

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, 高闯光, 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, 胡凌霄, 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Methylobacterium rhodesianum 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)	

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^{1,2}, 黄锦楼^{2*}, 彭会清¹, 李思拓¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用摩擦清洗法修复铅污染场地土壤, 主要目的是将细颗粒和铅污染物从砂粒表面去除。通过正交实验优化清洗参数, 并对3份不同铅含量土壤进行摩擦清洗实验。优化的清洗参数为: 水土比70%干物质、温度25℃、搅拌时间30 min、搅拌速率1 200 r·min⁻¹。摩擦清洗前土壤经过筛分化验分析表明, 3份土壤铅主要富集在砂粒和粉黏粒中; 铅的分布与有机质有极大相关性。结果表明, 经过摩擦清洗后, 3份原状铅污染土壤砂粒的清洗效率分别为: 67.61%、31.71%、41.01%, 摩擦清洗从砂粒表面去除一部分细粒土壤和铅污染物, 使铅浓缩至粉黏粒中; 扫描电镜(SEM)分析表明, 摩擦清洗后砂粒表面变光滑。以上结论说明摩擦清洗对于铅污染场地的砂粒土壤具有较好的清洗效果。

关键词: 摩擦清洗; 参数优化; 铅; *R*值; 扫描电镜

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3709-07

Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil

YANG Wen^{1,2}, HUANG Jin-lou², PENG Hui-qing¹, LI Si-tuo¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Attrition scrubbing was used to remediate lead contaminated-site soil, and the main purpose was to remove fine particles and lead contaminants from the surface of sand. The optimal parameters of attrition scrubbing were determined by orthogonal experiment, and three soil samples with different lead concentration were subjected to attrition scrubbing experiments. The results showed that the optimal scrubbing parameters were: a solid ratio of 70% dry matter, a temperature of 25℃, an attrition time of 30 min, and an attrition speed of 1 200 r·min⁻¹. Before attrition scrubbing, the screening and analysis of soil showed that in all three soil samples, lead was mainly enriched on sand and fine particles, and the distribution of lead was highly correlated to the organic matter. After attrition scrubbing, the washing efficiency of the original state lead contaminated sand soil in triplicates was 67.61%, 31.71% and 41.01%, respectively, which indicates that attrition scrubbing can remove part of the fine soil and lead contaminants from the surface of sand, to accomplish the purpose of pollutants enrichment. Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that the sand surface became smooth after attrition scrubbing. The results above show that attrition scrubbing has a good washing effect for the remediation of lead contaminated sand soil.

Key words: attrition scrubbing; parameter optimization; lead; *R* value; scanning electron microscope

我国土壤重金属污染普遍存在, 场地的污染影响了土地的转型利用; 其中铅污染场地土壤对人体毒害大, 且难降解, 严重影响了场地周边居民的健康, 迫切需要可以推广应用的污染土壤修复技术^[1,2]。目前, 国际上已经开展了一些重金属污染场地土壤的修复, 但技术成本较高, 且缺少适合我国污染场地修复的成套设备。摩擦清洗可作为土壤清洗法的预处理, 提高对污染土壤的后续处理效率, 且无二次污染、费用较低, 国外已有成功应用的案例^[3,4]。

目前, 摩擦清洗的研究对象主要是人工合成土壤和底泥沉积物, 对原状重金属污染土壤的研究较少; 研究内容集中在清洗参数的优化和清洗效率的评价^[5]。为达到强烈的清洗作用, 悬浮液必须以很高的固体浓度以确保使各种颗粒互相紧挨在一起的

条件下给入到擦洗机中; 但水土比过大时, 内部颗粒很少进行粒子运动; 当水土比增加时, 水量过多使摩擦清洗效果不理想^[6]。有研究表明^[7], 随着搅拌时间的增加, 清洗效率趋于平衡, 清洗时间超过30 min后效果没有明显变化。对于有机物污染土壤, 温度的增加有利于摩擦清洗, 但对于重金属污染土壤温度的高低对清洗效率不一定有影响^[8]。摩擦清洗通过搅拌叶轮输入机械能, 使颗粒间产生物理冲击和剪切作用, 破坏土壤中污染物与颗粒表面的结合方式^[9]。搅拌速率越大, 输入的机械能越大, 但搅拌速率需要与摩擦清洗系统成比例^[10]。以上这

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-10-18

作者简介: 杨雯(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: gwen19890601@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jlhuang@rcees.ac.cn

些研究,都是对单因素变量进行研究,没有综合考虑各因素对摩擦清洗效果的影响.

