

微波强化 EDDS 淋洗修复重金属污染土壤研究

薛腊梅¹, 刘志超¹, 尹颖¹, 孙媛媛², 郭红岩^{1*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210023; 2. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学水科学系, 南京 210093)

摘要: 为了快速去除土壤中的重金属污染, 采用微波强化[S,S]-乙二胺二琥珀酸([S,S]-EDDS, 简称为 EDDS)淋洗方法, 做了微波时间、功率对 Cd、Pb、Zn 去除效率影响的实验, 并用 BCR 连续提取法分析了微波强化 EDDS 淋洗对土壤中重金属形态的影响。结果表明, 在微波功率 900 W, 时间 10 min 条件下, EDDS 对 Cd、Pb、Zn 的去除率分别达到 29%、89%、71%, 比未引入微波时淋洗的各重金属的最高去除率分别提高 8%、26%、33%, 且明显缩短了处理时间(从 6 h 缩短为 10 min)。与处理前原土壤相比, 土壤在微波辐射淋洗处理后, 主要污染重金属的交换态和碳酸盐结合态以及铁锰氧化物结合态明显降低(其中 Cd 降低 34%、Pb 降低 90%、Zn 降低 83%), 残渣态增加, 从而有效降低了土壤中毒害污染重金属元素含量和重金属可利用性, 减轻了污染土壤的生态风险。微波辅助淋洗修复可作为一种重金属污染场地的快速修复技术。

关键词: 重金属污染; 土壤淋洗; 微波强化; EDDS

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)08-1552-06 doi:10.11654/jaes.2013.08.009

Microwave-enhanced Remediation of Cd, Pb and Zn Contaminated Soil Using EDDS as a Leaching Agent

XUE La-mei¹, LIU Zhi-chao¹, YIN Ying¹, SUN Yuan-yuan², GUO Hong-yan^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Hydrosiences Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: With the rapid industrialization and urbanization in the world, soil pollution is intensifying, especially heavy metal contamination. A new approach using microwave coupled to EDDS as a leaching agent for removal of Cd, Pb, and Zn from field soils was examined in the laboratory. Effects of time and power of microwave on removal efficiency and fractionation of heavy metals were investigated. The results showed that under microwave condition (900 W, 10 min), the removal efficiencies of Cd, Pb, and Zn were 29%, 89%, and 71%, respectively, increased by 8%, 26%, and 33%, respectively, compared with those without microwave treatment. In addition, the processing time was greatly reduced from 6 h to 10 min. Sequential extraction results showed that the exchangeable, carbonate bound and Fe-Mn oxide bound fractions of metal concentrations were obviously reduced after treatment, by 34%, 90%, and 83% for Cd, Pb, and Zn, respectively, whereas the residual fraction was increased, which reduces ecological risks of heavy metals. Microwave-assisted leaching can be a promising remediation method for heavy metal contaminated sites.

Keywords: Cd; Pb; Zn; leaching; microwave-enhanced; EDDS

随着世界工业化和城市化进程整体快速推进, 环境污染日益加剧, 土壤的重金属污染甚为严重, 已成为全球面临的一个严重环境问题^[1]。我国环境保护部统计, 每年因重金属污染的粮食达 1200 万 t, 造成的

直接经济损失超过 200 亿元。土壤重金属污染不仅降低农产品的质量和产量, 还通过食物链在人体内富集, 危及人类的健康和生命, 重金属污染土壤的修复一直是国内外研究的热点^[2-3]。

土壤重金属污染修复技术很多, 但各种方法都有其适用范围与局限^[4], 如植物、微生物、动物修复仅限低浓度重金属污染且周期长, 电动/热修复法彻底但破坏土壤结构且成本高。化学淋洗修复技术则可快速将污染物从土壤中移除, 短时间内完成高浓度污染土

收稿日期: 2013-01-23

基金项目: 江苏省六大人才高峰项目资助(2012-JNHB-011)

作者简介: 薛腊梅(1987—), 女, 山东泰安人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤环境化学。E-mail: xuelamei16@gmail.com

