

# EDTA/DTPA与柠檬酸混合连续淋洗土壤中镉铅及其对土壤肥力的影响<sup>①</sup>

薛清华<sup>1</sup>, 黄凤莲<sup>2</sup>, 梁芳<sup>1</sup>, 郭朝晖<sup>1</sup>

(1.中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083; 2.湖南省环境保护科学研究院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**以镉铅污染土壤为对象,研究了乙二胺四乙酸(EDTA)/二乙基三胺五乙酸(DTPA)与柠檬酸混合连续淋洗对土壤中Cd和Pb的淋洗效果及其淋洗后土壤肥力的变化。研究表明,EDTA/DTPA与柠檬酸混合淋洗可高效淋出污染农田土壤中Cd和Pb。1 g/L EDTA+4 g/L 柠檬酸一级混合淋洗对Cd、Pb的淋洗率分别为57.3%和60.7%,连续3级淋洗后达63.5%和70.3%。1 g/L DTPA+4 g/L 柠檬酸一级混合淋洗对Cd、Pb的淋洗率分别为55.6%和56.8%,连续3级淋洗后达61.4%和72.5%。连续3级淋洗后土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均明显降低并影响土壤肥力,需施用相应肥料来维持土壤的使用功能。

**关键词:**重金属污染土壤; 铅; 镉; 化学淋洗; EDTA; DTPA; 柠檬酸; 土壤肥力

中图分类号: X53

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2019.05.020

文章编号: 0253-6099(2019)05-0074-05

## Continuous Soil Washing with EDTA/DTPA Combined with Citric Acid for Removing Cd and Pb and Its Impact on Soil Fertility

XUE Qing-hua<sup>1</sup>, HUANG Feng-lian<sup>2</sup>, LIANG Fang<sup>1</sup>, GUO Zhao-hui<sup>1</sup>

(1.School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** The continuous extraction of Cd and Pb with the composite reagents, including a mixture of ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) and citric acid, or diethylene triamine pentacetate acid (DTPA) and citric acid, from Cd and Pb-contaminated soil was performed, and its effects on soil fertility were also investigated. The results show that the mixture of EDTA or DTPA combined with citric acid can effectively enhance the leaching of Cd and Pb from soil. It is shown that the leaching rates of Cd and Pb after first-stage of soil washing with the mixture of 1 g/L EDTA and 4 g/L citric acid are 57.3% and 60.7%, respectively, and can reach 63.5% and 70.3% after continuous three stages of soil washing. The leaching rates of Cd and Pb reach 55.6% and 56.8%, respectively after first-stage of soil washing with the mixture of 1 g/L DTPA and 4 g/L citric acid, and up to 61.4% and 72.5% respectively after continuous three stages. However, the soil after three stages washing have the available N, P, and K all significantly decreased, and need to be added with relevant fertilizers to maintain its function.

**Key words:** heavy metal contaminated soil; Pb; Cd; chemical washing; EDTA; DTPA; citric acid; soil fertility

我国铅锌资源丰富,长期采、选、冶生产过程给周边土壤环境带来一定重金属污染<sup>[1]</sup>。土壤淋洗技术是让污染土壤与淋洗液发生作用,使污染物转移至液相<sup>[2]</sup>。利用土壤淋洗法淋洗重金属污染土壤,从而去除吸附在固相颗粒上的可溶性重金属,可永久性去除土壤中的污染物。有机螯合剂可与重金属元素形成稳

定和可溶的金属络合物,且不会太影响土壤的原始特性<sup>[3]</sup>。常用的螯合物可分为两类,一类是人工螯合剂(如EDTA、DTPA等)<sup>[4]</sup>,一类是低分子有机酸(如柠檬酸、草酸等)<sup>[3]</sup>。本文以Cd和Pb污染土壤为研究对象,通过EDTA/DTPA与柠檬酸两两混合连续淋洗污染土壤,并评价了淋洗后土壤肥力变化特征,为重金

① 收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02)

作者简介: 薛清华(1993-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制与修复。

通讯作者: 郭朝晖(1971-),男,湖南宁乡人,教授,博士,主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复。

