

# 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 <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 <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 <sub>2</sub> 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)                         |
| <b>重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文</b>                                                         |                                                  |
| 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)                        |                                                  |

# 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<sup>1,2</sup>, 郭庆军<sup>1\*</sup>, 杨俊兴<sup>1</sup>, 张晗芝<sup>1,2</sup>, 魏荣菲<sup>1,2</sup>, 王春雨<sup>1,2</sup>, Marc Peters<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复与资源工程室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 以我国南方某多金属复合污染尾矿土壤为研究对象, 对土壤中重金属全量和各形态含量进行分析. 通过系列振荡淋洗试验研究了蒸馏水、草酸、柠檬酸、乙酸、硝酸和EDTA对污染土壤的淋洗效果, 筛选合适的淋洗剂及其最佳的液土比、液洗时间、淋洗次数等技术参数, 并提出利用综合毒性消减指数来综合评价淋洗剂对污染土壤的修复效果. 结果表明, 该土壤以Cd和Pb污染最为严重, 含量分别达 $52.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4836.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 淋洗剂对土壤中不同重金属元素的淋洗效果差异明显, 其中对Cr的去除率最高仅为2.7%, 而最多能去除约60%的Cd和Pb; 蒸馏水对重金属几乎没有脱除效果, 去除率都在0.1%以下, 草酸和乙酸对重金属的去除率也较低,  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的EDTA是适合的高效淋洗剂; 基于综合毒性消减指数和经济成本, 选择在1:6土水比2次淋洗3h的技术条件.

**关键词:** 重金属; 污染土壤; 尾矿; 淋洗修复; 综合毒性消减指数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3690-07

## Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils

ZHU Guang-xu<sup>1,2</sup>, GUO Qing-jun<sup>1</sup>, YANG Jun-xing<sup>1</sup>, ZHANG Han-zhi<sup>1,2</sup>, WEI Rong-fei<sup>1,2</sup>, WANG Chun-yu<sup>1,2</sup>, Marc Peters<sup>1</sup>

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil samples were collected from compound polluted tailings to analyze the contents of total heavy metals and their speciation in the soil. Laboratory batch tests were conducted to examine the effects of distilled water and different concentrations of oxalic acid, citric acid, acetic acid,  $\text{HNO}_3$  and EDTA on the removal of heavy metals from the polluted soils. The suitable eluent and its optimal conditions including liquid to soil ratio, reaction time and washing number were also optimized, and the total toxicity reduction index was proposed to evaluate the effect of the eluent on the remediation of polluted soil. The results showed that Cd and Pb were the most abundant heavy metals in the soil, reaching  $52.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $4836.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. There was significant difference in the removal efficiency for different heavy metals. Cr had a maximum removal efficiency of 2.7%, while the maximum Cd and Pb removal efficiency was both about 60%. Distilled water had little removal efficiency for heavy metals, with less than 0.1% removal rate; the heavy metal removal efficiency of oxalic acid and acetic acid was also quite low; EDTA in  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  was selected as the suitable eluent for the polluted soil. Evaluation of the total toxicity reduction index and the cost suggested that EDTA should be used with a liquid to soil ratio of 6:1, a reaction time of 3 h and 2 washings.

**Key words:** heavy metal; contaminated soil; tailing soil; washing remediation; total toxicity reduction index

我国是矿业大国, 年开采量已超过50亿t. 矿山资源的开发为我国提供95%以上的能源, 80%以上的工业原料和70%以上的农业生产资料的同时, 其废弃物的排放不仅破坏和占用大量的土地资源, 也加重了对矿区周围生态环境的污染和破坏<sup>[1,2]</sup>. 我国因采矿累计占用、破坏土地达743万 $\text{hm}^2$ , 尾矿堆积量已高达80.51亿t<sup>[3]</sup>. 尾矿中高浓度的重金属进入环境后, 导致矿区及周边地区土壤质量下降, 生态系统退化, 农作物减产, 并通过食物链危害人体的健康.

