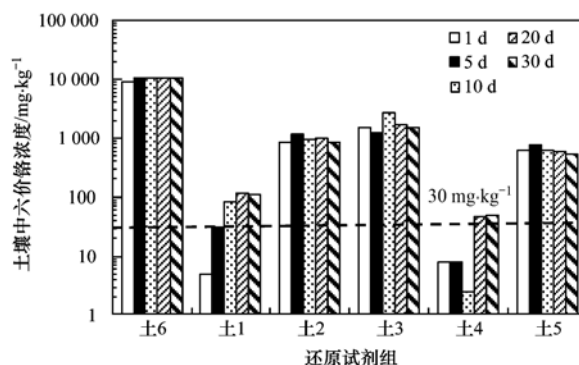


图 4 不同还原剂反应过程中土壤中六价铬浓度变化情况

Fig. 4 Variation of Cr(VI) concentration in the reducing process with different reagents

2.4 还原反应过程监测

综合各组的还原反应效果、反应速率及过程控制参数,筛选确定土 4 处理方案为最优方法. 因此,以此配方为基础进行单独放大试验,同时检测其长期反应过程中的关键参数的变化情况,从而确定其最佳养护时间和养护条件. 将加入一定剂量的多硫

化钙和硫酸亚铁的污染土壤,混合均匀后加水充分搅拌,在基本密封条件下养护并在通过在线监测电极,定期测量其反应过程中的 ORP、电导率和 pH.

从图 5 可以看出在整个反应过程中,氧化还原电位值从最初的 -200 mV 左右逐步上升,并最终稳定在 50 mV 左右,说明整个反应过程中体系由强还原环境逐步过渡至弱氧化环境中;相应的泥浆体系的电导率则基本保持在 $8\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,直到体系变为弱氧化环境状态时才快速降低至 $2\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下,这可能表明参与还原反应的各种离子基本与游离态的六价铬等物质的还原反应基本完全,并形成溶解度相对较低的沉淀,从而造成溶液的电导率快速下降.由此推断,整个还原反应过程大概需要 160 h 才能够基本完成,同时可以通过 ORP 和电导率两个关键参数监控整个反应体系的进程.综合以上分析,判断还原稳定化反应的最佳养护时间为 $160\sim 200\text{ h}$,在此时间段内建议采用相对密封、饱水的环境条件进行养护.这些参数可以为后期实际土壤修复过程中控制反应条件和监控养护过程,提供有利的基础技术支撑^[29,30].

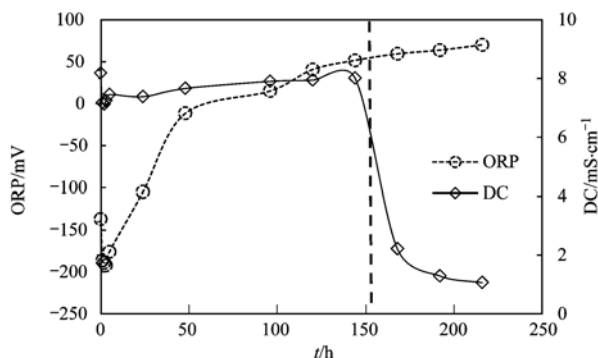


图 5 六价铬还原过程中关键参数随时间的变化情况

Fig. 5 Variation of key indexes in the Cr(VI) reducing process

3 结论

(1) 5 组还原试剂的反应过程的监测数据表明,各组间的 ORP 和 pH 值等过程参数出现较大的差异.第 1 组土壤样品整个过程中 ORP 始终处于 -400 mV 左右;第 4 组反应在 30 h 以后,由 -200 mV 逐步升高并稳定在 100 mV 左右.土 1 和土 3 的反应体系的 pH 从中性大幅提高至 11 左右,而试剂 2 和 5,均使土壤 pH 值降低至 5 左右,唯一使土壤 pH 保持在 7 左右的是试剂 4.

(2) 从土壤中六价铬的还原稳定化效率来看,表明各组试剂的还原效果差异巨大,其中试剂 4 对六价铬的还原稳定化率最高,基本上均在 99.5% 以

上,六价铬浓度最低可达到 $2.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,基本能够满足北京市土壤风险筛选值居住用地标准限值($30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)要求;其次为试剂 1,还原稳定化效率均在 99% 以上,从反应速率来看试剂 1 和 4 反应速率最快.其余各组反应后的土壤中六价铬浓度均为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,还原稳定化率相对较低.

(3) 综合最终反应效果、反应速率和过程参数,确定试剂 4 (多硫化钙和亚铁盐复配试剂) 的综合还原效果最佳,最适于该污染土壤的还原稳定化修复.

(4) 以试剂 4 为基础进行单独放大试验,同时检测其长期反应过程中的 pH、ORP 和电导率等关键参数的变化情况,发现整个还原反应过程大概需要 160 h 才能够基本完成,同时可以通过 ORP 和电导率两个关键参数进行反应过程监控,指导后期实际土壤修复过程中控制反应条件和监控养护过程.

