

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌 <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究

张建荣¹, 李娟², 许伟¹

(1. 苏州市环境科学研究所, 苏州 215004; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 原位生物稳定固化方法是控制铬污染场地地下水风险的有效方法, 通过实地工程试验, 初步验证了原位生物稳定固化法治理南方某铬污染场地的修复效果. 实地工程试验的场地面积约 600 m², 位于整个污染场地的上游, 受高浓度铬污染, 总铬含量高值为 11 850 mg·kg⁻¹, 六价铬含量高值为 349 mg·kg⁻¹, 污染最为严重的土层为 -0.5 ~ -2 m. 通过对在试验场地范围内设置注射井注射还原剂和微生物调节剂等, 并通过监测井监测分析不同时间不同深度范围内在药剂注射的作用下地下水中六价铬和总铬的浓度变化. 工程试验结果表明, 原位生物稳定固化技术显著改变了土壤中铬的形态, 进而降低了铬的迁移性, 消减了地下水污染风险. 注入的药剂对注入井(有效范围)内的地下水六价铬污染治理效果很好, 六价铬转成三价铬并固定稳定率达到 94% ~ 99.9%, 总铬固定稳定率达到 83.9% ~ 99.8%. 试验结果对于浅层地下水深度较浅、土壤以粉质黏土和砂质黏土为主的污染场地修复具有重要的参考价值.

关键词: 铬; 污染场地; 原位; 修复; 生物稳定固化

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3684-06

Research on the Application of *In-situ* Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management

ZHANG Jian-rong¹, LI Juan², XU Wei¹

(1. Suzhou Environmental Sciences Institute, Suzhou 215004, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: *In-situ* biological stabilization solidification (SS) technology is an effective ground water risk control method for chromium contaminated sites. Through on-site engineering test, this paper has preliminarily validated the remediation effect of *in-situ* SS method on a southern chromium contaminated site. The engineering test site has an area of approximately 600 m², and is located at the upstream of the contaminated area. Due to the severe contamination of chromium, the total chromium concentration reached up to 11 850 mg·kg⁻¹, while the hexavalent chromium concentration reached up to 349 mg·kg⁻¹, and the most severely contaminated soil had a depth of -0.5 ~ -2 m. Variations in hexavalent chromium and total chromium concentration in groundwater were observed through the injection of reducing agents and microbial regulators into the injection wells in the test site, and through the monitoring analysis at different time and different depth under the action of the injection agents. Results of the engineering test showed that the on-site SS technology significantly changed the chromium speciation in soil and then reduced the migration of chromium, thus the groundwater risk was reduced. The injected agents had a good effect of hexavalent chromium remediation in groundwater within the effective range of the injection wells, and the SS rate of hexavalent chromium into trivalent chromium reached 94% - 99.9%, the SS rate of total chromium fixation reached 83.9% - 99.8%. The test results are of significant reference value for the remediation of contaminated sites with features of shallow groundwater depth and soil mainly consisting of silty clay and sandy clay.

Key words: chromium; contaminated site; *in-situ*; remediation; biological stabilization solidification (SS) technology

随着城市化进程的加快,许多化工、电镀、铬盐生产、制革、印染等行业企业搬离城区,但由于在生产过程中排放、泄漏、堆积的铬污染物等导致此类企业遗留场地土壤和地下水污染严重.

存在于场地土壤中的铬通常以三价铬和六价铬存在,六价铬是强氧化剂,且迁移性较强,对地下水的威胁较大.有研究表明,被水携带渗入土壤中的Cr(VI)和Cr(III),在土壤中的吸附特性不同,迁移速度也不同.土壤黏土矿物吸附Cr(III)的能力约为吸附Cr(VI)能力的30~300倍,游离态的Cr(III)很少,其活性较低,对植物毒性相对较小.Cr(III)易被土壤截留,Cr(VI)在土壤中易于迁移,当含铬浓度

较高的淋滤液坑贮或排放时,会在土壤上层很快达到饱和,随后吸附移入地下水,对地下水产生危害^[1].

