

于兵, 门明新, 刘需珈, 等. 有机酸对重金属污染土壤的淋洗效果[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 284–287.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.066

# 有机酸对重金属污染土壤的淋洗效果

于兵<sup>1</sup>, 门明新<sup>2</sup>, 刘需珈<sup>1</sup>, 吴克宁<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 河北农业大学国土资源学院, 河北保定 071000)

**摘要:**随着土壤重金属污染日趋严重, 修复已成为热点问题, 研究土壤重金属污染修复效果具有重要意义。用水、醋酸溶液、柠檬酸溶液对重金属污染土壤进行淋洗, 再以 2% 石灰水溶液来调节淋洗后土壤的 pH 值, 最后测定土壤淋洗液的 pH 值及电导率。结果表明: 对重金属 Cu、Cd、Pb 污染土壤修复时, 最佳淋洗剂是柠檬酸溶液, 最佳淋洗浓度为 1、0.4、0.7 mol/L; 对重金属 Zn 污染土壤修复时, 最佳淋洗剂是醋酸溶液, 最佳淋洗浓度为 1 mol/L; 石灰水对重金属污染的土壤淋洗效果与有机酸浓度呈正相关, 即酸性条件越强, 对重金属的淋洗效果越好; 经石灰水处理的土样电导率随有机酸浓度增加而升高, 在相同浓度下表现为柠檬酸溶液 > 醋酸溶液。

**关键词:**土壤; 重金属污染; 有机酸; 淋洗; 修复作用; 电导率

**中图分类号:**S153; X53

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2018)13-0284-04

当今工业化和城市化的高速发展, 重金属污染事件在我国频繁发生, 其中土壤重金属污染修复已成为不容小觑的环境问题。我国受重金属污染的耕地面积近 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 约占总耕地面积的 20%<sup>[1]</sup>。土壤重金属污染给我国直接造成经济损失, 每年因重金属污染而减产的粮食高达 1 000 多万 t, 被重金属污染的粮食也多达 1 200 万 t, 总计经济损失至少达到 200 亿元。同时, 土壤重金属污染造成食品质量降低, 全国范围内镉大米生产现象日趋增多, 每年产量数以亿计。此外, 土壤重金属污染也严重威胁人体健康。

我国土壤受重金属污染区域较多, 矿产开采和冶炼“三废”的排放, 导致湖南省湘江流域和资江流域土壤重金属污染比较严重, 并产生严重的生态环境风险<sup>[2-3]</sup>。辽宁沈阳张士地区 30 多年的工业污水灌溉导致土壤中 Cd 污染严重, 且在停耕 10 年后土壤中 Cd 的移动性和生物有效性仍很高<sup>[4]</sup>; 河南省新乡市寺庄顶污灌区土壤中 Cd、Ni、Zn、Cu 的含量严重超标<sup>[5]</sup>。《十三五规划纲要》中明确提出要以污染防治行动计划为纲, 实施土壤污染分类分级防治, 优先保护农用地土壤环境质量安全, 切实加强建设用地土壤环境监管; 中华人民共和国环境保护部土壤状况调查结果显示, 中重度污染耕地大体在 333.3 万  $\text{hm}^2$ , 国土部《中国耕地地球化学调查报告(2015 年)》则对土地资源进行了宏观规划; 2015 年“国际土壤年”的大会主题为“健康土壤服务于健康生命”, 只有良好的土壤, 才能真正保障粮食安全, 土壤虽不出声, 但理应被高度重视; 《土壤污染防治行动计划》的出台也说明重金属污染已不容忽视, 因此, 土壤系统中重金属的污染修复工作刻不容缓。

