

# 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<sub>2.5</sub>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, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O<sub>3</sub>、HONO、HCHO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>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, 谢薇薇, 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<sub>2</sub>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, 陈永稳, 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<sub>2</sub>储存性能研究 ..... 曹琳, 王海滨, 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**

多证据分析技术在场地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)

# 某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究

岳希<sup>1,2</sup>, 孙体昌<sup>1\*</sup>, 黄锦楼<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 以西南地区某铅蓄电池污染场地土壤为研究对象, 对 5 个表层土壤(0~20 cm)7 个粒径(极粗砂粒、粗砂粒、中砂粒、细砂粒、极细砂粒、粉粒和黏粒)中铅含量进行了分析测定, 并研究了其与有机质的相关关系. 结果表明, 5 个土壤样品受到了不同程度的铅污染, 各粒径铅含量的变化呈现出两种变化趋势, 污水处理车间排污口、生产车间 A 及生产车间 B 这 3 个样品铅含量随粒径的减小先降低后升高; 包装车间及原生产车间 A 样品铅含量随粒径的减小而降低. 铅含量随各粒径组分中有机质的含量的升高而增大, 其相关系数为 0.823 2. 实验结果表明研究场地中, 土壤有机质随着粒径的减小对铅富集的能力有所降低. 土壤质地是影响铅含量分布、有机质含量以及之间关系的重要因素.

**关键词:** 铅蓄电池厂; 污染场地; 粒径; 土壤有机质; 土壤质地

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3679-05

## Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site

YUE Xi<sup>1,2</sup>, SUN Ti-chang<sup>1</sup>, HUANG Jin-lou<sup>2</sup>

(1. Civil and Environment Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In this research, six topsoil samples (0-20 cm) were collected in the heavy-metal lead contaminated soil of one lead battery factory in South-west China as research object, which were later divided into seven particle size fractions, and analyzed for the lead concentration as well as the correlation between the lead concentration and the organic matter content. The result showed that five soil samples were contaminated with lead with different pollution levels, and there were two different trends in the changes of lead concentration as of the change of soil particle size. The lead concentration of the three samples from sewage treatment workshop, the workshop A and the workshop B, showed a first declining and then ascending trend with the decreasing particle size. The lead concentration of the soil samples of the packing workshop and the former production workshop A showed a decreasing trend when the particle size decreased. The lead concentration and the organic matter content showed a positive linear correlation ( $R^2 = 0.823 2$ ). Soil organic matter has the ability of lead enrichment, and the ability declines with the decreasing particle size. Soil texture may be an important factor for the interaction between soil organic matter and lead distribution.

**Key words:** lead-acid battery factory; lead-contaminated site; particles-size; soil organic matter; soil texture

近年来我国铅污染事件频发, 铅蓄电池行业是造成其污染主要途径之一, 其环境和健康风险<sup>[1,2]</sup>引起了管理部门和学者的极大关注. 2011 年 5 月, 国家环境保护部下达《关于加强铅蓄电池及再生铅行业污染防治的通知》, 同年 7 月我国各地共排查铅蓄电池相关企业 1 930 家, 其中 80% 的企业停业整顿或勒令停产. 铅毒性较大, 长期蓄积并主要滞留于土壤表层<sup>[3,4]</sup>, 成为铅摄入人体的重要来源之一.

土壤是由不同大小粒子组成的混合物, 重金属的迁移、转化与土壤颗粒物的粒径及粒径分布密不可分<sup>[5]</sup>, 近年来, 国内外学者针对铅含量与土壤粒径的关系开展了大量研究, 但多集中于砂质土, 其结果表明铅含量随土壤粒径的减小而升高, 细粒中铅含量明显高于粗颗粒<sup>[6-9]</sup>. 然而我国铅蓄电池行业

主要集中于西南及东南沿海地区, 土壤质地偏细, 因此有必要针对我国实际情况对铅在不同粒径中的分布规律进行研究, 并对其主要影响因素进行探讨. 在土壤成分中, 有机质对重金属具有很强的吸附能力, 并能与重金属元素形成络合物, 影响土壤中重金属的积累情况<sup>[7-13]</sup>, 有必要对不同粒径土壤对铅含量与有机质的关系进行验证与探讨.