摩擦清洗主要适用于较粗砂粒的清洗,将富集在较粗砂粒表面上的污染物和细粒土擦洗下来. 由于污染物在较粗颗粒土壤中分布的不均匀性,清洗过程会引起粗颗粒土壤质量和污染物浓度的变化,单一的污染物浓度变化对清洗效率的评价不够全面,不能反映单位质量上污染物的减少程度. 国外研究中^[11,12]采用 R 值的变化对摩擦清洗效率进行评价:

$$R = \frac{\text{污染物质量分数}(\%) }{\text{质量分数}(\%) }$$

同时, R 值还可以反映不同粒径土壤对污染物的富集程度,当 $R \geq 1$ 时,污染物富集程度高; $R < 1$ 时,污染物富集程度低.

本研究通过水力筛分和摩擦清洗进行清洗参数优化和原状土砂粒的摩擦清洗实验,将细粒土和铅污染物从砂粒表面去除;并对砂粒和粉黏粒土壤清洗前后 R 值变化和扫描电镜分析对清洗效率进行

全面评价,以期为摩擦清洗的实际工程应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤采自西南地区某铅蓄电池厂内典型污染区域,共采集 3 份原状污染土壤. 土壤样品去除碎石、败叶等杂物,在空气中自然风干后密封保存. 各采样点土壤采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ MARS-5 微波消解器消解,过滤,Prodigy 型全谱直读等离子体发射光谱仪测定土壤中铅含量^[13]. 铅化学分析中插入国家标准参比物质(GSS-14)进行全过程质量控制,质控样测定均值及平行样偏差均在允许范围内. 有机质测定采用重铬酸钾法测定^[14]. 土样的基本理化性质及铅含量结果见表 1.

摩擦清洗实验所用主要仪器包括:OS20-Pro 数显型顶置式(强力)电子搅拌器,标准筛,S-3000N 型扫描电子显微镜,电子分析天平. 实验所用试剂均为优级纯或分析纯.

表 1 土壤样品的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil sample

供试土壤	pH 值	有机质 /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	土壤机械组成/%		
				砾石	砂粒	粉黏粒
1 号	6.956	16.89	11 531	14.32	47.47	38.21
2 号	7.845	9.752	1 375.6	21.60	41.80	36.60
3 号	7.815	9.088	876.9	4.74	72.34	22.92

1.2 实验方法

摩擦清洗流程图如图 1 所示.

清洗参数优化:实验针对水土比、温度、搅拌时间、搅拌速率 4 个因素设计成四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交实验(见表 2),取 1 kg 土壤进行摩擦清

洗,对比实验前后砂粒土壤的摩擦清洗效率:

$$\eta = \frac{R_{\text{前}} - R_{\text{后}}}{R_{\text{前}}} \times 100\%$$

摩擦清洗实验:基于最佳清洗参数,3 份不同浓度原状土各取 1 kg 分别进行摩擦清洗实验,对各粒径土壤摩擦清洗前后进行有机质、铅浓度、质量测定. 采用 R 值评价不同粒径土壤对铅的富集程度和摩擦清洗效率.

扫描电镜实验^[15]:将土壤均匀铺在导电双面胶上,将其粘贴在金属样品托上. 随后,将样品用真空镀膜机镀金,以获得较高分辨率的图像. 采用扫描电镜仪进行颗粒物形貌观察并拍摄照片.