如备受媒体和公众关注的云南曲靖铬渣污染事件.根据当时的调查结果,在拥有14万t铬渣的云南省陆良化工实业有限责任公司厂区东南侧,地下水出水口六价铬的浓度超过标准242倍,该区域水稻田中存水的六价铬浓度高达限值的126倍,而工厂附近用于灌溉农田的南盘江水中的六价铬浓度超

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-11-10

作者简介: 张建荣(1958~),男,高级工程师,主要研究方向为土壤污染调查和修复, E-mail: 2huorong08@163.com

过国家 5 类水质标准的 2 倍. 有研究表明当水中含铬在 $1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可刺激作物生长, $1\sim 10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时会使作物生长减缓,到 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时则几乎完全使作物停止生长,致使作物濒于死亡^[2]. 地下水的污染直接威胁着生态环境和人类健康.

铬污染治理途径主要有两种^[3]:一是将铬从被污染土壤中清除,如水洗、种植特种植物,在植物生长过程中将铬转移到植物中,收集植物进行清除等;二是通过固态形式在物理上隔离污染物或者将污染物转化成化学性质不活泼的形态,将六价铬还原为三价铬,降低其在环境中的迁移能力和生物可利用性,降低铬污染物的危害. 常用铬渣污染场地修复技术包括固化/稳定化、电动修复、土壤淋洗、异位清洗和植物修复等技术^[4~7]. 固化/稳定化是处理危险废物的常用技术,其处置时间短且技术成熟,但有时会因混合不均匀无法根本去除污染物;电动修复受地层特性影响较大,适合浅层修复,具有无需开挖,处理成本低和二次污染小,但是如何控制场地的 pH 值是技术的关键难点;土壤淋洗技术目前还处于发展阶段,且发展潜力较大,与电动修复特点相似,但是其处置时间长,不适用低渗透性场地,且可能残留二次污染物;异位清洗也是一种发展潜力较大的新技术,它具有处置时间短,受地层影响小的特点,但是其土方量大、成本高且二次污染大的特点又制约了异位清洗技术在我国的实际工程应用;植物修复作为生物修复的一种,具有成本低、二次污染小的特点,适用于较大面积的土壤修复,但是其处置时间长,且对深度浅的污染范围和低污染浓度的情况有效,目前我国还处于研究阶段^[8~11].

由于固化修复方法在成本和时间上能更好地满足重金属污染场地修复的要求而得到了广泛的关注.

中南大学^[12]曾以湖南某铁合金厂铬渣堆场铬污染土壤为研究对象,分析了铬污染土壤中土著微

生物对Cr(VI)的还原能力,确定土壤中Cr(VI)还原的最佳条件. 研究表明铬渣堆场铬污染土壤中土著微生物对Cr(VI)具有很强的还原能力,直接向土壤中添加营养物质就可刺激土著微生物活性,进行铬污染土壤的微生物修复,铬污染土壤得到修复后,Cr(VI)还原成Cr(III),经过 240 d 的跟踪检测,在土壤初始 pH 6~10 的范围内,灭菌土壤和未灭菌土壤,无论是干土、干湿交替土壤、还是淹水土壤未检测出Cr(VI),表明Cr(III)稳定性强.

微生物稳定化技术是利用微生物原位稳定化技术治理铬污染场地,首先将毒性较高的Cr(VI)还原为毒性较低的Cr(III),再利用微生物将Cr(III)摄入体内,待微生物消亡后,与土壤形成团聚体,即使在弱酸性条件下,Cr(III)也会被土壤形成的团聚体稳定化固定,不会溶出,大大降低风险值. 该技术属于原位生物修复,不影响土壤质地,不对土壤进行扰动,修复成本低,不产生二次污染. 适用于环境敏感地区的原位修复.

为了能够证明生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用效果,选取了受铬污染严重的搬迁遗留场地,进行了生物稳定固化试验.

1 材料与方法

1.1 场地规模及污染状况

试验场地为南方原某化工厂的生产厂房,该企业历史上曾经生产重铬酸钠产品. 该场地受总铬和六价铬污染范围面积总计近 4 万 m^2 ,最大污染深度达地面下 8 m. 本试验场地面面积约 600 m^2 ,位于整个污染场地的上游,受高浓度铬污染,总铬含量高值为 11 850 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,六价铬含量高值为 349 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,污染最为重的土层为 -0.5 ~ -2 m,部分区域土壤呈现强酸性及强碱性.

该场地的基本理化性质描述如表 1.