本研究选取西南地区某铅蓄电池厂表层土壤为对象, 将土壤分为 7 个粒径, 针对各粒径中的铅含量、有机质含量进行测定并研究其相关关系, 以明

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-10-16

作者简介: 岳希(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: yuexi1988@live.com

\* 通讯联系人, E-mail: suntc@ces.ustb.edu.cn

确铅蓄电池行业污染场地不同粒径土壤中铅与有机质的关系,以期为铅蓄电池行业污染场地土壤的铅污染风险评估和整治修复提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

本研究选定污染场地为西南地区,该企业始建于 20 世纪 40 年代,生产铅酸蓄电池 60 余年,长期的生产运营严重地污染了该厂区场地。通过对该企业基本情况以及主要污染源的调查,确定厂区土壤可能由因硫酸及铅造成污染,污染范围主要为废水处理车间边缘未硬化的土壤、厂区铅锭堆存场及生产车间废铅堆场的土壤。根据土壤及污染情况的不同选取该场地 5 个点位的表层土壤(0~20 cm)为研究对象,分别为废水处理车间排污口附近,生产车间 A、生产车间 B、包装车间及原生产车间 A,样品分别标记为 S1~S5,其中 S2 有人为扰动痕迹。新鲜土壤样品除去大块石砾、植物根系等异物后自然风干,过 2 mm 标准筛后混匀避光保存。

### 1.2 研究方法

#### (1) 土壤理化性质的测定

土壤质地的划分采用美国土壤质地分类制;粒径分布采用湿筛虹吸法进行测定;土壤 pH 值采用玻璃电极法测定,水土比为 1:2.5;土壤有机质采用重铬酸钾加热法,CEC 采用乙酸铵交换法。

#### (2) 不同粒径土壤的筛分与制备

不同粒级土壤制备采用物理湿筛-吸管法,按美国制土壤粒径分级标准分为以下 7 个粒径范围:①极粗砂粒(2 000~1 000  $\mu\text{m}$ );②粗砂粒(1 000~500  $\mu\text{m}$ );③中砂粒(500~250  $\mu\text{m}$ );④细砂粒

(250~100  $\mu\text{m}$ );⑤极细砂粒(100~50  $\mu\text{m}$ );⑥粉粒(50~2  $\mu\text{m}$ );⑦黏粒(<2  $\mu\text{m}$ )。将一定质量土壤放入 9 目、32 目、60 目的套筛中,筛分过程均采用超纯水,各筛网上大于 250  $\mu\text{m}$  的颗粒导入烧杯中,小于 250  $\mu\text{m}$  的土壤颗粒采用吸管法。所有的粒径组分自然风干后称重,计算出各粒径所占的质量分数。

#### (3) 铅含量的测定

铅含量测定采用微波消解法,分别称取 0.25 g 供试土壤样品于 MARS 微波消解仪中(美国 CEM 公司),加入 5 mL 硝酸、2 mL 30% 过氧化氢及 1 mL 氢氟酸,冷却后转移至 50 mL 比色管,完全冷却后定容至标线,摇匀后过滤,用 ICAP-6300 型 ICP-AES(英国 Thermo 公司)测定铅含量。

### 1.3 数据分析方法

采用 Origin 7.5 软件对铅含量、有机质含量在不同粒径中的分布规律及其相互关系进行数据统计及制图分析。采用展览地 A 级标准《展览会用地土壤环境质量评价暂行标准》,即 140  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  判断土壤样品铅含量是否超标。