2 结果与讨论

2.1 清洗参数优化

通过清洗参数正交实验,从表 2 直观分析可知:当水土比为 90% 干物质、温度为 50℃、搅拌时间为 10 min、搅拌速率为 1 200 r·min⁻¹ 时,清洗效率最

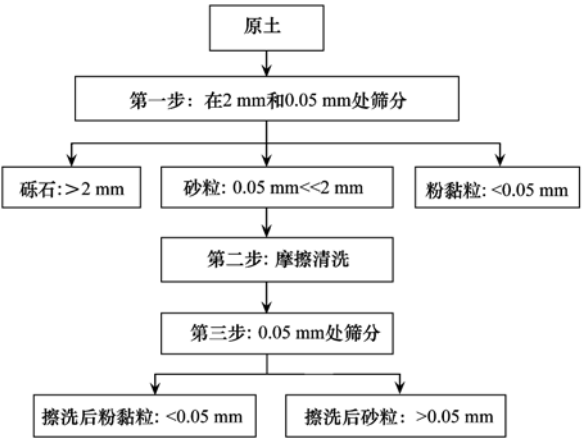


图 1 摩擦清洗流程示意

Fig. 1 Attrition scrubbing flow chart

好。由于正交实验并非完全实验,实验中未考虑各因素间的交互作用,因此清洗效率最好并不能说明此时清洗参数最优^[16]。

极差是指各水平平均值最大值与最小值之差,极差的大小反映了因子水平改变时对实验结果的影响大小。由表 2 极差分析可知水土比的极差最大,其次是搅拌时间、温度、搅拌速率,说明水土比的不同对清洗效率产生了最大的影响。要把引起数据波动的原因进行分解,数据的波动可

以用偏差平方和来表示。由表 3 方差分析^[17]可知,水土比是引起数据波动的关键因素,其次是搅拌时间、温度和搅拌速率。这与表 2 的极差分析结果相同,因此可以确定水土比是关键影响因素,对水土比和其他影响因素进行交互作用分析,结果如表 4~6 所示。交互作用值最大的即为最优参数,由表 4~6 分析可知,水土比为 70% 干物质、温度 25℃、搅拌时间 30 min、搅拌速率 1 200 r·min⁻¹为最佳清洗参数。

表 2 正交实验设计及结果

Table 2 Orthogonal experiment design and results					
所在列	1	2	3	4	5
因素	水土比/%	温度/℃	搅拌时间/min	搅拌速率/r·min ⁻¹	清洗效率/%
实验 1	40	25	10	400	32.84
实验 2	40	50	20	800	16.52
实验 3	40	75	30	1 200	56.41
实验 4	70	25	20	1 200	61.08
实验 5	70	50	30	400	65.06
实验 6	70	75	10	800	69.56
实验 7	90	25	30	800	70.12
实验 8	90	50	10	1 200	70.53
实验 9	90	75	20	400	67.39
均值 1	35.257	54.680	57.643	55.097	
均值 2	65.233	50.703	48.330	52.067	
均值 3	69.347	64.453	63.860	62.673	
极差	34.090	13.750	15.533	10.606	

表 3 方差分析表

Table 3 Anova table				
因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
水土比	2 077	2	2.842	4.460
温度	300.4	2	0.411	4.460
搅拌时间	366.7	2	0.502	4.460
搅拌速率	179.1	2	0.245	4.460
误差	2 923	8		

表 4 温度、水土比交互作用分析

Table 4 Interaction analysis of temperature and solid ratios			
温度/℃	水土比		
	40	70	90
25	32.84	70.53	69.56
50	61.08	16.52	67.39
75	70.12	65.06	56.41

表 5 搅拌时间、水土比交互作用分析

Table 5 Interaction analysis of attrition time and solid ratios			
搅拌时间/min	水土比		
	40	70	90
10	32.84	65.06	67.39
20	70.12	16.52	69.56
30	61.08	70.53	56.41

表 6 搅拌速率、水土比交互作用分析

Table 6 Interaction analysis of attrition speed and solid ratios			
搅拌速率/r·min ⁻¹	水土比		
	40	70	90
400	32.84	65.06	67.39
800	70.12	16.52	69.56
1 200	61.08	70.53	56.41