属污染土壤的化学淋洗修复提供参考依据。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及设备

供试土壤采自湖南省某铅锌冶炼厂附近表层土壤(0~20 cm)(27°52'17.44"N, 113°03'48.84"E),母质为第四纪红土,属于普通铁聚水耕人为土。土壤样品室内风干,剔除杂物磨碎,分别过筛,保存备用。Cd和Pb污染土壤基本理化性质见表1。供试土壤为砂质粘壤土,其Cd含量超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中管控值(3.0 mg/kg)。其中,土壤中碱解氮含量在120~149 mg/kg之间,有效磷含量大于30 mg/kg,速效钾含量在100~150 mg/kg范围内,属“丰富”或“较丰富”水平<sup>[5]</sup>,表明供试土壤肥力水平较高。

表1 供试土壤的基本理化性质

参数	单位	数值
砂粒(>0.1 mm)含量	%	57.0
粉(砂)粒(0.01~0.1 mm)含量	%	13.3
粘粒(<0.01 mm)含量	%	29.7
pH值		6.92
阳离子交换量(CEC)	cmol(+)/kg	11.0
有机质(OM)	g/kg	4.54
碱解氮	mg/kg	121
有效磷	mg/kg	37.2
速效钾	mg/kg	115
总Cd	mg/kg	10.8
总Pb	mg/kg	210

主要实验仪器有:iCAP 7400电感耦合等离子体发射光谱仪(Thermo,美国),UV1801紫外可见分光光度计(北京北分瑞利分析仪器集团),THZ-82水浴恒温振荡器(常州澳华仪器有限公司)等。主要试剂包括EDTA、DTPA、柠檬酸、NaHCO<sub>3</sub>和重铬酸钾(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),硝酸和硫酸(优级纯,国药集团化学试剂有限公司),Cd、Pb国标液(国家钢铁材料测试中心钢铁总院)等。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 混合淋洗剂配比优化试验

浓度为1、2、4、8 g/L的EDTA,或浓度为0.5、1、2、4 g/L的DTPA,分别与浓度为1、2、4、8 g/L的柠檬酸两两混合,用HNO<sub>3</sub>调节pH值至5,倒入装有10.0 g粒径0.25 mm风干土样的100 mL离心管中,保持固液比1:10,以200 r/min室温振荡30 min,后于转速4000 r/min下离心10 min,过滤,测定滤液中Cd、Pb含量。各试验重复3次。

#### 1.2.2 混合连续淋洗试验

基于混合淋洗剂配比优化试验结果,按优化配比浓度配制500 mL EDTA+柠檬酸或DTPA+柠檬酸的混合溶液,用HNO<sub>3</sub>调节pH值至5,倒入含有50.0 g风干土样的500 mL锥形瓶中,以200 r/min室温振荡30 min,分开倒入100 mL离心管中,于转速4000 r/min下离心10 min后过滤,测定滤液中Cd、Pb含量。离心之后的土样加入50 mL去离子水,振荡15 min后离心过滤,弃除滤液,在洗涤过的土样中再次加入未使用过的同种淋洗液进行淋洗,循环3次。洗涤后的土样于室内风干后分别过筛并封袋保存备用。所有处理重复3次。

#### 1.3 测试与分析

土壤基本性质分析参照文献[6],采用水浸提液测定土壤pH值;分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠提取法和乙酸铵提取法测定土壤碱解氮、速效钾和有效磷;采用低温外热重铬酸钾容量法测定有机质;采用甲种比重计法测定土壤粒径;采用乙酸铵法测定阳离子交换量。采用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>法消解土壤样品。采用BCR法连续提取土样中Cd、Pb形态<sup>[7]</sup>。采用国家标准土壤样品(GBW—07603)进行质量校准。

土壤中Cd、Pb淋洗效率 $\eta$ 的计算公式为:

$$\eta = \frac{C_1 V}{M C_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $C_1$ 为溶液中Cd/Pb的浓度,mg/L; $V$ 为淋洗剂体积,mL; $M$ 为土壤质量,g; $C_2$ 为土壤中Cd/Pb的浓度,mg/kg。