目前, 修复土壤重金属污染主要有以下两种途径: 一是利用生物或物理、化学技术方法从土壤中去重金属; 二是改变重金属在土壤中的存在状

态, 降低其在环境中的迁移性和生物可利用性. 具体的技术措施包括植物修复、微生物修复、热脱附、化学淋洗、固化-稳定化、氧化-还原、电动力学、联合修复等<sup>[4]</sup>. 其中, 土壤淋洗修复技术具有见效快、效果显著、适用范围广、处理容量大等特点, 具有较好的实际应用前景<sup>[5~7]</sup>. 化学淋洗技术的关键是选择、开发具有针对性的淋洗剂和制定适宜的修复工艺程序. 目前, 常用的淋洗剂有无机淋

收稿日期: 2013-01-06; 修订日期: 2013-03-08

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA06A211-2)

作者简介: 朱光旭(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染评价与修复, E-mail: waiwojiahxx@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: guojq@igsnrr.ac.cn

洗剂(酸、碱、盐等)、人工螯合剂(EDTA、DTPA、NTA 等)、天然有机酸、表面活性剂等<sup>[8,9]</sup>。本研究针对我国南方某镉铅锌等多金属复合污染尾矿土壤,分析了蒸馏水、不同浓度的草酸、柠檬酸、乙酸、硝酸和 EDTA 对重金属的提取能力,并在筛选的淋洗剂的基础上,从淋洗次数、土水比、淋洗时间等方面寻求最佳的技术和工艺参数,以期为该类型土壤的有效化学修复提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

供试土壤取自云南省个旧古山选矿厂尾砂库。用四分法采集土样后装入聚乙烯袋,带回实验室自然风干,敲碎后一部分过 20 目尼龙筛,用于淋洗试验和 pH 值及机械组成测定;另一部分用玛瑙研钵碾磨过 100 目尼龙筛用于重金属形态和全量分析。重金属含量测定采用  $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  消解<sup>[10]</sup>,过程中加入国家标准土壤样品(GSS-1 和 GSS-5)进行分析质量控制。重金属形态分析采用改进的三步提取法(BCR 法)<sup>[11]</sup>,分别得到重金属可交换及碳酸盐结合态(酸提取态),铁锰氧化物结合态(可还原态),有机物及硫化物结合态(可氧化态)以及残渣态。

1.2 供试试剂和主要分析仪器

淋洗剂包括:蒸馏水、草酸、柠檬酸、乙酸、硝酸、乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA- $\text{Na}_2$ ,以下简称 EDTA)。重金属全量和形态分析测定及淋洗剂中的所需硝酸、高氯酸、氢氟酸、乙酸纯度为优级纯,其他试剂为分析纯;水为二次纯化蒸馏水。

样品测试在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心进行,PHS-3B 型雷磁精密 pH 计测定 pH 值;微沸消煮-Mastersizer 2000 激光粒度分析仪超声分散测定土壤机械组成;Cd 浓度测定在 ICP-MS (ELAN-DRC-e) 上进行,ICP-OES (Optima 5300DV)测定 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量。

1.3 淋洗试验设计与方法

1.3.1 淋洗剂筛选

分别称取过 20 目筛的供试土壤 2.00 g 于 50 mL 的系列离心管中,分别加入 20 mL(液土比 10:1)的淋洗剂,每种淋洗剂设置高、中、低 3 个浓度梯度(见表 1),每个处理重复 3 次,并做空白对照。离心管盖好盖后统一放置于 25℃ 条件下恒温水浴振荡器中以  $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡 12 h,再以  $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的相对离心力,在高速冷冻离心机中离心

20 min,过滤得到上清液测定溶液的重金属浓度,筛选出重金属浸提效果最好的淋洗剂及其最佳浓度。

表 1 淋洗剂种类及浓度

| 淋洗剂  | 淋洗剂浓度/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ |     |     |
|------|---------------------------------------|-----|-----|
|      | 低                                     | 中   | 高   |
| 草酸   | 0.05                                  | 0.1 | 0.2 |
| 柠檬酸  | 0.05                                  | 0.1 | 0.2 |
| 乙酸   | 0.05                                  | 0.1 | 0.2 |
| 硝酸   | 0.2                                   | 0.5 | 1   |
| EDTA | 0.05                                  | 0.1 | 0.2 |

1.3.2 淋洗技术参数优化

(1)液土比筛选 称取过 20 目筛的土壤 2.00 g 置于一系列 50 mL 的离心管中,分别加入 12 mL 和 20 mL(液土比为 6:1 和 10:1)已筛选出的最适浓度的淋洗剂,其他步骤同 1.3.1 节。