2.2 R 值评价摩擦清洗前不同粒径对铅的富集程度

原土经过第一步筛分后,各粒径铅浓度和有机质的 R 值如表 7 所示。从中可知,砾石部分,1、2 号土壤 R(Pb) 值均 < 1, 1 号土壤 R(Pb) 值最低:0.216 5; 3 号土壤 R(Pb) 值最高:1.801。砂粒部分,3 号土壤 R(Pb) 值最低:0.946 4; 1、2 号土壤 R(Pb) 值均 > 1, 1 号土壤 R(Pb) 值最高:1.149。粉黏粒部分,3 号土壤 R(Pb) 值最低:1.004; 3 份土壤 R(Pb) 均 > 1, 1 号土壤 R(Pb) 值最高:1.203。总之,通过对 R 值进行分析直观表明,1、2 号土壤铅主要富集在砂粒和粉黏粒中,3 号土壤铅主要集中在砾石和粉黏粒中。一般认为^[18,19]细粒土具有较大的比表面积而集中大量污染物,分析结果表明 3 份土壤的铅在粉黏粒中都富集较多;而该场地砂粒由

于表面富集了一部分细粒土也富集了较多的铅. R 值可以对不同浓度的土壤各粒径上铅的富集程度做统一的比较,为摩擦清洗提供了理论依据.

此外,由表 7 可知, $R(OM)$ 值的变化规律与 $R(Pb)$ 值基本一致. 有研究表明^[20~22],污染土壤中重金属和有机质可通过形成重金属-颗粒态有机质复合体发生相互促进稳定或积聚的作用,有机质中的颗粒状有机质(POM)对重金属有较高的吸附潜力,并在 pH 5~7 范围内达到最高水平. 而本实验采用的 3 种土壤 pH 值基本在 5~7 范围内. 因此,铅含量与有机质有极大的相关性,这是造成有机质对铅富集作用的机制之一.

表 7 R 值粒级分布规律

Table 7 Distribution of R value in different fractions			
土样	粒级	$R(Pb)$	$R(OM)$
1 号	> 2 mm	0.216 5	0.600 0
	2 ~ 0.05 mm	1.149	1.039
	< 0.05 mm	1.109	1.101
2 号	> 2 mm	0.375 3	0.476 3
	2 ~ 0.05 mm	1.140	1.018
	< 0.05 mm	1.208	1.289
3 号	> 2 mm	1.801	1.721
	2 ~ 0.05 mm	0.946 4	0.930 0
	< 0.05 mm	1.004	1.072

2.3 摩擦清洗后不同粒径上铅的变化规律

2.3.1 摩擦清洗后砂粒变化规律

(1)摩擦清洗前后砂粒的质量和表面变化规律
为进一步研究砂粒在清洗后的变化规律,将砂粒分成 5 个等级:0.05~0.125、0.125~0.25、0.25~0.5、0.5~1 和 1~2 mm. 3 份土摩擦清洗前后在各粒级上质量分数的变化情况如图 2 所示. 在 0.05~0.125 mm 粒级上高、中浓度土的质量增加分数为:3.230% 和 5.710%,低浓度土的质量分数减少 0.929 2%;在 0.125~0.25 mm 粒级上 3 份土的质量分数均在增加,增加量分别为:2.480%、6.820%、3.119%;在 0.25~0.5 mm 粒级上高浓度土的质量分数减少:2.270%,中、低浓度土的质量分数增加为:3.230% 和 0.218 9%;在 0.5~1 mm 粒级上 3 份土的质量分数均减少,减少量分别为:1.608%、4.480%、1.405%;在 1~2 mm 粒级上 3 份土的质量分数均减少,减少量分别为:1.866%、11.29%、1.004%. 由实验结果,可以看出 3 种浓度土壤在 0.25~0.5 mm 粒级处是摩擦清洗后质量分布发生变化的拐点处. 说明摩擦清洗使砂粒中粗砂粒(2~0.25 mm)质量减少,细砂粒(0.25~0.05