土壤中Cd/Pb形态分析计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$D = \frac{C_{Fi}}{SUM} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $C_{Fi}$ 为土壤中Cd/Pb各形态浓度,mg/kg; $SUM$ 为土壤中Cd、Pb各形态浓度的总和,mg/kg; $D$ 为各形态含量占总量的比值,%。

同时,根据振荡淋洗前后土壤中各土壤肥力指标的含里,计算营养元素损失率:

$$\text{土壤肥力指标损失率} = \left( 1 - \frac{\text{淋洗后含量}}{\text{淋洗前含量}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

肥力指标包括CEC(cmol(+)/kg),有机质、碱解氮、有效磷和速效钾(mg/kg)。

采用Microsoft Excel 2013计算实验数据的平均值和标准差。采用SPSS 13.0统计软件进行方差分析,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)观察不同处理之间的差异, $p < 0.05$ 为显著水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混合淋洗剂配比优化及其淋洗效率

混合淋洗对土壤中 Cd、Pb 的去除率见表 2。从表 2 可以看出,当 EDTA 浓度为 4 g/L、柠檬酸浓度为 1 g/L 时,混合淋洗可去除土壤中 61.8% 的 Cd 和 69.2% 的 Pb。当 EDTA 处于低浓度 1 g/L 时,混合淋洗对污染土壤 Cd 的去除率随柠檬酸浓度增加呈先增加后下降的趋势;当 EDTA 浓度为 2 g/L 和 4 g/L 时,混合淋

洗对污染土壤 Cd、Pb 的去除随柠檬酸浓度增加而降低,表明该 EDTA 浓度下,柠檬酸浓度增加反而阻碍了土壤中 Cd、Pb 的解吸,这可能是由于随着柠檬酸浓度增加,溶液体系 pH 值下降,当柠檬酸溶液体系 pH 值低于零盐效应点(PZSE)时,该络合物(负电性)明显吸附在土壤表面,使得 Cd、Pb 去除效率降低<sup>[9]</sup>。当 EDTA 浓度为 8 g/L 时,随着柠檬酸浓度增加,混合淋洗效果在小范围波动,土壤中 Cd、Pb 去除率无明显变化。

表 2 混合淋洗对土壤中 Cd、Pb 的淋洗效率

药剂及加入量/(g·L <sup>-1</sup> )		去除率/%		药剂及加入量/(g·L <sup>-1</sup> )		去除率/%	
EDTA	柠檬酸	Cd	Pb	DTPA	柠檬酸	Cd	Pb
1	1	56.5±0.8 e	58.8±0.4 i	0.5	1	52.9±0.8 b	48.0±1.2 h
	2	59.0±0.1 c	62.2±0.3 h		2	54.3±0.5 ab	49.7±0.1 h
	4	59.2±0.6 c	62.9±0.2 g		4	55.5±2.4 ab	50.3±1.4 h
	8	58.0±0.8 d	62.7±0.8 gh		8	54.5±0.4 ab	49.2±0.1 h
2	1	60.2±0.3 b	66.1±0.0 e	1	1	54.5±1.3 ab	52.6±1.4 g
	2	60.3±0.7 b	65.7±0.7 e		2	54.9±1.4 ab	53.3±1.7 fg
	4	59.2±0.6 c	64.9±0.4 f		4	56.1±1.3 a	55.4±1.3 def
	8	58.3±0.1 d	65.3±0.1 ef		8	53.9±0.3 ab	54.2±0.0 efg
4	1	61.8±0.4 a	69.2±0.5 a	2	1	54.6±0.6 ab	56.2±0.2 cde
	2	60.4±0.8 b	67.8±0.4 c		2	55.4±1.6 ab	57.7±0.8 bcd
	4	59.2±0.5 c	67.1±0.2 d		4	55.0±0.1 ab	58.5±0.2 bc
	8	58.1±0.1 d	65.9±0.2 e		8	50.5±6.6 c	53.9±6.5 efg
8	1	60.7±1.2 b	68.6±1.5 ab	4	1	54.2±1.0 ab	58.5±1.5 bc
	2	60.2±0.0 b	68.1±1.1 bc		2	54.4±1.1 ab	59.5±1.5 b
	4	60.7±0.1 b	69.1±0.3 a		4	54.9±1.0 ab	59.6±0.3 b
	8	59.4±0.6 c	67.4±0.1 cd		8	56.4±0.4 a	62.1±0.1 a