(2)淋洗时间筛选 取过 20 目筛的土样 2.00 g 于 50 mL 塑料离心管,加入不同体积筛选好的淋洗剂,以  $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  在 25℃ 恒温水浴振荡器中振荡,分别在 3、6、12、24 h 停止振荡进行取样,过滤测上清液重金属浓度。

(3)淋洗次数筛选 设置淋洗次数为 1 次和 2 次。2 次淋洗即在完成 1 次淋洗试验后,再次加入相同淋洗剂,在同样技术参数液土比和淋洗时间试验条件下进行第二次淋洗。两次淋洗得到的提取液分别过滤得到上清液并测试重金属浓度,2 次淋洗去除效果用两次淋洗提取的重金属总量之和表示。

采取不同液土比、淋洗时间和淋洗次数等技术参数条件进行组合,共 14 个处理,每个处理重复 3 次,并设置空白对照。

2 结果与分析

2.1 土壤样品的基本理化性质和重金属含量及形态分析

供试土壤的 pH 值为 6.34,偏酸性。砂粒、粉粒和黏粒所占的质量分数分别为 5.0%、17.2% 和 77.8%。土壤中重金属全量结果见表 2。与采样点当地的土壤重金属含量背景值相比<sup>[12]</sup>,该土壤各金属元素的污染指数(实测浓度/背景值)大小依次为 Cd ( $527.3$ ) > Pb ( $117.3$ ) > Zn ( $18.5$ ) > Cu ( $16.2$ ) > Cr ( $3.4$ ) > Ni ( $1.7$ );依据国家土壤环境质量三级标准(GB 15618-1995),Cd 超标 50 多倍,其次是 Pb、Zn,分别高出 8 倍和 2 倍,Cu 略为超标。可见该土壤主要受 Cd、Pb 污染,其次为 Zn 和 Cu。

表 2 供试土壤的重金属全量与参照标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Contents of heavy metal in test soil and reference standard values/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 类别     | 重金属含量 |       |       |       |         |         |
|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
|        | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | Pb      | Zn      |
| 供试土壤   | 52.2  | 246.6 | 620.1 | 85.4  | 4 836.5 | 1 719.4 |
| 土壤背景值  | 0.099 | 72.4  | 38.38 | 50.68 | 41.24   | 92.82   |
| 国家三级标准 | 1.0   | 300   | 400   | 200   | 500     | 500     |

重金属对环境的危害除了与其总量有关外,更大程度上由其形态分布所决定,重金属的存在形态直接影响重金属的毒性、迁移和转化及在自然界的循环<sup>[13~15]</sup>. 一般情况下土壤中重金属的酸提取态和铁锰氧化态容易受外界 pH 值等条件的变化影响而重新释放进入土壤环境中,其可生物利用性较高;有机态在强氧化条件下才可能释放出来,也存在潜在的危害性;残渣态主要赋存于矿物晶格中,只有在风化过程才能释放,而风化过程是以地质年代计算的,相对于生物周期来说,残渣态性质十分稳定,对重金属的迁移和生物可利用性贡献不大,因此一般认为对环境是安全的<sup>[16~18]</sup>.

BCR 连续提取法分析得到的各重金属形态分布如图 1 所示. 从中可知,Cd 中酸可提取态所占的比例最大,为 40%,其次是可还原态和残渣态,表明 Cd 的生物可利用性高,容易发生迁移或被生物体吸收,造成直接毒害. 其他元素的酸提取态含量都较小,Cu 和 Ni 均不足 1%. 70% 的 Pb 以可还原态的状态存在,表征很强的潜在危害性,其次是占总量 24.6% 的残渣态. 在通常条件下,土壤中重金属形态分布的特征是:交换态所占比例甚低,残渣态所占比例较高;但是在污染的土壤中残渣态重金属含量较低,这是因为外源重金属易于转化为具有活性的形态<sup>[19,20]</sup>,受到严重 Cd 和 Pb 污染的供试土壤具有较低比重的残渣态含量也可说明这一点. Cr、Zn 和 Cu 主要以活性较弱的残渣态存在,在 Cr 中残渣态含量高达 94.7%,在 Zn 和 Cu 中分别为 70% 和 54.3%. 可还原态和酸提取态分别占 Zn 总量的 16.5% 和 7.6%,Cu 中可还原态和可氧化态的比例分别为 30.2% 和 8.7%. Ni 主要以可氧化态和残渣态存在,二者的含量相当,均为 40% 左右,其次是可还原态,占 Ni 总量的 13.8%.