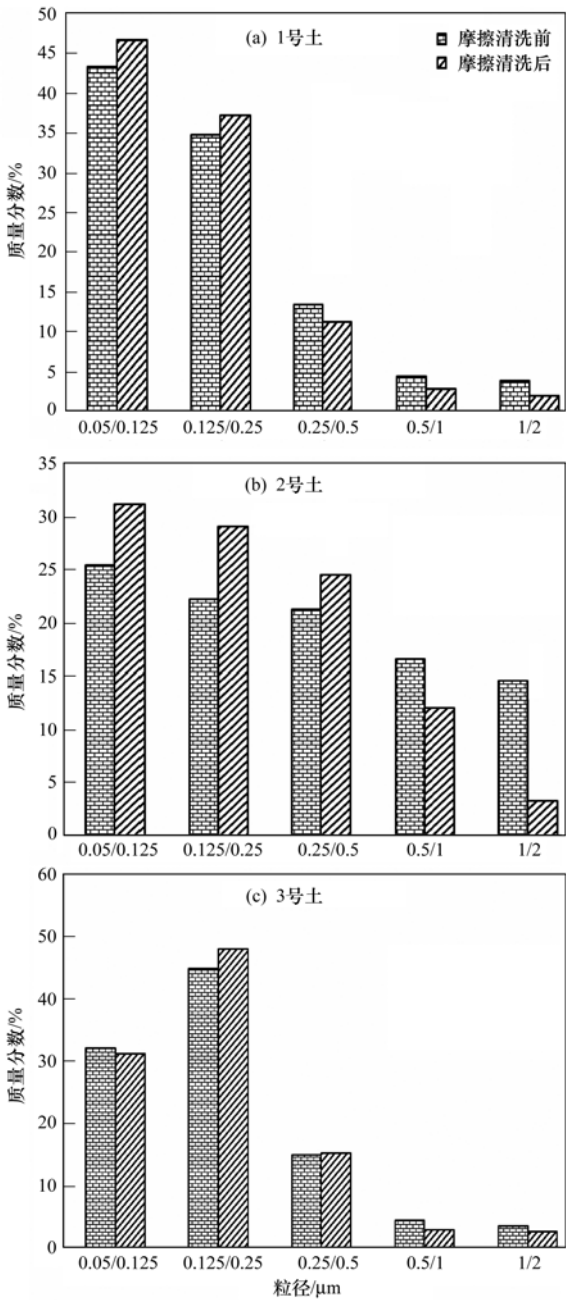


图 2 摩擦清洗后砂粒质量分数变化

Fig. 2 Variation of sand mass percentage after attrition scrubbing

mm) 质量增加.

通过扫描电镜(SEM)观察摩擦清洗后砂粒的变化来确认清洗效果,如图 3 所示. 图 3(a)表明砂粒在清洗前表面由于铅污染物的富集而凹凸不平,应该是富集较多细粒土壤,细粒土壤具有较大的比表面积而吸附大量铅污染物^[23];图 3(b)表明摩擦清洗后砂粒土表面较光滑,一部分细粒土从砂粒表面擦洗下来. 土壤中污染物与颗粒表面结合主要有 3 种形式^[24]:①污染物与土壤的潜在化学反应,如颗粒表面的腐殖酸与污染物的反应;②污染物的疏

水/亲水性;③污染物和固体表面的表面力作用. 扫描电镜(SEM)观测结果表明,摩擦清洗通过破坏土壤中污染物与颗粒表面的结合方式使砂粒表面的污染物擦洗下来.