注:同一列不同字母表示不同处理下各肥力指标之间存在显著性差异( $p < 0.05$ )。

DTPA 是一种比 EDTA 稍强的螯合剂(如其与 Pb 络合的  $pK_s$  为 19, EDTA 的为 18)<sup>[10]</sup>。当 DTPA 浓度为 4 g/L、柠檬酸浓度为 8 g/L 时,可去除 56.4% 的 Cd 和 62.1% 的 Pb。DTPA 浓度小于 2 g/L 时,混合淋洗对污染土壤 Cd、Pb 的去除随柠檬酸浓度增加呈先增加后下降趋势;低浓度下柠檬酸的增加,使得溶液体系 pH 值降低,有利于土壤中 Cd 的溶出,而随着柠檬酸浓度进一步升高,络合物的负电性使得更多的络合物吸附在土壤上,进而降低重金属的去除率。当 DTPA 浓度为 4 g/L 时,混合淋洗对污染土壤中 Cd 的去除随柠檬酸浓度增加而增加;当柠檬酸浓度为 8 g/L 时,其 Cd、Pb 去除率分别达到 56.4% 和 62.1%,这是因为 DTPA 是较强的螯合剂,可使更多的 Cd 从土壤吸附位点上脱离出来的缘故<sup>[11]</sup>。

低浓度 EDTA 淋洗下,柠檬酸浓度的增加可促进土壤中 Cd、Pb 的解吸。由于 EDTA 价格较贵,考虑到淋洗修复的成本问题,需减少 EDTA 的用量,增加柠檬酸的用量,同时又保证对土壤中 Cd、Pb 的去除效果较好。

结合表 2 可以看出,选择 EDTA 1 g/L 和柠檬酸 4 g/L 混合进行淋洗, Cd、Pb 去除率分别达到 59.2% 和 62.9%。同理,选择 DTPA 1 g/L 和柠檬酸 4 g/L 混合时, Cd、Pb 去除率分别为 56.1% 和 55.4%。

### 2.2 淋洗级数对土壤中 Cd、Pb 淋洗效果的影响

图 1 为去离子水、1 g/L EDTA+4 g/L 柠檬酸、1 g/L DTPA+4 g/L 柠檬酸对土壤中重金属连续 3 次的淋洗效果。EDTA+柠檬酸和 DAPA+柠檬酸混合 3 次淋洗过程中第一次淋洗效率 $\gg$ 第二次淋洗效率 $>$ 第三次淋洗效率,第一次淋洗下土壤 Cd 和 Pb 去除率分别为 57.3% 和 60.7%。由于第一次淋洗已将土壤中大部分酸可提取态、可还原态重金属提取出来,第二次淋洗效果大大低于第一次淋洗,且第三次淋洗效率与去离子水淋洗效率相当。故可认为,第一次淋洗已使得土壤中大部分 Cd 和 Pb 被淋洗出来,二次淋洗几乎可去除土壤中全部可淋洗部分重金属,进一步淋洗对重金属总去除率增加不明显。研究结果与文献[12-13]研究结果相一致。

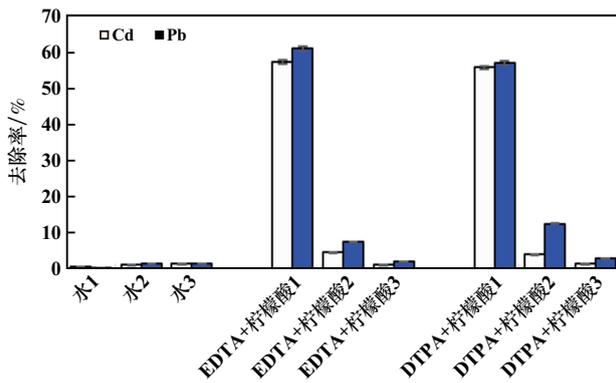


图1 不同淋洗方式下土壤中Cd、Pb的去除率  
(1、2和3分别代表第一次、第二次和第三次淋洗)