土壤淋洗可分为原位淋洗和异位淋洗<sup>[6]</sup>。淋洗机制是利用淋洗液或化学助剂与土壤中的污染物结合, 并通过淋洗液的解吸、螯合、溶解或固定等化学作用, 达到修复污染土壤的目的<sup>[7]</sup>。土壤淋洗修复方法经济实用, 既能有效地去除各种形态的污染物, 不会破坏土壤基本理化性质, 又不会造成二次污染而污染环境<sup>[8]</sup>。国内外关于重金属污染的土壤淋洗修复方面做了很多研究, 倪才英等证明草酸对重金属淋洗效果是  $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ <sup>[9]</sup>。可欣等表明, EDTA(乙二胺四乙酸)与重金属反应最初 2 h 为快反应阶段<sup>[10]</sup>。杨维等指出, 柠檬酸-柠檬酸三钠复合淋洗剂是理想的 Cd、Cu 浸出液<sup>[11]</sup>。赵娜等指出, 对于重金属 Cd 的淋洗效果表现为  $\text{EDTA} > \text{EDDS}$ (乙二胺二琥珀酸)<sup>[12]</sup>。Ji 等研究证明, 多步淋洗对重金属的淋洗效果要高于 1 次淋洗<sup>[13]</sup>。中国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、中山大学、浙江大学等均开展了大量的重金属污染土壤修复工作<sup>[14]</sup>。Jean-Soro 等认为, 要用可生物降解螯合剂、有机酸等代替 EDTA 等对土壤结构破坏较大的淋洗剂<sup>[15-16]</sup>。在欧洲每年约有 20 亿欧元用于污染场地的修复工作<sup>[17]</sup>。在美国专门建立了 NPL(超级基金项目)用于污染场地修复<sup>[18-21]</sup>。

本研究拟通过用有机酸(柠檬酸溶液和醋酸溶液)对河北省任丘市西环路办事处思贤工业区周围重金属污染土壤进行淋洗, 比较同等浓度下 2 种有机酸对 Cu、Zn、Pb、Cd 污染的土壤的修复效果, 进而分析出柠檬酸、醋酸在何种浓度下对 Cu、Zn、Pb、Cd 污染的土壤的修复结果最佳, 并用石灰水处理经柠檬酸溶液、醋酸溶液淋洗过的土样, 使其 pH 值达到利于作物生长指标的范围, 以期有机酸淋洗对重金属污染土壤的修复研究提供理论指导, 进而为重金属污染的耕地土壤综合治理提供有效合理的建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2016 年采集任丘市西环路办事处思贤工业区周围重金属污染土壤, 该地曾建有电镀厂, 大量排放未经处理过的废

收稿日期: 2017-09-18

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201511082-02)。  
作者简介: 于兵(1994—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事土地资源评价与利用规划研究。E-mail: yubing921@sina.cn。

通信作者: 吴克宁, 博士, 博士生导师, 主要从事土地资源评价与利用规划研究。E-mail: wukening@cugb.edu.cn。

水,使得土壤中重金属含量超标,植物难以生长。经任丘市环境保护局环境监测站监测,该场所排放的废水中重金属六价铬含量为 49.9 mg/L,超过国家地表水环境质量标准 248.5 倍,总锌含量 140 mg/L,超过国家标准 92.3 倍,经污染废水通过沟渠造成土壤重金属严重超标。

## 1.2 试验处理

**1.2.1 采集土样** 采样过程中,利用铁铲、镐头、竹片等进行土壤样品采集,采样深度为 0~20 cm,避开外来土和新近扰动过的土层,并去掉表面杂物和土壤中的砾石等,利用五点采样法取土,四分法保留 1 kg 土样装聚乙烯自封袋采集样品,并现场记录“野外样点信息表”<sup>[22]</sup>。样品于实验室自然风干,拣出石块等杂物后对土样进行过筛处理(1 mm),用天平称取过筛土样 24 份,每份 250 g 送检土壤 pH 值,重金属 Cu、Zn、Pb、Cd。

**1.2.2 淋洗处理** (1)用 750 mL 水对试验组 24 份土样淋洗 1 次,即土样装入离心管中,加水在振荡器上以 150 r/min 恒温(25℃)振荡 12 h,所得样品以 3 000 r/min 离心 15 min<sup>[23]</sup>,用漏斗对淋洗液进行过滤,收集滤液并将土样转移至烧杯,每个处理重复 3 次,用 1~24 号对其贴标签标记。