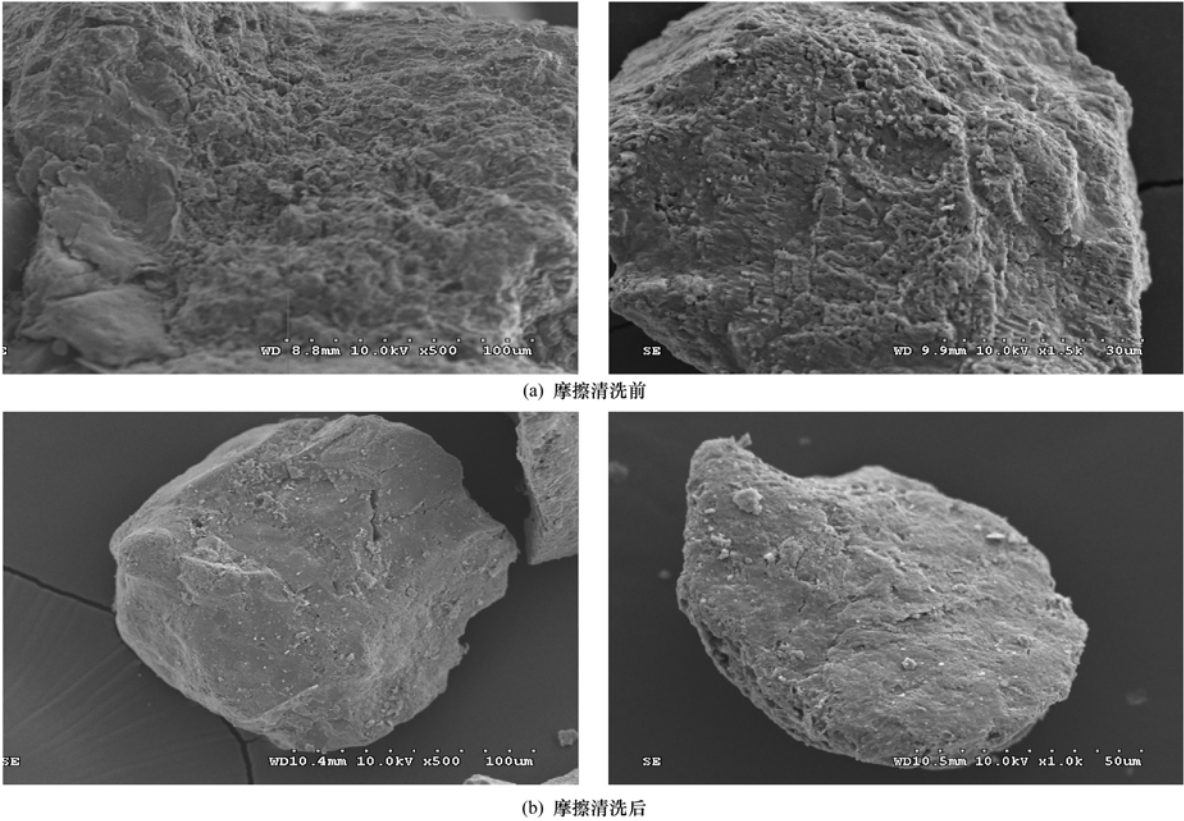


图3 摩擦清洗前后砂粒表面扫描电镜(SEM)照片

Fig. 3 Scanning electron microscope(SEM)photos of sand surface before and after attrition scrubbing

(2)摩擦清洗后砂粒的 R 值变化规律及清洗效率评价

摩擦清洗后砂粒的 R 值变化规律如图 4 所示. 从中可知,经过摩擦清洗后,3 份土壤中砂粒部分 $R(\text{Pb})$ 和 $R(\text{OM})$ 均减少至 <1 ,使富集在砂粒上的铅减少. 3 份土 $R(\text{Pb})$ 分别减少:0.776 8、0.361 8、0.388 1; $R(\text{OM})$ 分别减少:0.289 0、0.289 3、0.481 9.

通过对清洗效率进行计算,摩擦清洗对于 3 份土的清洗效率分别为:67.61%、31.71%、41.01%. 1 号土壤砂粒铅浓度最高,因此被擦洗下来的铅也相对最多,去除效果最好;2、3 号土壤砂粒浓度差别不大,但质量差别很大,3 号土壤比 2 号土壤砂粒质量分数多 30.54%,造成 3 号比 2 号清洗效率高. 摩擦清洗对于 3 份土砂粒中铅的去除均有较明显的效果,而且有机质的变化规律与铅相同,这更加证实了铅含量与有机质有极大相关性.