表 1 场地基本污染情况
Table 1 Basic condition of the contaminated site

土壤	地下水	场地介质
总铬含量 5 000 ~ 10 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,六价铬含量 200 ~ 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 地面下 -7 ~ -8 m	六价铬浓度 20 ~ 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	污染物 污染深度
场地地层情况 地层埋深 地下 0 ~ -1 m 地下 -1 ~ -5 m 地下 -5 ~ -6 m 地下 -6 m 以下,本层未钻穿	岩性 回填土层,由粉质黏土组成,部分含石块或砖头 粉质黏土层 黏质粉土层 砂类土层	
场地地下水情况 地下水埋深 地下水流向	浅层地下水深度较浅,约地面下 -1.5 m 地下水流向由东向西	

1.2 工程布局

根据对场地污染的调查结果,设计了原位生物

稳定固化修复试验. 试验中设置了 4 个观测井和 3 簇注射井, 每簇注射井之间的间距为 5 m, 观测井与注射井之间的最短距离为 10 m. 试验期间设置的井位见图 1. 每簇井位设置 3 口单井, 单井深度分别约为 -2、-6 和 -8 m (进入流沙层 -1 m). 观测井位设置在注射井的东南西北四个方向, 并在不同深度进行监测, 场地地下水的流向是自东向西. 因此, 东侧和北侧观测井基本位于注射井的上游, 西侧和南侧观测井位于注射井的下游, 设置观测井的目的是为了观测在地下水流动的作用下, 注射井内注射药剂对铬污染固定稳定化的影响范围和速度.

场地试验通过两步进行: 第一步, 向土壤中注入还原剂、渗透剂等, 将高毒的六价铬还原成低毒的三价铬; 第二步, 注入营养剂、微生物调节剂, 促进土壤中土著目标微生物的迅速生长, 将还原后的三价铬和部分未还原的六价铬摄入体内, 待微生物消亡后与土壤形成稳定的团聚体, 将土壤中的六价铬还原固定, 避免三价铬溶出.

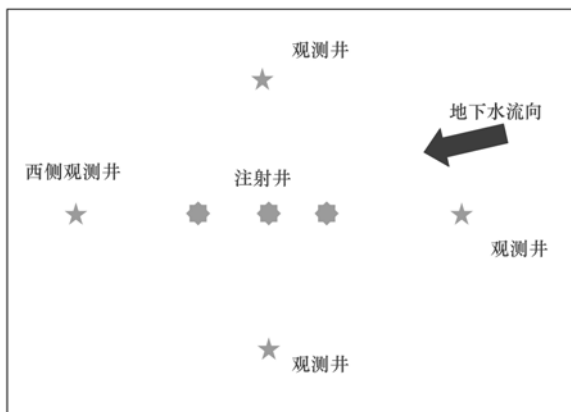


图 1 试验期设置的井位注射井和监测井位置

Fig. 1 Locations of injection wells and monitoring wells installed during the pilot test

1.3 分析测试与结果处理

1.3.1 分析测试

土壤中总铬测定采用盐酸加热消解法加溶出的液体用原子吸收分光光度法测定总铬浓度, 再推算到土壤中的含量. 土壤中六价铬测定采用弱碱消解法得到的碱消解液, 用二苯碳酰二肼分光光度法测定六价铬, 再推算到土壤中的含量. 地下水中总铬和六价铬的测定采用土壤中消解液的测定方法.

1.3.2 数据处理

本研究数据采用 Excel 2003 软件进行分析处理. 每个样品测定 3 个平行样, 标准偏差 $\leq 10\%$, 表示结果可信, 结果取其平均值. 地下水样的测定质

量控制参照土壤样品进行.

1.3.3 差异显著性分析与质量控制

本试验采用加标回收法对试验结果进行质量控制, 将两份混合均匀的土壤样品, 其中一份加入一定量已知浓度的重铬酸钾溶液, 经过消解测定, 加标回收率在 80% ~ 120% 之间表示测定结果可信, 如超出范围, 样品进行重新消解测定.

2 数据分析结果

2.1 不同井铬浓度及形态随时间的变化特征

试验期间两个典型注射井中总铬浓度和六价铬浓度随时间的变化如图 2、图 3 所示, 西侧、上游和东侧观测井中铬浓度的变化分别如图 4 ~ 6 所示, 下游观测井中的铬浓度在试验 15 d 后已检测不出浓度, 铬浓度低于检测限值.