参考文献:

- [1] 刘玉强,李丽,王琪,等.典型铬渣污染场地的污染状况与综合整治对策[J].环境科学研究,2009,22(2):248-253.
Liu Y Q, Li L, Wang Q, et al. Study on pollution situation at typical chrome residue contaminated sites and corresponding integrated remediation plan [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 248-253.
- [2] James B R. Peer reviewed: the challenge of remediating chromium-contaminated soil. The complex chemistry of chromium compounds presents unique measurement and regulatory challenges[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(6): 248A-251A.
- [3] Markiewicz B, Komorowicz I, Sajnog A, et al. Chromium and its speciation in water samples by HPLC/ICP-MS-technique establishing metrological traceability: a review since 2000 [J]. Talanta, 2015, 132: 814-828.
- [4] 蒋建国,王伟,范浩,等.砷渣和铬渣的药剂稳定化研究[J].环境科学研究,1998,11(1):30-31,35.
Jiang J G, Wang W, Fan H, et al. Study on the chemical stabilization in treating with arsenic waste and chromium waste [J]. Research of Environmental Sciences, 1998, 11(1): 30-31, 35.
- [5] 曹泉,王兴润.铬渣污染场地污染状况研究与修复技术分析[J].环境工程学报,2009,3(8):1493-1497.
Cao Q, Wang X R. Study on pollution characteristics of contaminated sites with chrome and discussion on common remediation technologies [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(8): 1493-1497.
- [6] 王兴润,翟亚丽,舒新前,等.修复铬污染地下水的可渗透反应墙介质筛选[J].环境工程学报,2013,7(7):2523-2528.
Wang X R, Zhai Y L, Shu X Q, et al. Selection of permeable reactive barrier media for remediation of contaminated groundwater with chromium [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(7): 2523-2528.
- [7] 王旌,罗启仕,张长波,等.铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究[J].环境科学,2013,34(10):4036-4041.

- Wang J, Luo Q S, Zhang C B, *et al.* Stabilization and long-term effect of chromium contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 4036-4041.
- [8] 张建荣, 李娟, 许伟. 原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3684-3689.
- Zhang J R, Li J, Xu W. Research on the application of in-situ biological stabilization solidification technology in chromium contaminated site management [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3684-3689.
- [9] 李斗, 赵由才, 宋立岩, 等. 六价铬细菌还原的分子机制研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1602-1612.
- Li D, Zhao Y C, Song L Y, *et al.* Advances in molecular mechanism of bacterial reduction of hexavalent chromium [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1602-1612.
- [10] 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 等. 污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3882-3887.
- Zheng J C, Zhang J R, Liu X W, *et al.* Bioremediation of chromium (VI) contaminated site by reduction and microbial stabilization of chromium [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3882-3887.
- [11] Dhal B, Thatoi H N, Das N N, *et al.* Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250-251**: 272-291.
- [12] Di Palma L, Gueye M T, Petrucci E. Hexavalent chromium reduction in contaminated soil: a comparison between ferrous sulphate and nanoscale zero-valent iron [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **281**: 70-76.
- [13] 黄莹, 徐民民, 李书鹏, 等. 还原稳定化法修复六价铬污染土壤的中试研究[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(2): 951-958.
- Huang Y, Xu M M, Li S P, *et al.* Remediation of hexavalent chromic-contaminated soil by reduction and stabilization technology at pilot-scale studies [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(2): 951-958.
- [14] 宋云, 李培中, 郝润琴. 我国土壤固化/稳定化技术应用现状及建议[J]. *环境保护*, 2015, **43**(15): 28-33.
- Song Y, Li P Z, Hao R Q. Analysis on the application status and advice of solidification/stabilization in China [J]. *Environmental Protection*, 2015, **43**(15): 28-33.
- [15] Chrysoschoou M, Ferreira D R, Johnston C P. Calcium polysulfide treatment of Cr(VI)-contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 650-657.
- [16] Moon D H, Wazne M, Dermatas D, *et al.* Long-term treatment issues with chromite ore processing residue (COPR): Cr⁶⁺ reduction and heave [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143**(3): 629-635.
- [17] Apte A D, Tare V, Bose P. Extent of oxidation of Cr(III) to Cr(VI) under various conditions pertaining to natural environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **128**(2-3): 164-174.
- [18] Wadhawan A R, Stone A T, Bouwer E J. Biogeochemical controls on hexavalent chromium formation in estuarine sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8220-8228.
- [19] 刘志光. 土壤氧化还原电位的去极化测定法及其应用 [J]. *土壤*, 1983, **15**(5): 198-200.
- [20] 方建安, 刘志光. 计算机化氧化还原电位去极化法自动测定系统 [J]. *分析仪器*, 1987, (3): 16-19.
- [21] Velasco A, Ramírez M, Hernández S, *et al.* Pilot scale treatment of chromite ore processing residue using sodium sulfide in single reduction and coupled reduction/stabilization processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **207-208**: 97-102.
- [22] Palmer C D, Wittbrodt P R. Processes affecting the remediation of chromium-contaminated sites [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1991, **92**: 25-40.
- [23] US EPA. *In situ* treatment of soil and groundwater contaminated with chromium: technical resource guide [R]. EPA/625/R-00/005. Washington DC: Office of Research and Development, 2000. 5-8.
- [24] Li J H, Yao C L, Liu Y B, *et al.* The hazardous hexavalent chromium formed on trivalent chromium conversion coating: the origin, influence factors and control measures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **221-222**: 56-61.
- [25] Graham M C, Farmer J G, Anderson P, *et al.* Calcium polysulfide remediation of hexavalent chromium contamination from chromite ore processing residue [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **364**(1-3): 32-44.
- [26] Chrysoschoou M, Johnston C P. Polysulfide speciation and reactivity in chromate-contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **281**: 87-94.
- [27] Garham A M, Bouwer E J. Rates of hexavalent chromium reduction in anoxic estuarine sediments: pH effects and the role of acid volatile sulfides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 136-142.
- [28] 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.
- [29] Chrysoschoou M, Ting A. A kinetic study of Cr(VI) reduction by calcium polysulfide [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 4072-4077.
- [30] 郑建中, 石美, 李娟, 等. 化学还原固定化土壤地下水六价铬的研究进展 [J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3077-3085.
- Zheng J Z, Shi M, Li J, *et al.* Reductive immobilization of hexavalent chromium in contaminated soil and groundwater systems: a review [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(7): 3077-3085.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301