总之, R 值对 3 份土的清洗效率评价说明摩擦清洗对 3 份土壤的砂粒中的铅均有较好的去除

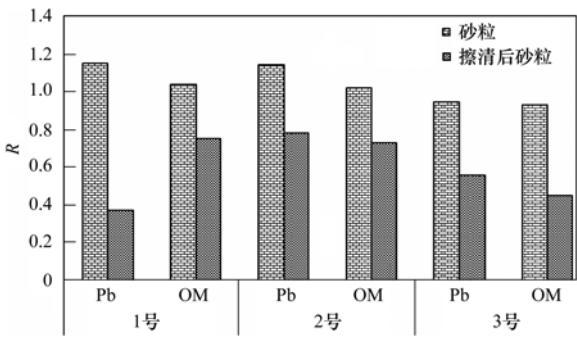


图4 摩擦清洗后砂粒 R 值变化

Fig. 4 Variation of R value after attrition scrubbing sand

效果.

2.3.2 摩擦清洗后粉黏粒变化规律

摩擦清洗后粉黏粒 R 值变化规律如图 5 所示. 从中可知,经过摩擦清洗后,3 份土壤中粉黏粒部分 $R(\text{Pb})$ 和 $R(\text{OM})$ 均增,说明从砂粒上擦洗下来的黏粉粒富集了大量的铅,摩擦清洗起到了浓缩铅污染物的目的. 高、中、低浓度土 $R(\text{Pb})$ 分别增加:0.476 0、0.048 00、0.335 0; $R(\text{OM})$ 分别增加:

0.577 0、0.100 0、0.341 0。3 份土的粉黏粒 R 值的增加量均小于砂粒 R 值减少量,这是由于 3 份土的 pH 值偏弱碱,在清洗过程中释放出—部分水溶态铅,随液体流失掉^[25]。 $R(\text{Pb})$ 和 $R(\text{OM})$ 变化规律相同,证实了铅含量与有机质有极大相关性。

由此说明,摩擦清洗能使 3 份土壤砂粒表面聚集的粉黏粒擦洗下来,能有效将铅浓缩到粉黏粒中。

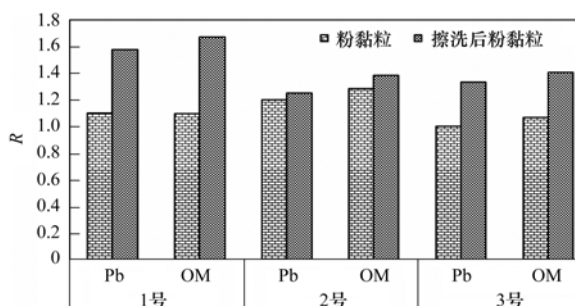


图 5 摩擦清洗后粉黏粒 R 值变化

Fig. 5 Variation of clay R value after attrition scrubbing

3 结论

(1)本研究采用 $L_9(3^4)$ 正交实验,根据铅污染物的去除率对实验结果进行极差、方差和交互作用分析,优化清洗参数是:水土比为 70% 干物质、温度为 25℃、搅拌时间为 30 min、搅拌速率为 1 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(2)本研究通过 R 值评价不同粒径土壤对铅富集程度的高低及摩擦清洗效率,当 $R > 1$ 时铅富集程度较高,反之较少。对不同浓度原状土壤进行摩擦清洗实验,结果表明:3 份土壤铅主要富集在砂粒和粉黏粒中,铅的分布与有机质有极大相关性;3 份土壤的摩擦清洗效率分别为:67.61%、31.71%、41.01%,摩擦清洗对 3 份土壤的砂粒中的铅均有较好的去除效果。

(3)通过扫描电镜(SEM)和砂粒粒径分级进一步研究摩擦清洗后砂粒的变化规律,结果表明:摩擦清洗能从砂粒表面去除一部分细粒土壤和铅污染物;0.25~0.5 mm 处是摩擦清洗质量变化的拐点。粉黏粒的变化规律表明摩擦清洗能使 3 份土壤砂粒表面聚集的粉黏粒擦洗下来,能有效将铅浓缩到粉黏粒中。