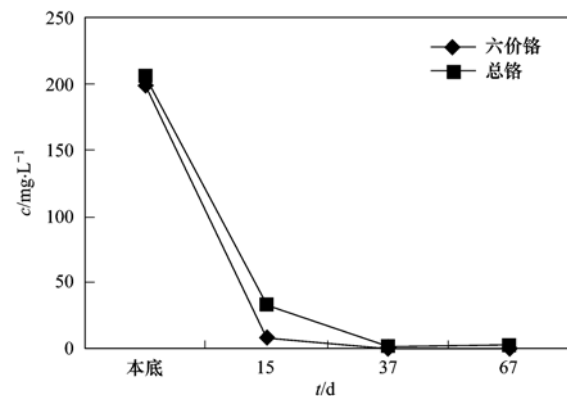


图 2 注射井 1 (-2 m) 中铬浓度随时间的变化

Fig. 2 Changes in Cr concentration over time in injection well No. 1 (-2 m)

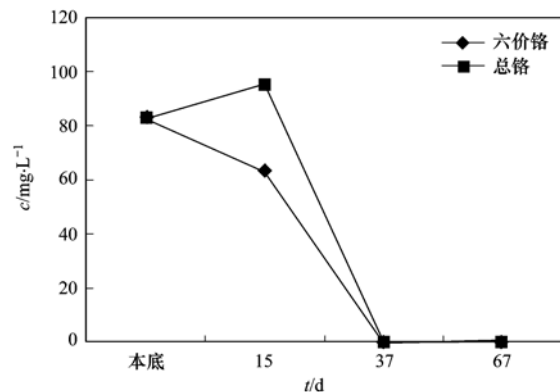


图 3 注射井 2 (-5 m) 中铬浓度随时间的变化

Fig. 3 Changes in Cr concentration over time in injection well No. 2 (-5 m)

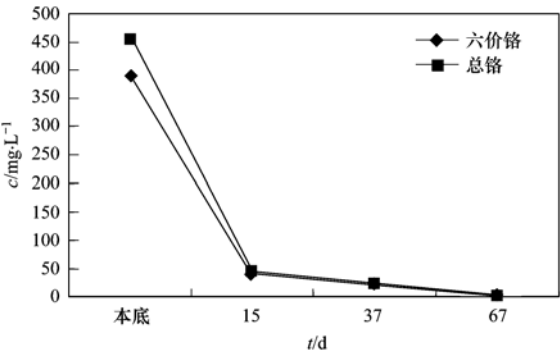


图 4 西侧观测井 (-6 m) 中铬浓度随时间的变化

Fig. 4 Changes in Cr concentration over time in the western monitoring well (-6 m)

结果显示,试验场地加入药剂后的第 37 d 时,注射井和西侧、下游观测井地下水中总铬和六价铬浓度明显下降,已经达到了较为明显的固化效果,观测直至 67 d 后基本维持不变. 上游及东侧观测井中的铬和六价铬浓度基本维持本地浓度范围.

2.2 铬固化效果分析

根据现场观察和实验室分析数据验证,注入的药剂对注入井 (有效范围) 内的地下水六价铬污染治理效果很好,六价铬转成三价铬并固定稳定率达到 94% ~ 99.9% , 总铬固定稳定率达到 83.9% ~ 99.8% (表 2 和表 3).