(2)用 750 mL 浓度分别为 0.1、0.4、0.7、1.0 mol/L 的柠檬酸溶液(柠檬酸的摩尔质量为 192 g/mol,配制不同浓度的柠檬酸溶液只须按比例将纯净的柠檬酸溶于水即可)对 1~3、4~6、7~9、10~12 号土样各淋洗 1 次。

(3)用 750 mL 浓度分别为 0.1、0.4、0.7、1.0 mol/L 的醋酸溶液(乙酸的摩尔质量为 17 g/mol,配制不同浓度的醋酸溶液只须按比例将纯净的乙酸溶于水即可)对 13~15、16~18、19~21、22~24 号土样各淋洗 2 次。

(4)用 0.2% 石灰水溶液对 1~12 号土样淋洗 2 次,对 13~24 号土样淋洗 1 次。

## 1.3 土样测定

**1.3.1 测定使用仪器** SHZ-型数显水浴恒温振荡器、TD5Z 台式低速离心机、原子吸收分光光度计、带复合玻璃电极的 pH 计、DDP-210 型便携式电导率仪。

**1.3.2 土样重金属含量的测定** 将 1~24 号土样置于烘干箱内进行室内烘干,温度控制在(35±5)℃至烘干为止。研磨过筛(0.25 mm),配制 10 mL 硝酸、8 mL 高氯酸、2 mL 浓硫酸混合溶液进行消化<sup>[24]</sup>,加蒸馏水于容量瓶振荡、定容,将定容溶液用原子吸收分光光度计测定土样中重金属含量。

**1.3.3 淋洗液 pH 值、电导率的测定** 采用带复合玻璃电极的 pH 计和 DDP-210 型便携式电导率仪测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机酸溶液对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 修复效果分析

土壤的化学淋洗方法是利用淋洗剂将土壤中重金属淋洗至滤液中,将固相重金属转移至液相中,从而使土壤中重金属含量降低,并对淋洗液进行相应处理的一种土壤重金属污染修复技术。淋洗剂种类、淋洗浓度、土壤质地等都是影响淋洗效果的因素,其中对淋洗剂种类及浓度的选择尤为重要。

有机酸溶液为 0.1、0.4、0.7、1.0 mol/L 时,其对于重金属 Cu 的淋洗效果表现为柠檬酸溶液>醋酸溶液,且淋洗效果随有机酸浓度增加而增强(图 1)。因此,对重金属 Cu 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是柠檬酸溶液,最佳淋洗浓度为 1.0 mol/L。

柠檬酸溶液和醋酸溶液淋洗 1 次后,对重金属 Zn 的淋洗效果表现为有机酸浓度为 0.1、0.4、0.7 mol/L 时,柠檬酸溶液<醋酸溶液;有机酸浓度为 1.0 mol/L 时,柠檬酸溶液>醋酸溶液,当有机酸浓度为 0.4 mol/L 时,醋酸溶液淋洗效果最佳,但由于醋酸溶液淋洗效果总体变化趋势不单一,故再分析经醋酸溶液淋洗 2 次后滤液中 Zn 含量,不难发现,当浓度为 1.0 mol/L 时,滤液中 Zn 含量达到峰值。有机酸浓度为 1.0 mol/L 时,柠檬酸溶液和醋酸溶液淋洗 1 次后滤液中 Zn 含量相差不大,但是醋酸溶液淋洗 2 次后相比柠檬酸溶液淋洗出 Zn 含量较多(图 2)。因此,对重金属 Zn 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是醋酸溶液,最佳淋洗浓度为 1.0 mol/L。