2.2 不同淋洗剂的不同浓度对重金属的去除效果

图 2 反映蒸馏水和其他 5 种淋洗剂在不同浓度下对重金属的提取能力. 从中可以看出,蒸馏水对各种重金属几乎没有去除提取效果,对 Cd 的去除率最高,也仅为 0.07%;其他淋洗剂对重金属的去

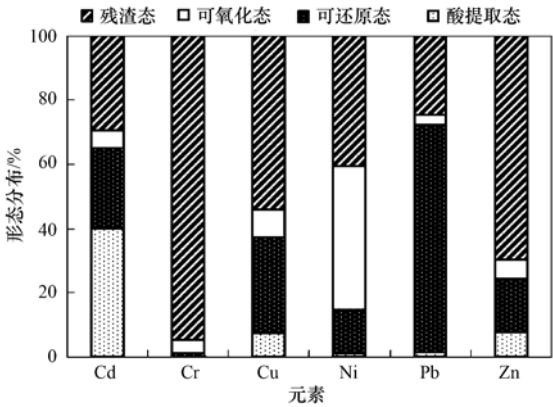


图 1 供试土壤重金属各种形态分布示意

Fig. 1 Speciation distribution of heavy metals in test soil

除效果随着淋洗液浓度的加大而增强. 淋洗剂对不同金属去除效果有明显差异,对 Cd 和 Pb 有较高的脱除效果,脱除率最高可达 60% 左右,其次是 Cu 和 Zn,高浓度淋洗条件下最高可脱除约 30% 的 Cu 和 17% 的 Zn,而对 Ni 和 Cr 去除率甚低,这可能由 Cd 和 Pb 分别主要以活性较高的酸可提取态和可还原态存在,而 Ni 和 Cr 主要以残渣态存在造成.

草酸、柠檬酸和乙酸属于低分子有机酸,同时也是一种天然螯合剂,它们既可以通过降低土壤 pH 值来提取酸提取态重金属,又能够通过螯合作用提取一定量的其他形态重金属<sup>[21]</sup>. Wasay 等<sup>[22]</sup>研究了不同种类有机酸对不同质地土壤中重金属的去除率. 柠檬酸、酒石酸、草酸 + 柠檬酸对黏质土壤 Cr、Mn、Hg 和 Pb 的去除率分别为 43% ~ 45%、37% ~ 41%、91% ~ 92% 和 75%;对壤质土壤柠檬酸可以去除 98% 的 Cd 和 89% 的 Pb,酒石酸可以去除 91% 的 Cd 和 87% 的 Pb;对于砂质土壤柠檬酸和酒石酸对重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 的去除率分别为 84% ~ 91%、73% ~ 84%、56% ~ 70%、72% ~ 81%. 李玉双等<sup>[23]</sup>的试验也发现 80  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的柠檬酸对 Cd、Cu、Pb 的去除率分别能够达到 90.4%、82.5% 和 38.6%. 本研究中,高浓度处理的草酸虽然能去除最多的 Cr、Cu 和 Zn,但脱除率都不高,而对活性最强的 Cd 和 Pb 并未表现很好的去除效果,这也进一