### 2.3 混合淋洗对土壤重金属形态变化的影响

土壤淋洗前后Cd、Pb的形态分布见图2。混合淋洗前土壤中Cd主要以酸可提取态和可还原态存在,而Pb主要以可还原态和可氧化态存在。采用去离子水淋洗对土壤中Cd、Pb的去除率很低,三级淋洗后仅去除土壤中不到4%的Cd和Pb,表明去离子水不能有效去除土壤中的Cd、Pb<sup>[14]</sup>。

EDTA+柠檬酸淋洗可将土壤中大量的酸可交换态、可还原态Pb和Cd以及大部分可氧化态Pb被解吸出来;随着淋洗级数增加,土壤中Cd、Pb的解吸量稍有增加。由图2可知,三级淋洗后可去除70%酸可提取态和可还原态Cd,以及90%酸可提取态Pb、70%以上的可还原态和可氧化态Pb。土壤中Cd和Pb主要是第一次浸出的,在第二次淋洗过程中土壤中酸可提取态和可还原态Cd和Pb的解吸量已显著降低。这进一步表明多次淋洗过程中可交换态重金属最先快速浸出,可还原态的重金属滞后部分浸出<sup>[15]</sup>。

DTPA+柠檬酸淋洗主要去除土壤中酸可提取态和可还原态Cd,而土壤中可氧化态和残渣态Cd淋洗前后含量几乎没有变化。土壤中Pb除酸可提取态和可还原态被淋出外,还有47.8%~54.5%的可氧化态Pb被淋洗出来。

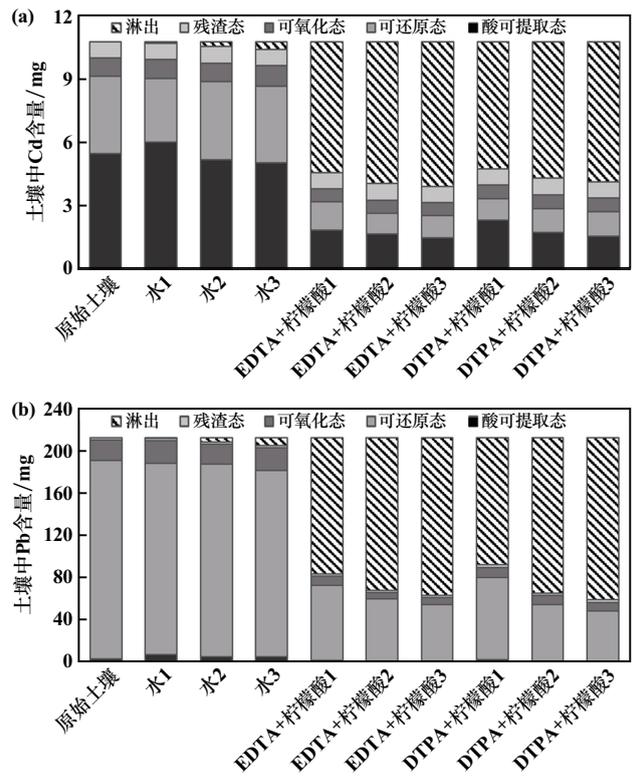


图2 土壤淋洗前后Cd、Pb的形态分布  
(a) Cd; (b) Pb

经混合淋洗剂连续淋洗后,土壤中酸可提取态、可还原态Cd,酸可提取态、可还原态及可氧化态Pb含量降低,而可氧化态和残渣态Cd以及残渣态Pb含量相对稳定。表明化学混合淋洗可以有效减少污染土壤中Cd、Pb生物有效性从而达到降低其环境风险的目的。