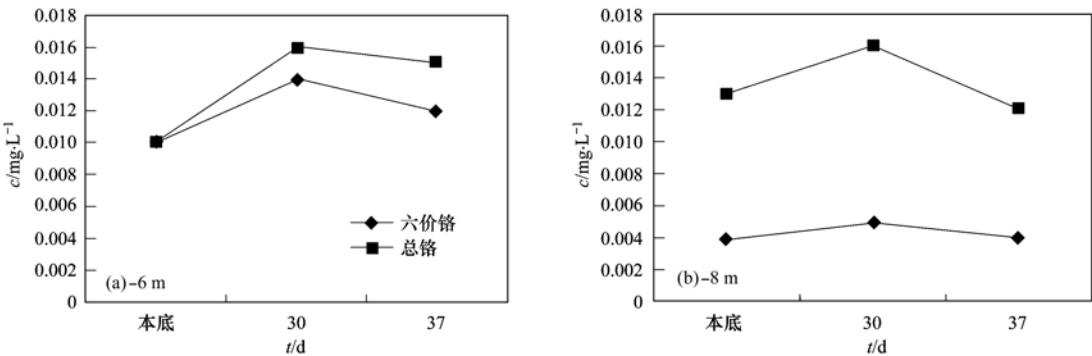


图 5 上游观测井中铬浓度随时间的变化

Fig. 5 Changes in Cr concentration over time in the upstream monitoring well

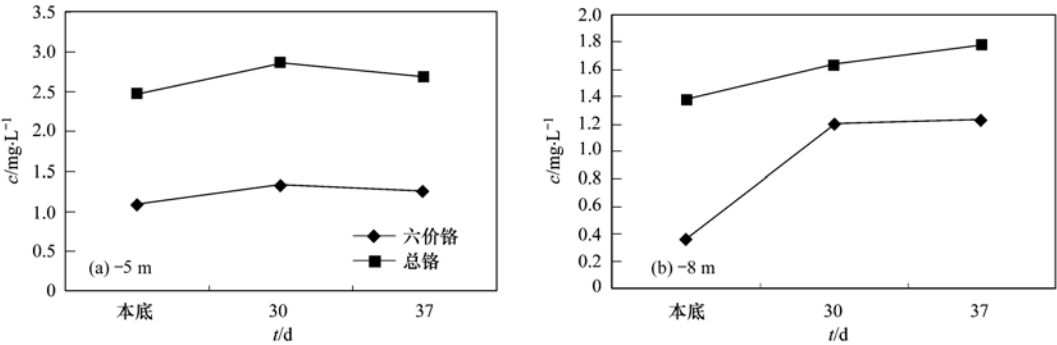


图 6 东侧观测井中铬浓度随时间的变化

Fig. 6 Changes in Cr concentration over time in the eastern monitoring well

表 2 37 d 后代表性井中六价铬静态降低比率

Table 2 Static reduction ratio of Cr VI concentration in a typical well after 37 days

位置	六价铬初始浓度/mg·L ⁻¹	六价铬 37 d 固化后浓度/mg·L ⁻¹	降低比率/%
注射井 1	198.000	0	100
注射井 2	82.000	0	100
西侧观测井	390.000	22.900	94.0
东侧观测井	1.100	1.270	略高,且基本维持不变
上游观测井	0.004	0.004	基本维持不变

表 3 37 d 后代表性井中总铬静态降低比率

Table 3 Static reduction ratio of total Cr concentration in a typical well after 37 days

位置	总铬初始浓度/mg·L ⁻¹	总铬 37 d 固化后浓度/mg·L ⁻¹	降低比率/%
注射井 1	205.000	1.750	99.1
注射井 2	82.700	0.166	99.8
西侧观测井	456.000	23.800	95.0
东侧观测井	2.470	2.680	略高,且基本维持不变
上游观测井	0.013	0.012	略低,基本维持不变

受污染地区地下水的水质情况得到明显的改善,大多数注入井的地下水已经由黄色变成透明无色,注入井的最后一次测量中,所有井内地下水中的六价铬均低于检出限(未能检出).将总铬和六价铬持续稳定固化在微生物菌团内,不溶入水体.充分发挥了降解总铬和六价铬的能力.加药前后水样的颜色明显由黄色的六价铬污染液体变化为澄清无色的液体.

观测井内的数据表明,注入的药剂和培养的微生物菌团,能够随地下水流动向地下水下游方向渗透扩散,-2、-6和-8 m这3种深度均能表现出渗透扩散能力.2个月时间药剂可以沿地下水流向扩展约5~10 m范围.

3 讨论

铬污染土壤的物理化学治理方法国内外已有众多研究,包括异地填埋、淋洗、化学还原固定、电动修复等^[4~7].微生物固化作为一种原位修复技术,具有成本低、二次污染风险小、不会破坏原有土壤结构等优点(表4).目前,国内在铬污染场地微生物修复方面的研究非常有限,仅限于实验室研究微生物反应速率的影响因素^[13,14],筛选出一些对六价

铬有耐受能力和还原能力的细菌、真菌和微藻类等^[15,16],未见针对铬污染场地进行的治理研究.国外在铬污染土壤微生物治理方面的研究主要集中在实验室使用反应罐或反应柱培养/筛选可稳定化/固化六价铬方面^[17],对有效菌种进行鉴别^[18~21],如*Streptomyces* sp. MC1、*Halomonas* sp. TA-04、*Pseudomonas corrugata* 28、*Enterobacter aerogenes*、*Aeromonas* sp.、*Acinetobacter* sp.,并研究其去除率^[22~24];也有学者对特定微生物的固化/稳定化条件,如pH、最高耐受铬浓度、催化酵素等进行了探索^[25].但对实际铬污染场地条件的影响(如水流速度、土壤有机物、渗透性)没有相关阐述,对于具体的反应机理、受限因素(pH、温度、初始Cr(VI)浓度、其他物质如有机物重金属的抑制作用)、产出物质、产出物质的稳定性等也均未进行深入的研究.