## 2 结果与讨论

### 2.1 供试土壤基本理化性质

各采样点土壤理化性质如表 1 所示。各样品机械组成主要以粉粒为主,细沙粒、极细砂粒及黏粒次之,土壤质地均偏细。大部分土壤呈偏碱性。S1 由于受到硫酸废液污染呈酸性。S1、S2 中存在大量植物残体,因此有机质含量相对高于其他样品。不同样点土壤铅含量变化较大,但均超过 140  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的标准,其中 S2 铅含量最高达到了 44 800  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 1 供试土壤基本理化性质

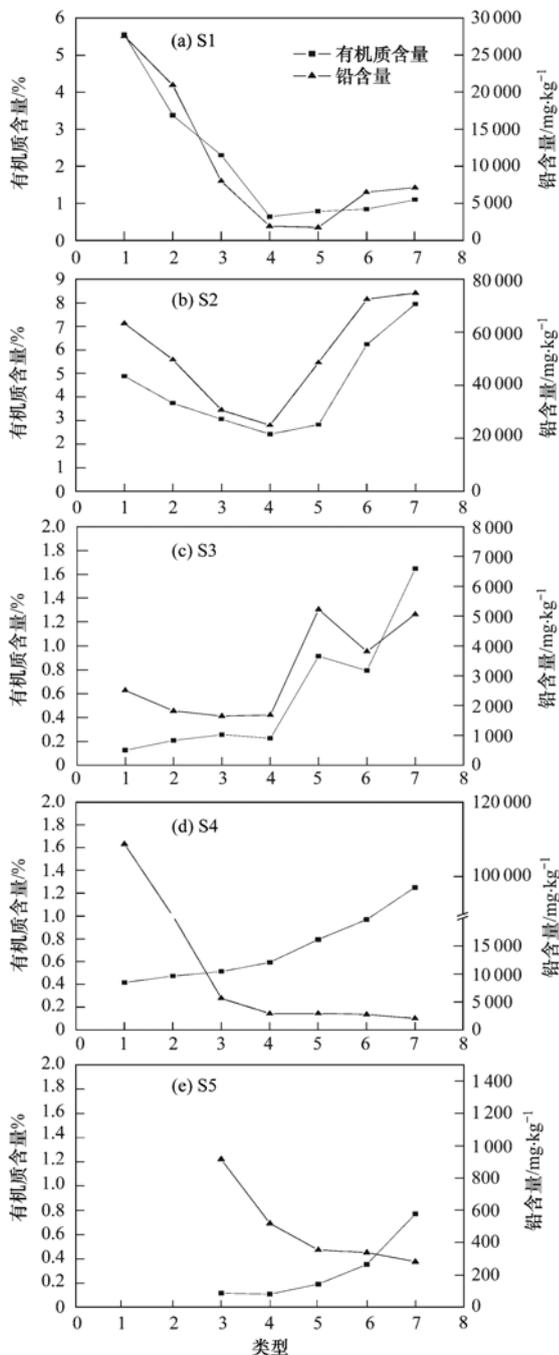
Table 1 Physical and chemical properties of the soil samples

土样编号	pH	有机质 /%	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	铅含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	粒径分布/%							土壤质地
					极粗砂粒	粗砂粒	中砂粒	细沙粒	极细砂粒	粉粒	黏粒	
S1	4.402	1.105	15.45	6 800	1.65	2.65	6.20	20.54	15.60	46.31	7.05	砂质壤土
S2	7.430	3.933	14.15	44 800	3.59	4.87	9.79	30.99	15.88	28.05	6.83	砂质壤土
S3	10.10	0.740	16.25	3 206	2.43	3.07	10.52	24.43	13.92	32.31	13.32	砂质壤土
S4	8.012	0.859	19.95	4 696	1.39	1.83	9.22	11.94	10.05	52.59	12.98	粉质壤土
S5	8.361	0.397	15.25	371.4	—	—	2.72	11.99	7.86	55.28	22.15	粉质壤土

### 2.2 不同土壤粒径中有机质含量分布特征

不同粒径中有机质含量如图 1 所示。从中可知,不同土壤不同粒径中有机质含量变化规律不同;S3、S4 和 S5 土壤,有机质含量随粒径的减小而逐渐升高,这与文献研究结论一致<sup>[14]</sup>。这可能是由于土