柠檬酸溶液和醋酸溶液淋洗 1 次后,对于重金属 Pb 的淋洗效果表现为有机酸浓度为 0.1、0.7 mol/L 时,柠檬酸溶液>醋酸溶液;有机酸浓度为 0.4、1.0 mol/L 时,柠檬酸溶液<醋酸溶液,当有机酸浓度为 1.0 mol/L 时,醋酸溶液淋洗效果最佳,柠檬酸溶液淋洗仅 1 次,变化趋势是先增后减,且滤液中重金属 Pb 含量差别不大,无法选择出最佳淋洗浓度,故再分析经醋酸溶液淋洗 2 次后滤液中的 Pb 含量。当有机酸浓度为 0.7 mol/L 时,醋酸溶液淋洗 1 次和柠檬酸溶液淋洗后滤液中 Pb 含量差别不大,但是醋酸溶液淋洗 2 次和柠檬酸溶液淋洗后滤液中 Pb 含量差别很大,0.7 mol/L 醋酸溶液淋洗 2 次时 Pb 含量最低。有机酸浓度为 1.0 mol/L 时,醋酸溶液淋洗 1、2 次和柠檬酸溶液淋洗后滤液中 Pb 含量均差别不大,故在选择最佳淋洗剂时应考虑淋洗多次的效果,选择柠檬酸作为最佳淋洗剂较为合适(图 3)。因此,对重金属 Pb 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是柠檬酸溶液,最佳淋洗浓度为 0.7 mol/L。

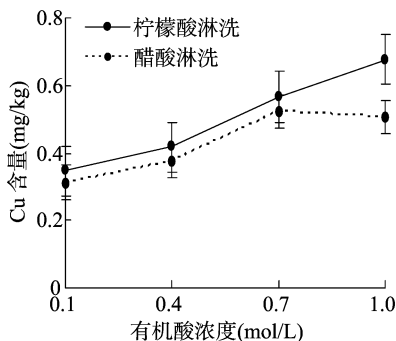


图1 有机酸淋洗后土样中 Cu 含量

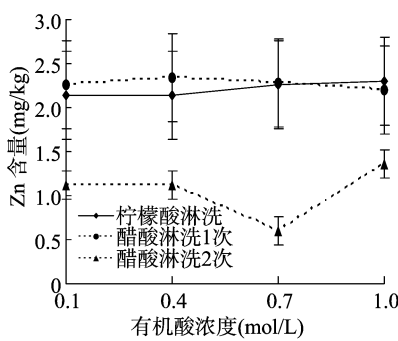


图2 有机酸淋洗后土样中 Zn 含量

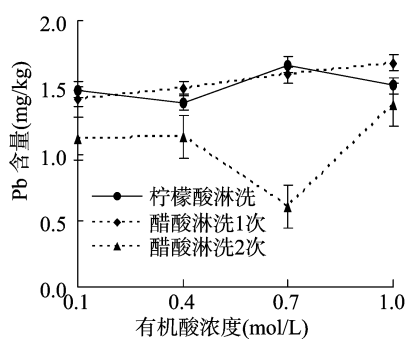


图3 有机酸淋洗后土样中 Pb 含量

有机酸溶液为 0.1、0.4、0.7、1.0 mol/L 时,对重金属 Cd 的淋洗效果表现为柠檬酸溶液 > 醋酸溶液(图 4)。因此,对重金属 Cd 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是柠檬酸溶液,最佳淋洗浓度为 0.4 mol/L。

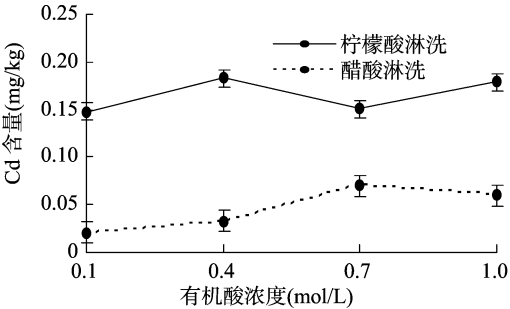


图4 有机酸淋洗后土样中 Cd 含量

2.2 有机酸淋洗后,石灰水处理对重金属污染土壤的修复效果分析

用 0.2% 石灰水溶液对 1~12 号土样淋洗 2 次,对 13~24 号土样淋洗 1 次,分别用漏斗对淋洗液进行过滤,收集滤液并转移至烧杯。试验采用石灰水对经有机酸淋洗后的土样进行处理的目的是进行酸碱中和,调节土样的 pH 值,使其达到能够维持作物正常生长的 pH 值范围。通过用石灰水对经