### 2.4 混合淋洗对土壤肥力的影响

对混合淋洗前后土壤肥力变化情况进行分析,结果见表3。从表3可以看出,EDTA+柠檬酸或DTPA+柠檬酸混合淋洗对土壤pH及CEC含量的影响较小。然而,连续淋洗下土壤有机质含量呈现先降低后增加趋势,这可能是因为淋洗液淋洗过程中流失的有机质被有机淋洗剂补充的缘故。EDTA+柠檬酸混合淋洗下,

表3 淋洗前后土壤肥力变化(25℃,液固比10:1,淋洗时间30min)

淋洗方式	pH值	CEC /(cmol(+).kg <sup>-1</sup> )	土壤物质含量/(mg.kg <sup>-1</sup> )			
			有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
原始土壤	7.25±0.04 b	11.4±0.2 ab	5 167±147 bcd	137±11 a	32.1±6.1 b	112±2 a
水1	7.32±0.00 a	11.5±0.0 a	5 479±0 ab	119±0 b	44.7±0.0 a	89.6±0.0 b
水2	7.30±0.00 a	10.8±0.0 c	5 341±0 abc	131±0 a	45.3±0.0 a	80.1±0.0 d
水3	7.32±0.00 a	10.5±0.0 cd	3 954±0 e	120±0 b	44.2±0.0 a	82.8±0.0 c
EDTA+柠檬酸1	7.09±0.02 c	11.0±0.2 bc	5 132±653 bcd	116±10 b	26.5±5.6 cde	78.4±0.1 d
EDTA+柠檬酸2	6.86±0.02 f	10.1±0.7 de	4 878±392 cd	114±9 b	27.0±1.8 cd	71.0±1.9 e
EDTA+柠檬酸3	6.84±0.02 f	9.70±0.5 e	5 364±882 abc	114±7 b	23.1±0.3 e	70.9±0.2 e
DTPA+柠檬酸1	7.32±0.04 a	10.9±0.4 c	4 844±114 d	112±0 b	29.0±0.3 bc	84.1±3.1 c
DTPA+柠檬酸2	6.92±0.02 e	10.9±0.7 bc	5 572±33 ab	113±3 b	27.0±1.0 cd	70.7±2.1 e
DTPA+柠檬酸3	7.03±0.03 d	9.90±0.1 e	5 699±16 a	112±10 b	24.6±0.5 de	64.9±2.3 f

注:同一列不同字母表示不同处理下各肥力指标之间存在显著性差异( $p<0.05$ )。

三级淋洗后土壤中碱解氮含量与原始水平相比显著下降了15.3%、16.8%和16.8%;但连续淋洗下土壤中碱解氮含量与去离子水淋洗下的含量无显著性差异,同时三级淋洗间无显著性差异。DTPA+柠檬酸淋洗对土壤中碱解氮含量影响与之类似。EDTA+柠檬酸混合连续三级淋洗下土壤中有效磷含量显著性降低( $p<0.05$ ),与原始土壤有效磷含量相比分别降低了17.4%、15.9%和28.0%;淋洗中速效钾分别降低了30%、36.6%和36.7%。DTPA+柠檬酸混合淋洗时土壤中有效磷含量随淋洗次数增加有所降低,但二级淋洗后土壤有效磷含量与原始土壤对比无显著性差异;土壤中速效钾含量随淋洗次数的增加而显著降低( $p<0.05$ ),连续3次淋洗后,其含量分别降低了24.9%、36.9%和42.1%。

上述结果表明,经二级淋洗后,土壤中Cd、Pb能够有效解吸,既能有效淋洗掉土壤中的Cd、Pb,又适当减少对土壤肥力的影响。但尽管如此,在工程应用中,仍需辅助施肥、生物强化<sup>[16]</sup>或者培育措施<sup>[17-18]</sup>来改善淋洗后土壤肥力。

### 3 结 论

1) 4 g/L EDTA 和 1 g/L 柠檬酸混合淋洗可去除土壤中61.8%的Cd和69.2%的Pb;4 g/L DTPA 和 8 g/L 柠檬酸混合淋洗可去除土壤中56.1%的Cd和62.1%的Pb。