* 通信作者: 郭红岩 E-mail: hyguo@nju.edu.cn

壤的治理^[5]。乙二胺四乙酸(Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)是化学淋洗修复土壤中重金属技术中最常用的试剂,对金属离子有很高的螯合能力,但由于EDTA的持久性和难生物降解性,增加了重金属向下和四周迁移的可能性,残留的EDTA可能导致地下水和周围环境的二次污染^[6-8],[S,S]-乙二胺二琥珀酸([S,S]-Ethylenediamine disuccinic acid, 简称EDDS)是容易被生物降解的一种强金属螯合剂,近年来受到广泛关注^[9-11]。

研究表明,与传统方法相比,微波技术以其非传导性损失的特点使其具有均一性、选择性强、反应速率快、溶剂消耗少的优势^[12],并可与其他处理技术结合^[12-14]。近年来,微波作为一种常用的辅助能量,已经被引入地质学和环境学样品中重金属形态的分析^[15-17],简化提取步骤,且微波辅助提取实验效果优于传统循序提取。Kuo等^[13]研究对比了传统与微波作用下不同酸去除工业污泥中铜的效率,发现在一定功率、作用时间下,微波可以提高酸对污泥中铜的去除率。Xue等^[14]通过研究提出微波辐射可加速市政固体废物焚烧灰烬中有毒重金属Zn、Pb、Cu、Cr的溶解,缩短处理时间,提高重金属去除效率。而在微波条件下,淋洗法去除污染土壤中重金属的研究未见报道。本实验利用微波技术强化EDDS淋洗去除原位重金属污染场地土壤中Cd、Pb、Zn,研究了不同微波功率、微波时间对淋洗效果的影响,并对微波淋洗前后土壤重金属形态进行分析,试图缩短淋洗时间,提高淋洗效率,探讨微波强化淋洗修复重金属污染土壤的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

实验土壤样取自江苏省南京市某污染企业场地土壤。土样风干后磨碎,过10目筛,在干燥器中于阴暗处保存。四分法取部分土样研磨后,过80目筛,供重金属全量分析用。实验土壤砂粒(2~0.02 mm)占47.8%,粉砂粒(0.02~0.002 mm)占38.4%,粘粒(<0.002 mm)占13.8%,土壤质地为壤土,容重 $1.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH7.9。土壤中重金属含量分析见表1。土壤中Cd、Pb、Zn含量均超过土壤三级质量标准,其中Cd、Zn严重超标。

1.2 实验方法

1.2.1 EDDS淋洗时间实验

称取1.1中过10目筛的土样0.5 g置于一系列50 mL聚乙烯塑料瓶中,水土比30:1,其中淋洗剂EDDS与重金属(Cd、Pb、Zn)总摩尔比为2:1(水土比、淋洗剂摩尔比均通过预实验确定),在25℃、 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下摇床振荡一定时间(0.2、0.5、1、3、4、6 h)。

1.2.2 微波时间对土壤中重金属淋洗的影响

称取1.1中过10目筛的土样0.5 g置于一系列50 mL聚乙烯塑料瓶中,水土比30:1,其中淋洗剂EDDS与重金属(Cd、Pb、Zn)总摩尔比为2:1,在微波功率500 W条件下辐射处理一定时间(3、5、10、15 min)。

1.2.3 微波功率对土壤中重金属淋洗的影响

称取1.1中过10目筛的土样0.5 g置于一系列50 mL聚乙烯塑料瓶中,在一定微波功率条件下(100、300、500、700、900 W)辐射处理10 min。

上述样品处理后, $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心15 min,取上清液经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤,于4℃冰箱保存。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS仪,型号Elan 9000,美国PerkinElmer公司)测定溶液中重金属浓度,计算土壤中重金属淋洗去除率。

1.2.4 土壤重金属形态分析

取原土及微波功率900 W、微波时间10 min处理后的样品,采用连续提取形态分析法(BCR)^[18],将重金属形态分为交换态和碳酸盐结合态(B1)、铁锰氧化物结合态(B2)、有机物结合态(B3)、残渣态(B4)。在每一态提取后,向残渣中添加20 mL去离子水,室温下振荡15 min进行清洗, $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心20 min。倒掉上清液。重金属浓度用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS仪,型号Elan 9000,美国PerkinElmer公司)测定。土壤中重金属形态分析具体操作步骤如下:

第一态(B1):取0.5 g土,置于50 mL聚乙烯离心管中,加入20 mL $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HAc,室温下振荡16 h, $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心20 min,取上清液15 mL,加入0.2 mL浓硝酸,测定。

第二态(B2):于上一级固相中加入20 mL 0.1

表1 供试土壤的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Heavy metal concentration of the test soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
钢铁厂附近土壤样品	15	34	68	15	29	701	16 700
土壤三级质量标准	40	1	300	400	200	500	500

$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, 室温下振荡 16 h, $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 20 min, 取上清液, 滤液中加入 0.2 mL 浓硝酸, 测定。

第三态(B3): 于上一级固相中加入 5 mL 30% H_2O_2 , 置于 25 °C 水浴中 1 h, 再置于 85 °C 水浴中 1 h, 加入 5 mL 30% H_2O_2 置于 85 °C 水浴中 1 h 至近干, 然后向残留物中加入 25 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Ac}$ (用 HNO_3 调节 pH 至 2.0), 室温下振荡 16 h, $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 20 min, 取上清液, 滤液中加入 0.2 mL 浓硝酸, 测定。

残渣态(B4): 高氯酸-王水消解, 往上级土样中加入 10 mL 混合酸(7 mL 硝酸+3 mL 盐酸)和高氯酸于 85 °C 水浴中加热 4~6 h, 直至土样变灰白, 转移, 用中速定量滤纸过滤至 25 mL 容量瓶中, 定容测定。

1.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据分析, 差异显著性检验, $P < 0.05$ 表示显著差异, $P < 0.01$ 表示极显著差异。

2 结果与讨论

2.1 EDDS 淋洗时间动力学

图 1 为 EDDS 对土样中 Cd、Pb、Zn 的淋洗动力学研究结果。在实验条件下, 3 种重金属的淋洗去除率均在较短时间内迅速上升, 然后趋于平缓。分析发现, 淋洗 6 h 后重金属去除率基本无大波动, 即在供试土壤及实验条件下, EDDS 与土样中的重金属 Cd、Pb、Zn 反应 6 h 基本达到平衡。此时, EDDS 对 Cd、Pb、Zn 的淋洗去除率分别达到 21%、63%、38%。Tandy 等^[9]利用可降解螯合剂淋洗污染土壤中的重金属达到最大提取率的最佳时间是 24 h, 最佳提取时间不同可能与被测土壤的特性有关。Hauser 等^[19]采用