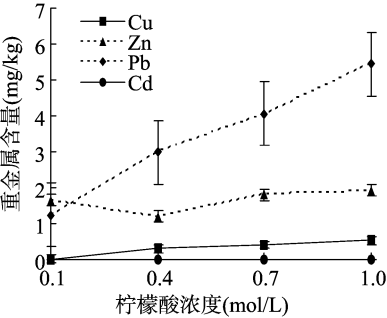


图5 柠檬酸淋洗后土样经石灰水淋洗 1 次后滤液中重金属含量

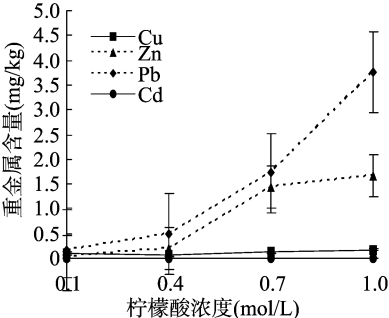


图6 柠檬酸淋洗后土样经石灰水淋洗 2 次后滤液中重金属含量

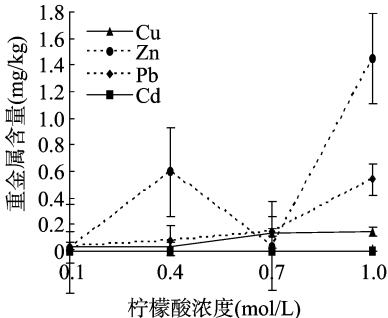


图7 醋酸淋洗后土样经石灰水淋洗 1 次后滤液中重金属含量

2.3 石灰水处理对土壤的 pH 值以及电导率影响分析

土壤 pH 值在 4.5 以下时很难维持作物的生长,因此调节有机酸淋洗后土样的 pH 值很有必要,测定经有机酸淋洗后石灰水处理的土样滤液的 pH 值及电导率对维持作物的正常生长具有重要意义。

利用带复合玻璃电极的 pH 计和 DDP-210 型便携式电导率仪测定的经第 1 次水洗后土样滤液的 pH 值及电导率(表 1),从表 1 看出未经石灰水处理的土壤 pH 值大多在 3.3~3.6 范围内,均 <4.5 (维持作物生长的临界值)<sup>[19]</sup>,此时土样不能维持作物生长。

测定经有机酸淋洗后土样滤液的 pH 值及电导率(表 2),从表 2 看出未经石灰水处理的土壤 pH 值大多在 2.3~2.4 范围内,均 <4.5,且土样的 pH 值随有机酸浓度增加而降低,变化趋势平稳;分析经有机酸淋洗后的土样的电导率,得出电导率随有机酸浓度增加而升高,在相同浓度下,经有机酸淋洗后土样的电导率表现为柠檬酸溶液 > 醋酸溶液。

测定经有机酸淋洗后石灰水处理土样滤液的 pH 值及电导率(表 3),从表 3 看出经柠檬酸溶液淋洗后石灰水处理 2

有机酸淋洗过的土样进行处理,测定其滤液中重金属含量,分析其是否存在对重金属再次淋洗的作用,进而比较在不同的酸性条件下,石灰水处理对重金属污染土壤的修复效果。

柠檬酸溶液淋洗后的土样经石灰水淋洗 1~2 次后滤液中重金属含量随着柠檬酸溶液浓度增加而增加,石灰水淋洗后滤液中重金属含量增加,石灰水对重金属污染的土壤淋洗效果与柠檬酸溶液的浓度呈正相关,其中对 Pb 淋洗效果最为明显,其次是 Zn、Cu、Cd 的淋洗效果变化较为稳定,Cd 基本处于平稳状态,经石灰水淋洗 1 次后滤液中 Cd 含量接近于 0,经石灰水淋洗 2 次后滤液中 Cd 含量为 0(图 5、图 6)。