参考文献:

- [1] 李玉双, 胡晓钧, 宋雪英, 等. 城市工业污染场地土壤修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(10): 6119-6122.
- [2] 张英慧, 袁东亚, 赵志鹏, 等. 重金属铅污染对动植物的危害综述[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(2): 55-56.
- [3] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, *et al.* Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(1): 1-31.
- [4] Marino M A, Brica R M, Neale C N. Heavy metal soil remediation: The effects of attrition scrubbing on a wet gravity concentration process [J]. Environmental Progress, 1997, 16(3): 208-214.
- [5] Bayley R W, Biggs C A. Characterisation of an attrition scrubber for the removal of high molecular weight contaminants in sand [J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 111(1): 71-79.
- [6] Feng D, Lorenzen L, Aldrich C, *et al.* Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods [J]. Minerals Engineering, 2001, 14(9): 1093-1100.
- [7] Stražičar J, Sešelj A. Attrition as a process of comminution and separation [J]. Powder Technology, 1999, 105(1-3): 205-209.
- [8] Thorvaldsen G S, Wakefield A W. The sand scrubber: an effective environmental application of jet pumps [J]. Hydrotransport, 1999, 14: 1-14.
- [9] 利珀特 J, 张兴仁, 肖力子. 土壤湿法清洗——第一家高效土壤擦洗厂 [J]. 国外金属矿选矿, 2007, (8): 42-44.
- [10] Gül A, Kaytaz Y, Önal G. Beneficiation of colemanite tailings by attrition and flotation [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(4): 368-369.
- [11] Petavy F, Ruban V, Conil P, *et al.* Attrition efficiency in the decontamination of stormwater sediments [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(1): 153-161.
- [12] Petavy F, Ruban V, Conil P. Treatment of stormwater sediments: Efficiency of an attrition scrubber-laboratory and pilot-scale studies [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 145(3): 475-482.
- [13] 刘雷, 杨帆, 刘足根, 等. 微波消解 ICP-AES 法测定土壤及植物中的重金属 [J]. 环境化学, 2008, 27(4): 511-514.
- [14] NY/T 1121. 6-2006, 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定 [S]. 中华人民共和国农业部, 2006.
- [15] 刘田, 裴宗平. 枣庄市大气颗粒物扫描电镜分析和来源识别 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 151-155.
- [16] 潘鑫, 韩登峰, 史帅星, 等. 浮选柱超声预处理浮选难选尾矿研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2012, (1): 59-63.
- [17] 俞国庆. 再磨与擦洗对提高钼精矿质量影响试验研究 [J]. 中国钼业, 2003, 27(1): 18-20.
- [18] Lee P K, Touray J C, Baillif P, *et al.* Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France [J]. Science of the Total Environment, 1997, 201(1): 1-15.
- [19] Zanders J M. Road sediment: characterization and implications for the performance of vegetated strips for treating road run-off [J]. Science of the Total Environment, 2005, 339(1-3): 41-47.
- [20] 王浩, 章明奎. 污染土壤中有机质和重金属互相作用的模拟研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35

- (4): 460-466.
- [21] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 土壤中颗粒状有机质对重金属的吸附作用[J]. 土壤通报, 2007, **38**(6): 1100-1104.
- [22] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, **34**(4): 82-87.
- [23] 黄静. 西安市公园土壤的重金属含量水平及理化性质研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009.
- [24] Durand C, Ruban V, Amblès A. Mobility of Trace Metals in Retention Pond Sediments [J]. Environmental Technology, 2004, **25**(8): 881-888.
- [25] 王崇臣, 李曙光, 黄忠臣. 公路两侧土壤中铅和镉污染以及存在形态分布的分析[J]. 环境污染与防治, 2009, **3**(5): 80-82.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

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, ZHANG Bin, <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-yi, <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

国内外公开发刊