壤砂粒部分的有机质以碳水化合物为主,易被分解<sup>[15,16]</sup>,而粉粒和黏粒组分中的有机质腐殖化程度较高,主要由芳香烃和脂肪烃结构组成,通常微生物难以降解<sup>[17,18]</sup>造成。S1 及 S2 土壤中有机质含量随粒径增加先降低后升高,其中细沙粒部分(250~



1. 极粗砂粒; 2. 粗砂粒; 3. 中砂粒; 4. 细砂粒;  
5. 极细砂粒; 6. 粉粒; 7. 黏粒

图1 各车间土壤不同粒径中的有机质与铅含量分布

Fig. 1 Distribution of organic matter content and lead concentration in different soil particle size of the soil samples collected from different workshops

100  $\mu\text{m}$ ) 有机质含量最低。推测 S1 及 S2 中存在的新鲜的或轻度分解的动植物残体及碎屑, 在土壤筛分过程中富集于大粒径的砂粒部分, 因此该场地颗粒有机质主要集中于 250  $\mu\text{m}$  以上部分。

### 2.3 不同土壤粒径中铅的分布特征

如图 1 可知, 各土壤不同粒径铅含量分布特征不同: S1、S2 和 S3, 铅含量随粒径的减小呈 V 型变化, 即在 250 ~ 100  $\mu\text{m}$  处铅含量最低; S4 和 S5, 铅含量随粒径的减小而降低, 于极细砂粒组分以下变化趋于平稳。

国内外学者对于粒径与铅含量关系, 多数研究发现铅污染土壤中铅的含量随着粒径的减小而升高。对于本研究结果的差异, 推测为以下原因: ①铅污染物种类不同, 在铅蓄电池制造业清洁生产污染排放调查中<sup>[19]</sup>, 铅尘、铅碎屑及冶炼废渣、铅膏及酸性废液是生产环节主要产生的污染物, 如若管理不善, 铅污染物将以多种形式进入土壤环境。本研究中 S4 处附近设有废铅堆存场, 因此导致其在极粗砂粒及粗砂粒中铅含量急剧增高。②土壤质地的不同, 多数研究的供试土壤均为砂质土, 对于为砂质壤土的 S1 ~ S3, 两者关系与以前多数研究者的研究结果较为相似。而 S4、S5 土壤质地较为黏重, 这可能是规律相反的主要原因。③有机质对铅的吸附, S1、S2 砂粒部分的植物残体对铅有着极大的吸附能力, 比对有机质含量较低的 S3 砂粒部分, 铅含量较低, 因此证明了此推断。

由于不同粒径中铅含量的分布规律差异较大, 因此通过计算各粒径铅相对富集系数<sup>[20]</sup>及铅贡献度<sup>[21]</sup>对铅的分布情况进行分析。相对富集系数即各粒组的重金属含量与土壤重金属含量的比值, 它可反映重金属在各粒级中分布的差异。由表 2 知, S1 ~ S3 铅的富集系数随粒径的变化趋势为先降低后升高, 在极细砂粒处最低。S4 (剔除受铅粒干扰的极粗砂粒与粗砂粒) 与 S5 相对富集系数随粒径的减小而减小。砂质壤土黏粒与粉粒的富集系数显著高于粉质壤土。

为了计算各粒径对土壤中铅总含量的贡献率, 将每个粒级的总浓度与其质量分数相乘并求和, 见图 2。从中可知, 除 S4 之外, 铅贡献量最大的主要集中在土壤的粉粒部分, 范围在 36.94% ~ 52.92%。S4 极粗砂粒与粉粒的  $\sum \text{Pb}$  贡献量相当, 分别为 30.38% 与 29.64%。S1、S2 及 S5 铅的贡献率按下列次序降低: 粉粒 > 砂粒 > 黏粒。S3、S4 铅的贡献率次序为: 砂粒 > 粉粒 > 黏粒。砂粒与粉黏粒所占的贡献率分别大致占到总量的 50%。