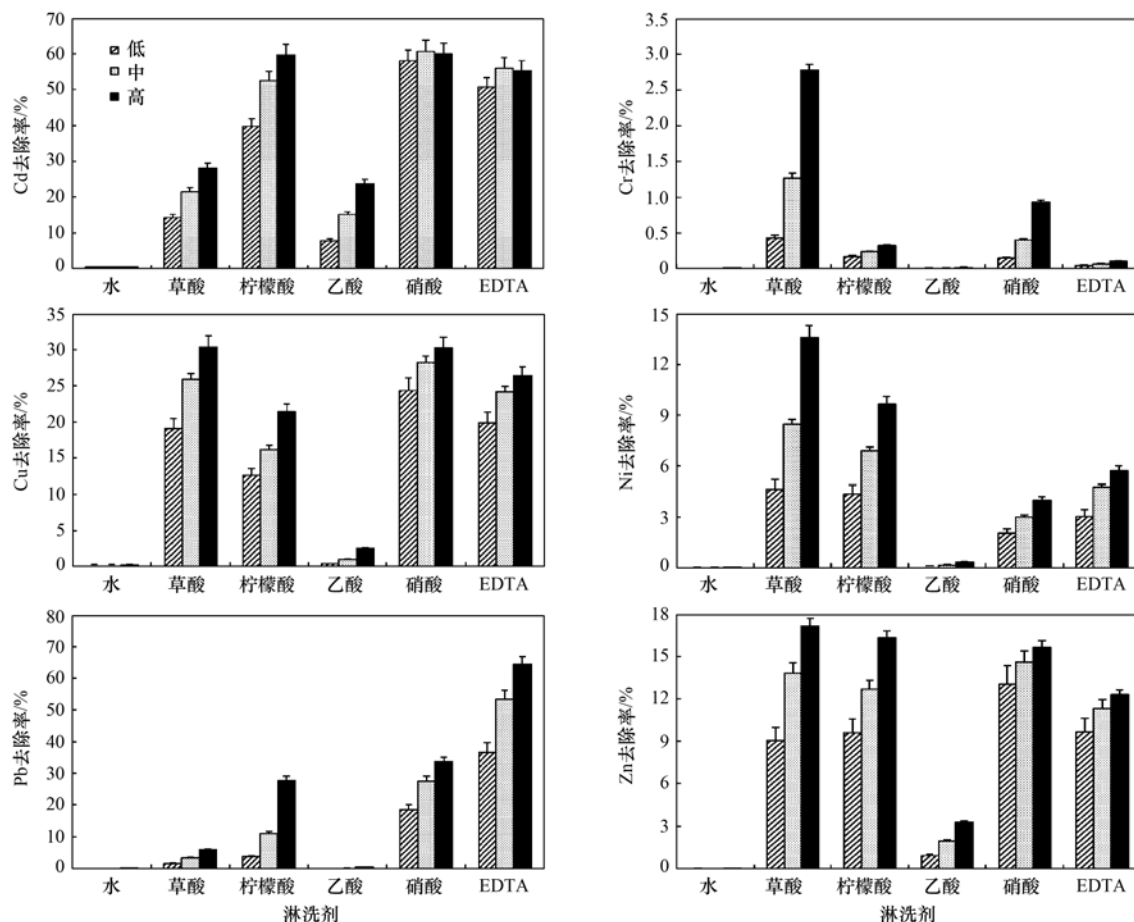


图2 淋洗剂对重金属的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency for the heavy metals by different eluents in a series of concentrations

步表明了淋洗剂的有效性受土壤理化性质和重金属含量及形态分布影响. 同时由图2可得,乙酸对重金属的提取能力都不强,这是由于乙酸属于一元弱酸,化学结构较为简单.

高浓度处理的柠檬酸、硝酸和EDTA对Cd和Zn的去除能力相当,最高可洗脱约60%的Cd,对Zn的去除率在13%~17%之间,对Cu的提取量硝酸略高于EDTA和柠檬酸,而对Pb的去除效果,EDTA明显好于硝酸和柠檬酸. 使用高浓度的EDTA可去除65%的Pb,远高于柠檬酸和硝酸28%和33%的去除率. 说明仅仅靠提高土壤溶液的酸度不能达到降低土壤中Pb浓度的目的. 从图2又可以看到,使用高浓度的EDTA比中浓度并未能明显提高对Cd和Zn的去除率. 考虑到本研究土壤主要污染元素为Cd和Pb,并结合成本因素,确定中浓度( $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的EDTA是较为理想的淋洗剂,并进行深入技术参数优化研究.