醋酸溶液淋洗后的土样经石灰水淋洗 1 次后滤液中重金属含量大致随着醋酸溶液浓度增加而增加,石灰水对重金属污染的土壤淋洗效果与醋酸溶液的浓度呈正相关,其中对 Zn 淋洗效果最为明显,其次是 Pb、Cu 的淋洗效果变化较为稳定,Cd 淋洗后滤液中重金属含量为 0(图 7)。

综合分析图 5 至图 7,重金属 Cd 淋洗后滤液中含量几乎为 0,这与石灰水对其溶解能力有关,但其主要因素是土样经有机酸淋洗后重金属 Cd 含量已大大减少,因此,再经石灰水处理后滤液中重金属 Cd 含量会接近于 0,甚至为 0。因此,石灰水对重金属污染的土壤淋洗效果与有机酸浓度呈正相关,即酸性条件越强,对重金属的淋洗效果越好。

表 1 经第 1 次水洗后土样滤液的 pH 值、电导率

土壤号	pH 值	电导率 (mS/cm)
1~3	3.3	9.456
4~6	3.3	9.903
7~9	3.3	9.440
10~12	3.3	10.400
13~15	3.3	7.866
16~18	3.3	7.834
19~21	3.6	7.856
22~24	3.5	8.278

表 2 有机酸淋洗后土样滤液的 pH 值、电导率

有机酸浓度 (mol/L)	柠檬酸		醋酸	
	pH 值	电导率 (mS/cm)	pH 值	电导率 (mS/cm)
0.1	2.4	16.533	2.4	5.329
0.4	2.4	24.677	2.4	6.234
0.7	2.3	25.466	2.4	6.600
1.0	2.3	26.866	2.4	7.160

次的土样和经醋酸溶液淋洗后石灰水处理 1 次的土样的 pH 值较为理想,大多在 5.0 以上 ( $>4.5$ ), 符合作物正常生长对土壤 pH 值的要求范围(5.0~8.0),且土样的 pH 值随有机酸

浓度增加而降低;分析经石灰水处理的土样的电导率,得出电导率随有机酸浓度增加而升高,在相同浓度下表现为柠檬酸溶液  $>$  醋酸溶液。

表 3 石灰水处理后土样滤液的 pH 值、电导率

有机酸浓度 (mol/L)	柠檬酸				醋酸	
	第 1 次淋洗		第 2 次淋洗		pH 值	电导率 (mS/cm)
	pH 值	电导率(mS/cm)	pH 值	电导率(mS/cm)		
0.1	5.4	5.373	8.0	3.010	7.6	4.207
0.4	3.3	7.465	7.9	3.302	7.5	4.473
0.7	2.9	8.180	7.8	4.067	6.7	5.403
1.0	2.8	11.383	4.0	3.755	4.3	7.500

### 3 结论

对重金属 Cu、Cd、Pb 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是柠檬酸溶液,最佳淋洗浓度分别为 1.0、0.4、0.7 mol/L;对重金属 Zn 污染土壤修复时,最佳淋洗剂是醋酸溶液,最佳淋洗浓度为 1.0 mol/L;石灰水对重金属污染的土壤淋洗效果与有机酸浓度呈正相关,即酸性条件越强,对重金属的淋洗效果越好。石灰水处理可使土样 pH 值增加,以维持作物的正常生长。试验证明,经柠檬酸溶液淋洗后石灰水处理 2 次的土样和经醋酸溶液淋洗后石灰水处理 1 次的土样的 pH 值较为理想,大多在 5.0 以上 ( $>4.5$ ) (维持作物生长的临界值)。经石灰水处理的土样的电导率随有机酸浓度增加而升高,在相同浓度下表现为柠檬酸溶液  $>$  醋酸溶液。