2) EDTA/DTPA 和柠檬酸混合淋洗主要去除土壤中酸可提取态和可还原态Cd,以及酸可提取态、可还原态和可氧化态Pb。混合连续淋洗可有效降低污染农田土壤中的Cd、Pb生物有效性从而减少其潜在风险。

3) EDTA/DTPA 和柠檬酸混合三级淋洗分别可去除土壤中63.5%的Cd、70.3%的Pb和61.4%的Cd、72.5%的Pb。二级淋洗即可去除土壤中大部分可淋出的Cd、Pb,因此建议采用二级淋洗工艺。

4) 连续淋洗使土壤碱解氮、有效磷和速效钾明显降低,在工程应用中,需采取施肥等措施来改善淋洗后的土壤肥力。

#### 参考文献:

[1] 陈 灿,刘 湛,李二平. 湖南省铅锌冶炼行业铅、砷、镉气相产/排污系数测算[J]. 矿冶工程, 2015,35(5):139-142.  
[2] 吕璠璠,陈泉源. 表面活性剂在柴油污染土壤洗涤中的应用[J]. 矿冶工程, 2015,35(2):94-98.

[3] 曾嘉强,吴文成,戴 军,等. 有机酸-氯化物复合浸提去除土壤重金属的效应及对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11):1898-1903.  
[4] Lim T T, Tay J H, Wang J Y. Chelating-agent-enhanced heavy metal extraction from a contaminated acidic soil[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004,130(1):59-66.  
[5] 董建慧,丁莉华,薛国飞,等. 平山县基本农田土壤有效氮磷钾含量变化分析[J]. 现代农村科技, 2010(19):52-53.  
[6] 鲁如坤. 农业土壤分析[M]. 北京:农业科技出版社, 2000.  
[7] Guo Z H, Megharaj M, Beer M, et al. Heavy metal impact on bacterial biomass based on DNA analyses and uptake by wild plants in the abandoned copper mine soils[J]. Bioresource Technology, 2009,100(17):3831-3836.  
[8] Lei M, Liao B H. Fraction distributions of Lead, Cadmium, Copper, and Zinc in metal-contaminated soil before and after extraction with disodium ethylenediaminetetraacetic acid[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008(39):1963-1978.  
[9] Chen Y, Lin Q, Luo Y, et al. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. Chemosphere, 2003, 50(6):807-811.  
[10] Hong P K A, Chelsea L, Banerji S K, et al. Feasibility of metal recovery from soil using DTPA and its biostability[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002,94(3):253-272.  
[11] 张淑娟. 镉铅污染钙质土化学淋洗修复研究[D]. 长沙:中南大学冶金与环境学院, 2013.  
[12] 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.  
[13] 梁金利,蔡焕兴,段雪梅,等. 有机酸土柱淋洗法修复重金属污染土壤[J]. 环境工程学报, 2012,6(9):3339-3343.  
[14] 郭晓方,卫泽斌,薛建华,等. 石灰水对混合试剂洗脱土壤重金属淋洗效果的影响[J]. 土壤, 2017,49(1):129-134.  
[15] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Heavy metal removal from sediments by biosurfactants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001,85(1-2):111-125.  
[16] Chen F, Tan M, Ma J, et al. Restoration of manufactured gas plant site soil through combined ultrasound-assisted soil washing and bioaugmentation[J]. Chemosphere, 2016,146:289.  
[17] Jelusic M, Lestan D. Effect of EDTA washing of metal polluted garden soils. Part I: Toxicity hazards and impact on soil properties[J]. Science of the Total Environment, 2014, 475:132-141.  
[18] Ye M, Sun M M, Wan J Z, et al. Feasibility of lettuce cultivation in sophorolipid-enhanced washed soil originally polluted with Cd, antibiotics, and antibiotic-resistant genes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015,124:344.

引用本文: 薛清华,黄凤莲,梁 芳,等. EDTA/DTPA 与柠檬酸混合连续淋洗土壤中镉铅及其对土壤肥力的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):74-78.