### 2.3 EDTA提取重金属的技术参数优化

图3反映不同液土比、淋洗时间和淋洗次数组

合条件下EDTA对重金属Cd、Cu、Pb和Zn的提取能力. 可以看到,从3~24 h,Cu、Pb和Zn的去除率随着淋洗时间延长逐渐增加,其中Pb的去除率在1:6和1:10土液比条件下分别增加14.9%和38.5%,而Cd的去除率趋于平稳,甚至有减小的趋势. 表明在试验初期,活性较高的酸提取态重金属被迅速释放出来并淋洗,而后进行可还原态金属的脱离,并趋缓.

在土壤淋洗工艺中,淋洗剂的加入量(即液土比)是一个重要的试验参数. 一般认为,较高的液土比更有利促进土壤淋洗中重金属的释放<sup>[21,24]</sup>,但过高的液土比则带来成本负担. 由图3可得,1:10土液比对重金属的提取量高于同条件下1:6土液比的量,淋洗时间越长,差距越显著,1:10土液比淋洗24 h时对Pb的去除率较1:6土液比同条件下提高26.6%.

用化学淋洗剂进行土壤重金属淋洗试验时,淋洗次数反映了土水比的变化. Makino等<sup>[25]</sup>研究了土水比和淋洗次数对水稻土中Cd的去除率的影

响,发现较高的土水比(1:1.5),虽然单次去除效果不如较低的土水比(1:10),但淋洗次数的增加可以增加总去除量,同时还减少了反应时间和淋洗废液产生量,提高修复效率,达到修复目的. 由图 3 所

示,二次淋洗所有重金属的累积去除量均明显高于同条件下一次淋洗的量,且在 3 h 和 6 h 时二次淋洗的累积脱除率分别大于 6 h 和 12 h 一次淋洗的脱除率.

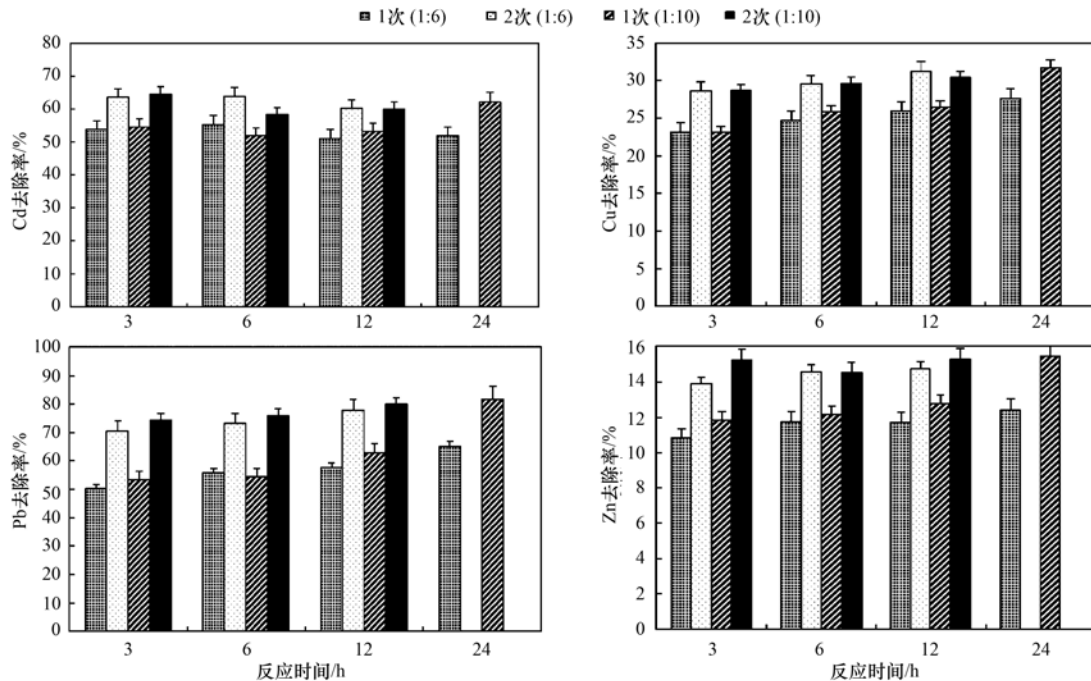


图 3 不同淋洗参数条件下 EDTA 对重金属去除效率

Fig. 3 Removal efficiency for the heavy metals under different EDTA washing condition