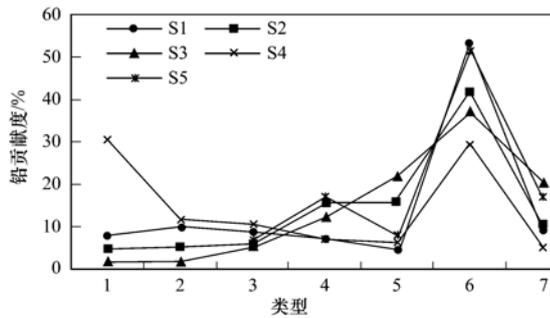
### 2.4 不同土壤粒径中有机质与铅含量的关系

由图 1 知, S1、S2 与 S3 样品中不同粒径土壤中铅含量与有机质具有较好的相关性, 因此将该 3 个样点土壤不同粒径的有机质含量与铅含量进行了相

表 2 土壤不同粒径中铅的富集系数

Table 2 Pb enrichment coefficient in soil of different particle size

项目	极粗砂粒	粗砂粒	中砂粒	细砂粒	极细砂粒	粉粒	黏粒
S1	1.415	1.108	0.686	0.556	1.084	1.618	1.671
S2	4.751	3.614	1.379	0.332	0.302	1.121	1.226
S3	0.782 9	0.567	0.515	0.526	1.629	1.190	1.577
S4	—	—	1.203	0.624	0.626	0.588	0.439
S5	—	—	2.469	1.398	0.956	0.913	0.759



1. 极粗砂粒; 2. 粗砂粒; 3. 中砂粒; 4. 细砂粒;  
5. 极细砂粒; 6. 粉粒; 7. 黏粒

图 2 铅在土壤不同粒径中的贡献度

Fig. 2 Pb contribution in soil of different particle size

关分析,如图 3 所示,铅的含量与粒径组分中有机质含量存在极显著的正相关,相关系数为  $R^2 = 0.823 2$ . 对于 S4 与 S5,两者关系出现了相反的变化趋势. Dumat 等<sup>[22]</sup>和 Cecchi 等<sup>[23]</sup>研究发现在土壤黏粒部分,铅可能与矿物相互作用,有机质并不是影响铅的主要因素. 另外,郑顺安等<sup>[24]</sup>认为土质是影响有机质对重金属富集能力的又一因素,分析结果表明砂质土壤 > 壤土 > 黏土. 因此推测正是由于 S4 与 S5 土壤质地较细、黏粉粒比例居多造成了与 S1、S2 及 S3 样点结果相反. 结果表明,对于砂质壤土,有机质、土壤颗粒及铅之间相互影响,土壤有机

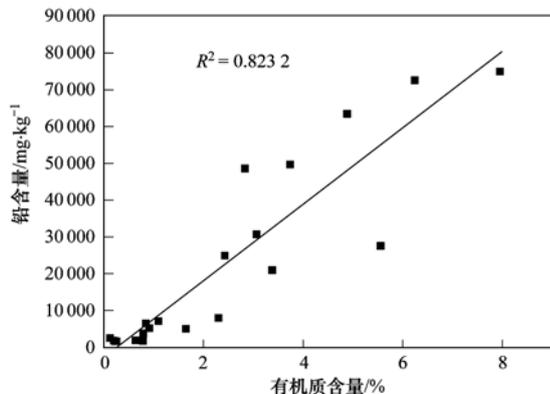


图 3 不同粒径中的有机质含量与铅关系

Fig. 3 Correlations between the content of lead and organic matter content in different particle

质对铅有很强的富集能力. 而对于质地偏细土壤,有机质并不是影响土壤中铅含量的主要因素.