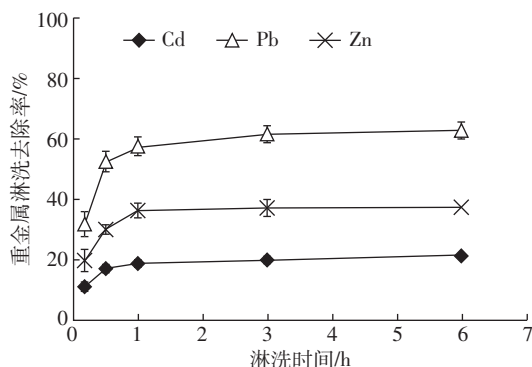


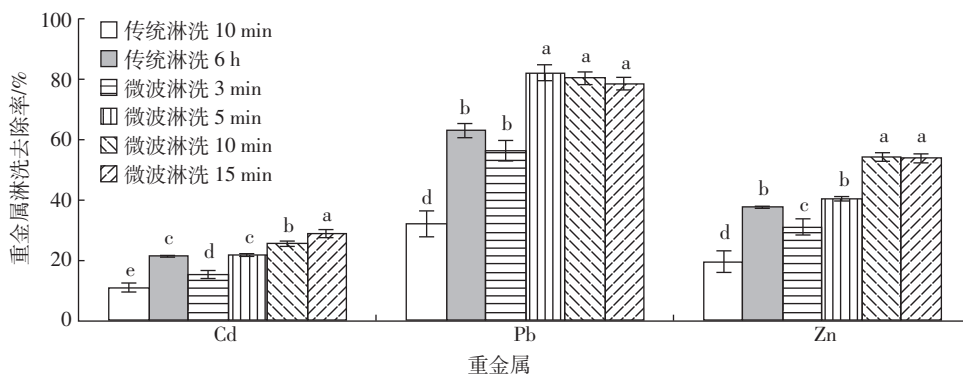
图 1 时间对 EDDS 淋洗去除土壤中重金属(Cd、Pb、Zn)的影响

Figure 1 Influence of time on EDDS extraction efficiency of Cd, Pb, and Zn

EDDS 对 3 种污染土壤进行分批提取, 其提取率 Pb 为 25%~52%, Zn 为 6%~50%。有研究^[20]利用 EDDS 提取城市污泥中 Cd、Pb 和 Zn, 提取率分别为: 18%~24%、24%~44% 和 41%~42%。本研究结果与上述研究结果基本处于相似的范围, 土壤中重金属未能完全去除的原因与真实土壤中重金属的赋存形态有关。

2.2 微波辐射时间对重金属淋洗去除率的影响

微波时间对土壤中重金属淋出的影响见图 2。土样在微波辐射 3 min 后, 各金属淋洗去除率显著增加, 随着微波辐射时间延长, 土样中各重金属的淋洗去除率总体呈上升趋势, 其中, Cd 的去除率随辐射时间的延长持续升高, Zn 的去除率 10 min 后趋缓, Pb 的去除率在微波 5 min 后几乎不随辐射时间变化。微波辐射 10 min 淋洗条件下 Cd、Pb、Zn 的去除率比不引入微波淋洗 10 min 去除率分别高出 15%、48%、35%, 比传统条件下最高去除率(淋洗 6 h)分别高出 4%、17%、16%。室温下的传统淋洗是一个表面受限的反



不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图 2 微波辐射时间对重金属(Cd、Pb、Zn)淋洗去除率的影响

Figure 2 Influence of microwave radiation time on EDDS extraction efficiency of Cd, Pb, and Zn

应过程^[21],通常分为两个步骤,首先是重金属的溶出,然后是随处理时间增加,重金属与淋洗剂的反应。在微波辐射条件下,能量通过与电磁场的分子间作用直接到达物料内部^[14]。微波作用下,溶液迅速加热到沸点,沸腾的液体渗入土壤,将土壤团聚体破坏,从而促进了土壤中重金属的浸出,这一过程与已有的微波提取机制相似^[12-13,22]。此外,不同的液体和固体的介电性能可能会导致局部温度差异,在颗粒的表面造成强对流电流,而这反过来又会加速溶解反应动力学。由于不同重金属与淋洗剂EDDS的络合稳定常数也有差别(Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 与EDDS络合稳定常数分别为10.8、12.7、13.5),而土样中不同重金属与土壤的结合力不同^[23]以及土壤性质的影响,多种因素共同作用下,导致微波辅助淋洗条件下,每种重金属的提取有其各自的动力学特征,重金属的淋洗效率高低并不完全符合其与EDDS的络合稳定常数大小顺序。

2.3 微波功率对重金属淋洗去除率的影响

不同微波功率条件下,淋洗剂EDDS对土样中Cd、Pb、Zn的去除率见图3。与传统淋洗10 min的结果相比,随着微波功率的增加,Cd、Pb、Zn的淋洗去除率总体上呈上升趋势,微波辐射10 min淋洗条件下Cd、Pb、Zn的去除率,比传统淋洗10 min去除率分别高出18%、57%、52%,比传统条件下最高去除率(淋洗6 h)分别高出8%、26%、33%。Kuo等^[13]的研究中,淋洗剂 HNO_3 及 H_2SO_4 对工业污泥中重金属的去除率随微波功率的增加而增大,但在Xue等^[14]的研究中,固废燃烧废渣中重金属的去除效率随微波功率的提高而降低,其原因可能是固废燃烧废渣虽然在微波作用下被破坏成小颗粒从而有利于重金属溶出,但淋洗剂HCl在微波辐射产生的高温条件下不能有效解离,限制了两者的反应,影响了重金属去除效率。而淋