在土壤或沉积物中重金属污染的评价方法中, Hakanson 潜在生态风险指数法是应用较为广泛的一种方法,该方法首先测得土壤中重金属的含量,通过与土壤中重金属元素背景值的比值得到单项污染系数,然后引入重金属毒性响应系数,得到潜在生态危害单项系数,最后加权得到土壤中重金属的潜在生态危害指数<sup>[26]</sup>. 结合供试土壤的潜在生态危害单项指数和淋洗剂对重金属的去除效率,本研究提出淋洗剂对污染土壤的综合毒性消减指数  $L$ , 其计算公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n B_r^i \times E_r^i = \sum_{i=1}^n B_r^i \times T_r^i \times C_r^i$$

$$= \sum_{i=1}^n B_r^i \times T_r^i \times (C_s^i / C_n^i)$$

式中,  $B_r^i$  为淋洗剂对某金属元素的去除率,  $C_s^i$  和  $C_n^i$  为该元素的原始实测浓度和评价标准,  $T_r^i$  为潜在生态风险指数法中重金属元素的毒性系数.

Hakanson 潜在生态风险指数法的主要特点是将重金属的环境效应、生态效应和毒理学联系起来综合考虑,定量地划分出重金属潜在危害的程

度<sup>[27,28]</sup>. 但这种方法的毒性加权具有主观性,因为在不同研究的评价中,选取作为研究对象的重金属元素往往不尽相同,而该方法采取统一的综合潜在生态危害系数的评价标准,显然这是其不足之处. 结合单项元素的潜在生态危害指数和去除率而制定的综合毒性消减指数评价方法,可任意选取污染土壤中的某些目标金属元素,针对这些元素的潜在毒性的去除程度进行量化和加权统计,从毒理学角度来综合评价淋洗剂对污染土壤的修复效果,该方法具有合理性和实用意义.

选用土壤重金属含量背景值作为评级标准,可计算出利用 EDTA 在不同淋洗条件下得到的综合毒性消减指数,如图 4. 可以看到,在 1:10 土水比 2 次淋洗 3 h 后,得到最大的综合毒性消减指数值. 这是由于供试土壤的主要污染元素为 Cd,而 EDTA 对该土壤中 Cd 能在短时间内带来较高去除率,此外, Cd 的毒性系数远高于其他元素. 在 1:6 土水比 2 次淋洗 3 h 条件下的综合毒性消减指数值接近于最大值,加以考虑经济成本,建议采用的淋洗条件为:1:6 的土水比淋洗时间为 3 h 下淋洗 2 次.

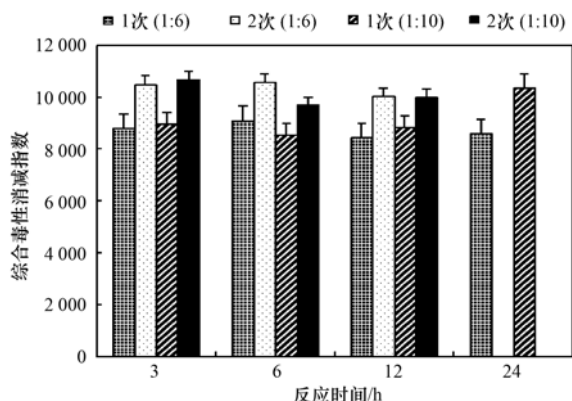


图4 不同 EDTA 淋洗条件下的综合毒性消减指数

Fig. 4 Total toxicity reduction index under different EDTA washing condition

### 3 结论

(1)相对于国家土壤环境三级标准,该研究土壤中 Cd、Pb、Zn 和 Cu 元素超标,全量分别为 52.2、4 836.5、1 719.4 和 620.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,并分别主要以酸提取态、可还原态、残渣态的形态存在,因此 Cd 和 Pb 为主要修复目标元素。

(2)通过比较蒸馏水和草酸、柠檬酸、乙酸、硝酸、EDTA 在不同浓度下对污染土壤的去除效果,淋洗剂对于不同重金属元素的提取量差异很大,高浓度的淋洗剂最多能去除约 60% Cd 与 Pb、30% 的 Cu 和 17% 的 Zn,而对 Ni 和 Cr 去除效果不明显;蒸馏水对重金属几乎没有淋洗效果,草酸和乙酸对重金属的淋洗率也较低,对各重金属元素的淋洗效果综合分析,明确  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 EDTA 是较为理想的化学淋洗剂。