有研究表明,污染物在土壤中的含量与分配不仅与土壤有机质的总量有关,而且还与有机质的质量有很大的关系<sup>[25]</sup>. 使用每千克有机碳(OC)中铅的含量来讨论土壤不同粒径组分有机质对铅的富集能力,它能在一定程度上反映土壤有机质的质量对铅在粒径组分中分配的影响. 如图 4 结果表明,随着粒径的减小有机质对铅富集的能力降低. 极粗砂粒中有机质对铅的富集能力最强,黏粒粉粒部分有机质对铅的富集能力最差,这是由于存在颗粒有机质的结果颗粒态有机质对铅有极强的结合能力. 但该结果与文献报道的呈相反趋势,推测是由于本实验供试土壤为场地污染土且质地偏细,而其他学者研究中供试土壤为未污染砂质土.

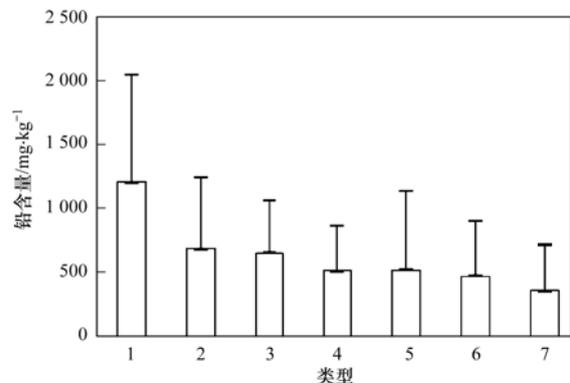


图 4 不同粒径中有机质对铅的富集能力

Fig. 4 Contents of lead normalized to organic C in soil particle size separates

### 3 结论

(1)该铅蓄电池厂污染场地污染土壤中,S1 ~ S2 有机质含量随粒径的变化规律与其他车间相异,在细砂粒部分出现拐点,分别向粒径最大和最小两级逐渐升高,其余样品有机质含量均随粒径的减小而增大. 该 5 个样品均在细砂粒以下(250  $\mu\text{m}$ ) 部分有机质含量随粒径的减小逐渐升高.

(2)铅在土壤的不同粒径组分中分配规律不

同,因此通过计算各粒径铅相对富集系数及贡献度对铅的分布情况进行分析. 对于砂质壤土铅的富集系数随粒径的变化趋势为先减小后升高,在极细砂粒处最低. 粉质壤土富集系数随粒径的减小而降低. 砂粒贡献率与粉黏粒铅贡献率分别大致占到总量的 50%.

(3)整体而言,铅含量与有机质含量呈现出极好的线性关系,铅含量随有机质含量的升高而增大,其相关系数为  $R^2 = 0.8232$ . 砂质壤土中有机质是影响土壤铅含的重要影响因素;对于粉质壤土,铅含量随有机质的升高而有所降低. 通过计算有机质对铅的富集系数,各车间随着粒径的减小有机质对铅富集的能力降低.