洗剂 HNO_3 和 H_2SO_4 以及本研究中的EDDS(二钠盐)解离没有HCl易受温度的影响,微波功率的增加,微波辐射能量增大,加速了原位污染土壤中重金属的溶解进而与淋洗剂反应达到平衡,在短时间内达到高重金属淋洗去除率。

2.4 淋洗前后重金属形态的变化

真实环境中决定重金属环境风险大小的是其有效态含量而不是重金属总量^[24],前文研究已发现在最优的淋洗条件下,受试土壤中重金属的去除率最高尽管可达80%,仍不能完全去除,其原因与重金属的赋存形态密切相关。为此,我们将污染土壤及在微波功率900 W、时间10 min微波辐射淋洗处理后的土壤用BCR方法进行连续提取分析,比较研究了微波辅助淋洗前后土壤中重金属形态的变化。

微波处理前后土壤中重金属元素形态分析结果见图4。淋洗过程影响土壤中重金属形态分布,微波淋洗处理后,重金属交换态和碳酸盐结合态(B1)以及铁锰氧化物结合态(B2)的含量均有显著($P<0.01$)降低,说明洗脱的重金属主要来自这两种形态,与Tandy等^[9]的研究结果EDDS对重金属的提取部分主要是可交换态、可氧化态等一致。从土壤中重金属元素的形态分布研究表明,Cd主要分布在残渣态,因而与实验淋洗处理中EDDS对Cd的提取率较低一致。从图4还可以得出,微波处理后,土壤中重污染金属Cd、Zn以及Pb的残渣态均有显著($P<0.01$)增加,金属的迁移性和生物有效性大大降低,形态更为稳定,对环境的潜在影响降低。Gan^[25]的研究也发现微波辐射具有显著的固定沉积固体中重金属的能力,其原因可能是电磁波促进了沉积物中残余的自由金属离子与偶极聚合分子间强相互作用、结合,离子得以固定,但具体机制仍有待于进一步研究。

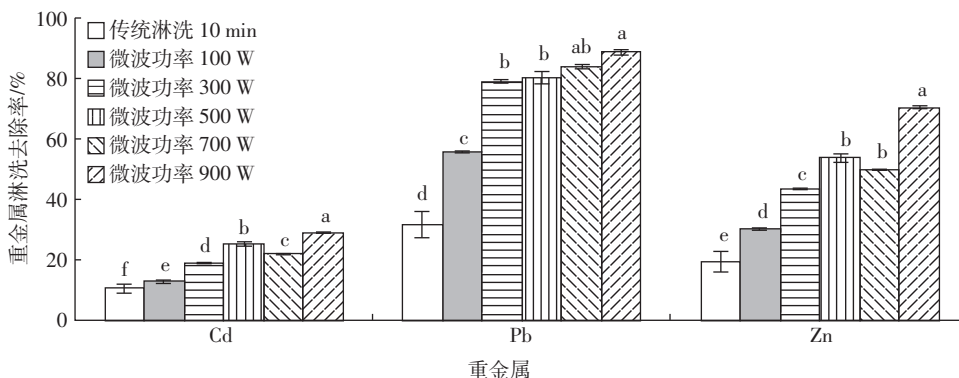
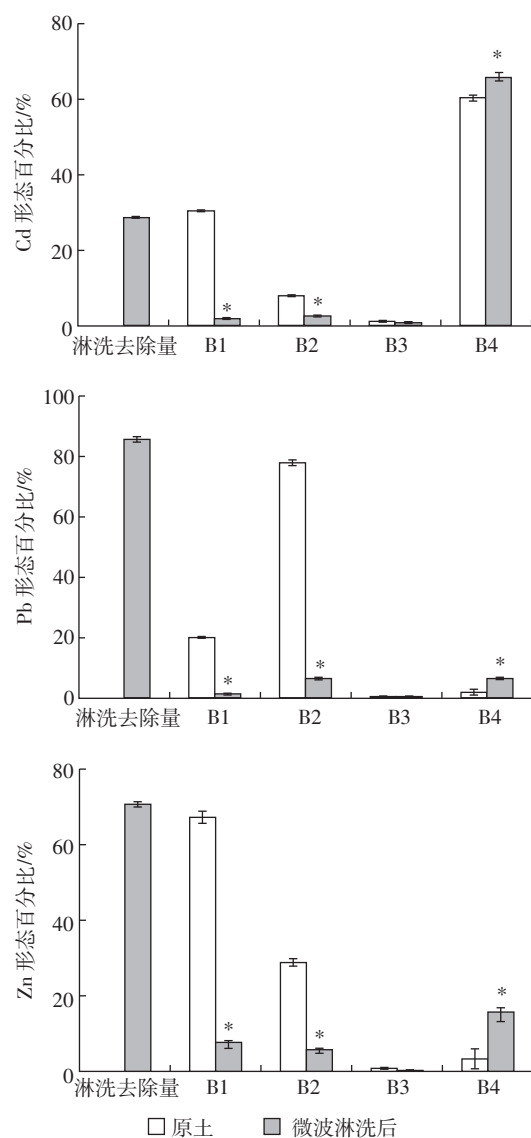