(3)提高液土比、淋洗时间和淋洗次数能一定程度促进 EDTA 对重金属的脱除。提出采用能反映最大量减小污染土壤生物毒性的综合毒性消减指数来评价淋洗剂的修复效果以及其计算方法,结合经济成本考虑,建议采用的淋洗条件为 1:6 土水比 3 h 淋洗 2 次。

#### 参考文献:

[1] 万勇平,陈海霞,龙岳林. 矿区废弃地污染综合治理研究进展[J]. 现代农业科技, 2012, (17): 226-227.

[2] 刘立艳. 矿山废弃地生态修复技术研究[J]. 煤炭工程, 2012, (22): 146-148.

[3] 颜世强,姚华军,胡小平. 我国矿业破坏土地复垦问题及对策[J]. 中国矿业, 2008, 17(3): 35-37.

[4] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2001, 21(2-3): 558-565.

[5] Abumaizar R J, Smith E H. Heavy metal contaminants removal by soil washing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 70

(1-2): 71-86.

[6] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, *et al.* Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and ? eld applications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152 (1): 1-31.

[7] 金一凡,周连杰,杰克,等. 污染土壤修复技术的探讨[J]. 环境科技, 2012, 25(5): 68-72.

[8] 可欣,李培军,巩宗强,等. 重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 145-149.

[9] 何岱,周婷,袁世斌,等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展[J]. 四川环境, 2010, 29(5): 103-109.

[10] 彭渤,唐晓燕,余昌训,等. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪[J]. 地质学报, 2011, 85 (2): 282-299.

[11] 高彦鑫,冯金国,唐磊,等. 密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1707-1716.

[12] 马攀华. 云南省土壤污染聚类及背景值相关分析系统的设计与实现[D]. 昆明: 云南大学, 2012. 33-34.

[13] Adamo P, Dudka S, Wilson M J, *et al.* Chemical and mineralogical forms of Cu and Ni in contaminated soils from the Sudbury mining and smelting region, Canada[J]. Environmental Pollution, 1996, 91(1): 11-19.

[14] Cancès B, Ponthieu M, Castrec-Rouelle M, *et al.* Metal ions speciation in a soil and its solution: experimental data and model results[J]. Geoderma, 2003, 113(3-4): 341-355.

[15] 韩春梅,王林山,巩宗强,等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.

[16] 钟晓兰,周生路,黄明丽,等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.

[17] 黄思宇,彭晓春,吴彦瑜,等. 土壤中重金属形态分析研究进展[J]. 广东化工, 2012, 39(2): 86-88.

[18] 关天霞,何红波,张旭东,等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 503-512.

[19] 林文杰,肖唐付,周晚春,等. 黔西土法炼锌区 Pb、Zn、Cd 地球化学迁移特征[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 2065-2070.

[20] Schramel O, Michalke B, Kettrup A. Study of the copper distribution in contaminated soils of hop fields by single and sequential extraction procedures [J]. Science of the Total Environment, 2000, 263(1-3): 11-22.

[21] 甘文君,何跃,张孝飞,等. 电镀厂污染土壤重金属形态及淋洗去除效果[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 82-87.

[22] Wasay S A, Barrington S, Tokunaga S. Organic acids for the in situ remediation of soils polluted by heavy metals: soil flushing in columns[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, 127(1-4): 301-314.

[23] 李玉双,胡晓钧,宋雪英,等. 柠檬酸对重金属复合污染土壤的淋洗修复效果与机理[J]. 沈阳大学学报(自然科学

- 版), 2012, **24**(2): 6-9.
- [24] 陈晓婷, 王欣, 陈新. 几种螯合剂对污染土壤的重金属提取效率的研究[J]. 江苏环境科技, 2005, **18**(2): 9-11.
- [25] Makino T, Sugahara K, Sakurai Y, *et al.* Remediation of cadmium contamination in paddy soils by washing with chemicals: Selection of washing chemicals [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(1): 2-10.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 889-896.
- [28] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(17): 310-315.

---

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2012年12月7日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续11次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

## 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 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 <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, HUANG 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 <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-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 <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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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