### 参考文献:

- [1] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 刘春早,黄益宗,雷 鸣,等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学,2012,33(1):260-265.
- [3] 刘春早,黄益宗,雷 鸣,等. 重金属污染评价方法(TCLP)评价资江流域土壤重金属生态风险[J]. 环境化学,2011,30(9):1582-1589.
- [4] 梁彦秋,潘 伟,刘婷婷,等. 沈阳张士沟灌区土壤重金属元素形态分析[J]. 环境科学与管理,2006,31(2):43-45.
- [5] 朱桂芬,张春燕,王建玲,等. 新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(2):263-268.
- [6] 李玉双,胡晓钧,孙铁珩,等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展[J]. 生态学杂志,2011,30(3):596-602.
- [7] 孙 涛,陆扣萍,王海龙. 不同淋洗剂和淋洗条件下重金属污染土壤淋洗修复研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2015,32(1):140-149.
- [8] 吕青松,蒋煜峰,杨 帆,等. 重金属污染土壤淋洗技术研究进展[J]. 甘肃农业科技,2010(3):33-37.
- [9] 倪才英,田光明,骆永明,等. 有机化合物和硝酸溶液对复合污染土壤中 Cu、Zn、Pb 释放的影响[J]. 土壤学报,2004,41(2):237-244.
- [10] 可 欣,李培军,张 昀,等. 利用乙二胺四乙酸淋洗修复重金
- 属污染的土壤及其动力学[J]. 应用生态学报,2007,18(3):601-606.
- [11] 杨 维,张宏波,郭海霞,等. 一种修复 Cd/Cu 污染土壤的复合淋洗剂的应用研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(5):840-844.
- [12] 赵 娜,崔岩山,付 彧,等. 乙二胺四乙酸(EDTA)和乙二胺二琥珀酸(EDDS)对污染土壤中 Cd、Pb 的浸提效果及其风险评估[J]. 环境化学,2011,30(5):958-963.
- [13] Ji Z G, Xu Z, Wang W, et al. Selective and multi-step leaching of valuable metals from scrap copper-smelting sludge[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 737(1):642-645.
- [14] 邹泽李. 工业废弃地重金属污染土壤化学淋洗修复研究及工程示范[D]. 广州:中山大学,2009.
- [15] Jean-Soro L, Bordas F, Bollinger J C. Column leaching of chromium and nickel from a contaminated soil using EDTA and citric acid[J]. Environmental Pollution, 2012, 164(1):175-181.
- [16] Ramamurthy A S, Vo D, Li X J, et al. Surfactant-enhanced removal of Cu(II) and Zn(II) from a contaminated sandy soil[J]. Water Air & Soil Pollution, 2008, 190(1/2/3/4):197-207.
- [17] US EPA. Building on success: protecting human health and the environment(FY 2007 superfund annual report)[R]. Washington, DC:US Environmental Protection Agency, 2008, 32(1):13-15.
- [18] 王向健,郑玉峰,赫冬青. 重金属污染土壤修复技术现状与展望[J]. 环境保护科学,2004,30(2):48-49.
- [19] 易龙生,王文燕,刘 阳,等. 柠檬酸、EDTA 和茶皂素污染土壤重金属的淋洗效果研究[J]. 安全与环境学报,2014,14(1):225-228.
- [20] 冯 静,张增强,李 念,等. 铅锌厂重金属污染土壤的螯合剂淋洗修复及其应用[J]. 环境工程学报,2015,9(11):5617-5625.
- [21] 孙 涛,毛霞丽,陆扣萍,等. 柠檬酸对重金属复合污染土壤的浸提效果研究[J]. 环境科学学报,2015,35(8):2573-2581.
- [22] 刘需昊,吴克宁,罗 明,等. 农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区[J]. 农业工程学报,2016,32(23):254-262.
- [23] 易龙生,王文燕,陶 冶,等. 有机酸对污染土壤重金属的淋洗效果研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(4):701-707.
- [24] 陈海凤,莫良玉,范稚莲. 有机酸对重金属污染耕地土壤的修复研究[J]. 现代农业科学,2009,16(3):141-143.