这是由室内研究与野外现场的差异决定,由于实验室的条件是可控的,容易取得较为理想的试验结果,但野外现场由于气候等因素不可控,室内的研究参数不一定适用于野外现场.因此,开展本研究的意义就在于在野外现场不确定的环境下,对微生物处理铬污染的有效性和稳定性进行分析.

表4 不同生物稳定固化技术的对比

Table 4 Comparison of different biological stabilization solidification technologies

铬污染土壤修复方式	优点	缺点
原位修复	成本低、操作规程规模小、不破坏土壤结构,并二次污染易控制	修复时间较长
原地异位修复	见效快,能在短时间内见到土地再利用的效益	土壤修复工程规模较大,耗资较多,实施期间易造成二次污染

在本次场地中试试验中,对受污染土壤采用原位修复技术,发现原位生物稳定固化技术可以明显减少进入场地进行污染土壤修复的施工人员数量,大量减少挖掘污染土方量(场地内地表回填土需要挖出),不会造成深度挖掘时基坑废水污染和减少含铬废水处理量,修复过程中只有极少量废水,无废气,不会造成污染土壤运输过程的二次污染.对场地土壤结构不进行扰动,有利于场地后续的开发建设.

Desjardin等^[26]就法国Rhône-Alpes地区污染土壤中微生物活性对铬化学状态的影响进行了研究.该地区土壤中铬的含量为4 700 mg·kg⁻¹,其中大约40%以可溶性六价铬盐的形式存在.研究发现,当土壤在30℃时,有葡萄糖且富含营养水溶液,经过培养后,当地的微生物能有效地将土壤中的六价铬转变为不易迁移的三价铬.该研究也是微生物对铬

污染产生影响的实验室研究,本工程的试验突破了实验室各项条件可控的基础,在实地进行工程试验,研究在自然条件下,进行原位生物稳定固化技术治理铬污染场地的有效性.

但是必须强调原位生物稳定固化技术是使土壤中生物有效态金属离子形成一个动态库,只是将毒性强的六价铬转变成三价铬,总铬并没有减少,场地内总铬浓度仍然维持现状,只是被稳定固定在土壤中,不会随地下水浸出.铬离子在惰性态与生物活性态之间形成一动态平衡,当土壤中生物活性态离子大大降低后,随着时间的增长,被固定后的重金属离子又可能因环境的变化被重新释放出来进行动态库的补充,使动态库趋于相对平衡.铬污染场地的修复需结合场地后期开发利用需求进行综合考虑.

我国受铬污染的化工场所较多,分布范围也比

较广,但对铬污染场所的修复技术研究相对较晚。随着我国城市化进程的加快,对搬迁遗留工业污染场地土壤进行修复,确保人居环境安全已是当前国家环保工作的新热点。针对我国铬污染场地特点和修复需求,急需建立铬污染场地土壤修复技术,引导我国铬污染场地修复向高技术发展方向,推动和促进其在我国土壤修复产业中的应用。

4 结论

(1) 本试验取得的成果显示在铬污染工程试验场地注入的药剂对注入井(有效范围)内的地下水六价铬、总铬污染治理效果很好。

(2) 在浅层地下水深度较浅、土壤以粉质黏土和砂质黏土为主地区,对铬污染场地采取原位生物稳定固化修复,2 个月时间药剂扩散能使地下水下游 5 m 远处污染得到修复。

(3) 原位生物稳定固化修复铬污染场地技术,修复费用相对较低,二次污染小且易防范,有利于场地污染修复期间对场地周边环境的保护。该技术适用于城市建设开发进程较快,场地周围环境敏感点较近,较多的地区。

参考文献:

- [1] 任爱玲, 郭斌, 刘三学, 等. 含铬污水在土壤中迁移规律的研究[J]. 城市环境与城市生态, 2000, **13**(2): 54-56.
- [2] 王凤花, 罗小三, 林爱军, 等. 土壤铬(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.
- [3] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997, **18**(3): 72-76.
- [4] Chrysochoou M, Johnston C P, Dahal G. A comparative evaluation of hexavalent chromium treatment in contaminated soil by calcium polysulfide and green-tea nanoscale zero-valent iron [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **201-202**: 33-42.
- [5] Pang B, Zhang H Z, Li F, et al. Remediation of Substantial Hexavalent Chromium-contaminated Soil by Washing with EDTA Solution [A]. In: Zhou X (Ed.). 2011 International Conference on Energy and Environmental Science[C]. 2011.
- [6] Khan F I, Husain T, Ramzi R. An overview and analysis of site remediation technologies [J]. Journal of Environmental Management, 2004, **71**(2): 95-122.
- [7] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(2): 197-202.
- [8] 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.
- [9] 黄春晓. 重金属污染土壤原位微生物修复技术及其研究进展[J]. 中原工学院学报, 2011, **22**(3): 41-44.
- [10] 郭仕聪. 污染土壤原位生物修复[J]. 广东化工, 2011, **38**(7): 123-124.
- [11] 许友泽, 杨志辉, 向仁军. 铬污染土壤的微生物修复[J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 555-560.
- [12] 苏长青. 铬污染土壤中Cr(VI)的微生物还原及Cr(III)的稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [13] 常文越, 陈晓东, 王磊. 土著微生物修复铬(VI)污染土壤的条件实验研究[J]. 环境保护科学, 2007, **33**(1): 42-44.
- [14] 黄顺红. 土著微生物原位修复铬渣堆场污染土壤的条件优化[J]. 中国有色金属学报, 2011, **21**(5): 1741-1747.
- [15] 许友泽, 向仁军, 柴立元, 等. 土著微生物柱浸修复铬渣堆场土壤污染[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2010, **31**(3): 90-94.
- [16] 李政红, 张胜, 张翠云, 等. 土壤铬(VI)污染硫酸盐还原菌修复试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(6): 63-65.
- [17] Masood F, Malik A. Hexavalent chromium reduction by *Bacillus* sp. strain FMI isolated from heavy-metal contaminated soil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, **86**(1): 114-119.
- [18] Focardi S, Pepi M, Landi G, et al. Hexavalent chromium reduction by whole cells and cell free extract of the moderate halophilic bacterial strain *Halomonas* sp. TA-04 [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012, **66**(1): 63-70.
- [19] Humphries A C, Penfold D W, Macaskie L E. Cr(VI) reduction by bio and bioinorganic catalysis via use of bio-H₂: a sustainable approach for remediation of wastes [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2007, **82**(2): 182-189.
- [20] Christl I, Imseng M, Tatti E, et al. Aerobic reduction of chromium(VI) by *Pseudomonas corrugata* 28: Influence of metabolism and fate of reduced chromium [J]. Geomicrobiology Journal, 2012, **29**(2): 173-185.
- [21] Panda J, Sarkar P. Isolation and identification of chromium-resistant bacteria: Test application for prevention of chromium toxicity in plant [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2012, **47**(2): 237-244.
- [22] Li Z H, Ma L N, He Z, et al. Chromium-resistant bacteria screening, identification and remediation of chromium contaminated soil [A]. In: 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP) [C]. Xi'an: IEEE, 2011. 1814-1818.
- [23] Wang D, Wei W, Liang D L, et al. Transformation of copper and chromium in co-contaminated soil and its influence on bioavailability for pakchoi (*Brassica chinensis*) [J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 3113-3120.
- [24] Ibrahim A S S, El-Tayeb M A, Elbadawi Y B, et al. Bioreduction of Cr(VI) by potent novel chromate resistant alkaliphilic *Bacillus* sp. strain KSUCr5 isolated from hypersaline Soda lakes [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, **10**(37): 7207-7218.
- [25] Alam M Z, Ahmad S. Chromium removal through biosorption and bioaccumulation by bacteria from tannery effluents contaminated soil [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2011, **39**(3): 226-237.
- [26] Desjardin V, Bayard R, Huck N, et al. Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils [J]. Waste Management, 2002, **22**(2): 195-200.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

国内外公开发行人