(4)铅在土壤中的分布是不均匀的,本研究通过对各粒径铅相对富集系数,污染贡献度及各粒径有机质对铅的富集情况,可迅速简明地判断出各粒径铅污染程度,可为后续场地的评估和修复提供指导. 另外,土壤质地是影响铅含量、有机质含量及之前相互关系的重要影响因素.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kaiser J. Toxicologists shed new light on old poisons [ J ]. Science, 1998, **279**(5358): 1850-1851.
- [ 2 ] Bener A, Almehdi A M, Alwash R, *et al.* A pilot survey of blood lead levels in various types of workers in the United Arab Emirates [ J ]. Environment International, 2001, **27**(4): 311-314.
- [ 3 ] 程新伟. 土壤铅污染研究进展 [ J ]. 地下水, 2011, **33**(1): 65-68.
- [ 4 ] Kabata P A, Pendias H. Trace elements in soils and plants [ M ]. Boca Raton, FL: CRC, 2001.
- [ 5 ] 汤志云, 吴龙华, 骆永明. 土壤粒级中重金属元素的形态分析与环境风险评估 [ J ]. 地质学刊, 2009, **33**(2): 164-169.
- [ 6 ] Schaidler L A, Senn D B, Brabander D J, *et al.* Characterization of zinc, lead, and cadmium in mine waste; implications for transport, exposure, and bioavailability [ J ]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**: 4164-4171.
- [ 7 ] Quenea K, Lamy I, Winterton P, *et al.* Interactions between metals and soil organic matter in various particle size fractions of soil contaminated with waste water [ J ]. Geoderma, 2009, **149**(3-4): 217-223.
- [ 8 ] Sheets R G, Bergquist B A, Laboratory treatability testing of soils contaminated with lead and PCBs using particle-size separation and soil washing [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **66**(1-2): 137-150.
- [ 9 ] Bergstrom C, Shirai J, Kissel J. Particle size distributions, size concentration relationships, and adherence to hands of selected geologic media derived from mining, smelting, and quarrying activities [ J ]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(20): 4247-4256.
- [ 10 ] Yin Y J, Impellitteri C A, You S J, *et al.* The importance of organic matter distribution and extract soil: solution ratio on the desorption of heavy metals from soils [ J ]. Science of the Total Environment, 2002, **287**(1-2): 107-119.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 吕殿青, 王宏, 潘云, 等. 容重变化对土壤溶质运移特征的影响 [ J ]. 湖南师范大学自然科学学报, 2010, **33**(1): 75-79.
- [ 13 ] 俞天明, 田兆君, 谢正苗, 等. 铅锌矿污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用 [ J ]. 科技通报, 2007, **23**(4): 597-602.
- [ 14 ] 刘合明, 杨志新, 刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨 [ J ]. 生态环境, 2008, **17**(5): 2046-2049.
- [ 15 ] Franzluebbbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture [ J ]. Soil Science Society of America Journal, 1997, **61**(5): 1382-1386.
- [ 16 ] Amelung W, Zech W, Zhang X, *et al.* Carbon, nitrogen, and sulfur pools in particle-size fractions as influenced by climate [ J ]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(1): 172-181.
- [ 17 ] Guggenberger G, Zech W, Haumaier L, *et al.* Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution  $^{13}\text{C}$  NMR analysis [ J ]. European Journal of Soil Science, 1995, **46**(1): 147-158.
- [ 18 ] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, *et al.* Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy [ J ]. Biogeochemistry, 1992, **16**(1): 1-42.
- [ 19 ] Dahodwalla H, Herat S. Cleaner production options for lead-acid battery manufacturing industry [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2000, **8**(2): 133-142.
- [ 20 ] 章明奎. 砂质土壤不同粒径颗粒中有机碳、养分和重金属状况 [ J ]. 土壤学报, 2006, **43**(4): 584-591.
- [ 21 ] 李合莲, 陈家军, 吴威, 等. 焦化厂土壤中多环芳烃分布特征及淋洗粒级分割点确定 [ J ]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1154-1158.
- [ 22 ] Dumat C, Chiquet A, Goody D, *et al.* Metal ion geochemistry in smelter impacted soils and soil solutions [ J ]. Bulletin de la Societe Geologique de France, 2001, **172**(5): 539-548.
- [ 23 ] Cecchi M, Dumat C, Alric A, *et al.* Multi-metal contamination of a calcic cambisol by fallout from a lead-recycling plant [ J ]. Geoderma, 2008, **144**(1-2): 287-298.
- [ 24 ] 郑顺安, 王丽平, 章明奎. 非污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用 [ J ]. 科技通报, 2007, **24**(4): 548-552, 558.
- [ 25 ] 倪进治, 骆永明, 张长波. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 III. 农业土壤不同粒径组分中菲和苯并 [ a ] 芘的分配特征 [ J ]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 717-722.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>3</sub> , HONO, HCHO and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 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 Jiaying .....	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 (Epiclorohydrin-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 <sub>3</sub> .....	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 <sub>2</sub> 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 Jia-wei, <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 <sub>2</sub> 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-minget <i>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-yong, <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 <sup>2+</sup> 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