图3 微波功率对重金属(Cd、Pb、Zn)淋洗去除率的影响

Figure 3 Influence of microwave power on EDDS extraction efficiency of Cd, Pb, and Zn



* 表示土壤重金属形态百分比在微波处理前后差异显著 ($P < 0.05$)

图4 淋洗处理前后土壤中重金属形态分析

Figure 4 Proportions of heavy metals in different fractions extracted by BCR sequential extraction procedure

3 结论

本实验通过对重金属污染场地土壤利用微波技术强化EDDS淋洗修复的研究发现,微波对EDDS淋洗过程有强化作用,促进了重金属的溶出及其与淋洗剂EDDS的反应,缩短了淋洗时间,在微波功率900 W,时间10 min条件下,EDDS对Cd、Pb、Zn的去除率分别达到29%、89%、71%,比未引入微波时淋洗的各重金属的6 h最高去除率分别提高8%、26%、33%。通过对淋洗前后的土样进行形态分析发现,主要污染重金属Cd、Pb、Zn的可交换态在微波处理后显著降低,残渣态增加,生物有效性和环境风险降低。基于微波

辅助淋洗修复的高效性及对重金属形态的稳定化作用,作为一种重金属污染场地的快速修复技术,具有较好的发展前景。

参考文献:

- [1] 崔斌,王凌,张国印,等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 40(1): 373-375, 447.
CUI Bin, WANG Ling, ZHANG Guo-yin, et al. Status and harm of heavy metal pollution in remediation technology[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 40(1): 373-375, 447.
- [2] 邢志华,任灵芝. 土壤重金属污染及其评价[J]. 仪器仪表与分析监测, 2010(2): 31-33.
XING Zhi-hua, REN Ling-zhi. Evaluation about soil heavy metal pollution[J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 2010(2): 31-33.
- [3] 刘磊,胡少平,陈英旭,等. 淋洗法修复化工厂遗留地重金属污染土壤的可行性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1537-1541.
LIU Lei, HU Shao-ping, CHEN Ying-xu, et al. Feasibility of washing as a remediation technology for the heavy metals-polluted soils left by chemical plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1537-1541.
- [4] 凌辉,谢海波,唐振平,等. 重金属污染土壤的修复方法及其在几类典型土壤修复中的应用[J]. 四川环境, 2012, 31(1): 118-122.
LING Hui, XIE Shui-bo, TANG Zhen-ping, et al. Remediation of heavy metal polluted soil and application for typical soils[J]. *Sichuan Environment*, 2012, 31(1): 118-122.
- [5] 卫泽斌,郭晓方,吴启堂. 化学淋洗和深层土壤固定联合技术修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 407-408.
WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang. Remediation of heavy metals contaminated soils by combined technology of chemical washing and fixation in deep soil layer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 407-408.
- [6] 孙健,铁柏清,秦普丰,等. EDTA调控下灯心草和龙须草对铅锌尾矿污染土壤的修复潜力[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 105-110.
SUN Jian, TIE Bo-qing, QIN Pu-feng, et al. The potential of *Juncus effuses* and *Eulaliopsis binata* for phytoremediation of lead/zinc mine tailings contaminated soil under the adjustment of EDTA[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 105-110.
- [7] Luo C L, Shen Z G, Li X D. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(1): 1-11.
- [8] Meers E, Ruttens A, Hopgood M J, et al. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(8): 1011-1022.
- [9] Tandy S, Bossart K, Mueller R, et al. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 937-944.
- [10] Zhang L H, Zhu Z L, Zhang R H, et al. Extraction of copper from sewage sludge using biodegradable chelant EDDS[J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2008, 20(8): 970-974.
- [11] Guo H Y, Wang W, Sun Y Y, et al. Ethyl lactate enhances ethylenediaminedisuccinic acid solution removal of copper from contaminated

- soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3):59-63.
- [12] Jafariar D, Daryanavard M R, Sheibani S. Ultrafast microwave assisted leaching for recovery of platinum from spent catalyst[J]. *Hydrometallurgy*, 2005, 78:166-171.
- [13] Kuo C Y, Wu C H, Lo S L. Removal of copper from industrial sludge by traditional and microwave acid extraction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 120(1-3):249-256.
- [14] Xue J, Wang W, Wang Q H, et al. Removal of heavy metals from municipal solid waste incineration(MSWI) fly ash by traditional and microwave acid extraction[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, 85(9):1268-1277.
- [15] Florian D, Barnes R M, Knapp G. Comparison of microwave-assisted acid leaching techniques for the determination of heavy metals in sediments, soils, and sludges[J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1998, 362(7-8):558-565.
- [16] Bettiol C, Stievano L, Bertelle M, et al. Evaluation of microwave-assisted acid extraction procedures for the determination of metal content and potential bioavailability in sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(5):1140-1151.
- [17] Zhang F S, Itoh H. Extraction of metals from municipal solid waste incinerator fly ash by hydrothermal process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3):663-670.
- [18] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1):51-56.
- [19] Hauser L, Tandy S, Schulin R, et al. Column extraction of heavy metals from soils using the biodegradable chelating agent EDDS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(17):6819-6824.
- [20] 胡忻, 罗璐瑕, 陈逸珺. 生物可降解的螯合剂 EDDS 提取城市污泥中 Cu, Zn, Pb 和 Cd[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(6):110-114.
- HU Xin, LUO Lu-xia, CHEN Yi-jun. Extractability of Cu, Zn, Pb and Cd in municipal sludges using a biodegradable chelating agent-[s, s] stereoisomer of ethylenediamine disuccinate[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(6):110-114.
- [21] Zhang S Z, Lu A X, Shan X, et al. Microwave extraction of heavy metals from wet rhizosphere soils and its application to evaluation of bioavailability[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002, 374(5):942-947.
- [22] Xia D K, Pickles C A. Microwave caustic leaching of electric arc furnace dust[J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(1):79-94.
- [23] Deng J C, Feng X, Qiu X H. Extraction of heavy metal from sewage sludge using ultrasound-assisted nitric acid [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 152(1):177-182.
- [24] Cao A, Cappai G, Carucci A, et al. Heavy metal bioavailability and chelate mobilization efficiency in an assisted phytoextraction process [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2008, 30(2):115-119.
- [25] Gan Q. A case study of microwave processing of metal hydroxide sediment sludge from printed circuit board manufacturing wash water[J]. *Waste Management*, 2000, 20(8):695-701.

欢迎订阅 2014 年

农业环境科学学报

《农业环境科学学报》是由农业部主管,农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。本刊被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊、中国精品科技期刊、中国权威学术期刊、2012 中国国际影响力优秀学术期刊。被美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》和美国《剑桥科学文摘社网站》等多家国际检索系统收录。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,208 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外,编辑部存有 2010 年以前的各卷合订本,欢迎选购。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

电话:(022)23674336

电子信箱:caep@vip.163.com

邮编:300191

传真:(022)23674336

网址:http://www.aes.org.cn