

化学淋洗法对重金属复合污染土壤的淋洗效率试验研究

朱爽爽¹, 彭超², 向斌^{3*}, 秦中建⁴

¹重庆源皓科技有限责任公司技术部, 重庆

²重庆巨川环境工程有限公司技术部, 重庆

³重庆大学化学化工学院, 重庆

⁴重庆市生态环境工程评估中心工业部, 重庆

收稿日期: 2025年2月13日; 录用日期: 2025年3月13日; 发布日期: 2025年4月2日

摘要

采用乙二胺四乙酸(EDTA)及柠檬酸(CA)复配淋洗剂, 固定淋洗液与土壤的固液比、淋洗时间, 探究淋洗液复配浓度、淋洗次数对本项目三种重金属污染土壤的淋洗效果。结果表明, 采用1mM EDTA + 1mM CA复配淋洗剂, 固液比1:5, 淋洗时间0.5 h, 淋洗一次时, 三种重金属污染土壤的去除率均最佳; 在上述淋洗条件下, 继续增加淋洗次数, 三种重金属污染土壤的去除率均有所提升, 但对于高浓度汞污染土壤, 仅采用化学淋洗法无法将其有效去除, 且淋洗成本较高, 因此可考虑结合其它修复技术进行治疗。本研究对不同浓度汞污染土壤、重金属砷、钴复合污染土壤淋洗修复工艺和工程应用具有一定的指导意义。

关键词

重金属污染土壤, 乙二胺四乙酸, 柠檬酸, 淋洗效果, 去除率

Experimental Study on Leaching Efficiency of Chemical Leaching Method for Heavy Metal Contaminated Soil

Shuangshuang Zhu¹, Chao Peng², Bin Xiang^{3*}, Zhongjian Qin⁴

¹Technical Department of Chongqing Yuanhao Technology Co., Ltd., Chongqing

²Technical Department of Chongqing Juchuan Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing

⁴Industrial Department of Chongqing Ecological Environment Engineering Assessment Center, Chongqing

Received: Feb. 13th, 2025; accepted: Mar. 13th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 朱爽爽, 彭超, 向斌, 秦中建. 化学淋洗法对重金属复合污染土壤的淋洗效率试验研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 413-420. DOI: 10.12677/aep.2025.154048

Abstract

Using a compound leaching agent of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) and citric acid (CA), the solid-liquid ratio and leaching time of the leaching solution and soil were fixed to investigate the leaching effect of the complex concentration and leaching frequency of the leaching solution on the three heavy metal polluted soils in this project. The results showed that the removal rates of the three heavy metal polluted soils were optimal when using a 1mM EDTA + 1mM CA compound leaching agent, with a solid-liquid ratio of 1:5 and a leaching time of 0.5 h, after one leaching; Under the above washing conditions, increasing the washing frequency further improves the removal rates of the three heavy metal polluted soils. However, for high concentration mercury polluted soils, chemical washing alone cannot effectively remove them, and the washing cost is high. Therefore, other remediation techniques can be considered for treatment. This study has certain guiding significance for the leaching and remediation process and engineering application of soils contaminated with different concentrations of mercury, heavy metals arsenic and cobalt.

Keywords

Heavy Metal Contaminated Soil, Ethylene Diamine Tetraacetic Acid, Citric Acid, Rinsing Effect, Removal Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤不仅是生态环境系统中不可或缺的组成部分, 而且也是地球上生物赖以生存的基础。目前, 随着现代化工业的高速发展、城市化进程的加快以及各种产业结构的调整, 遗留了大量受重金属污染的地块[1]-[4]。重金属是指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属, 包括铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Cr)、砷(As)、钴(Co)等, 土壤重金属污染具有高毒性、污染隐蔽性、累积性、不可逆性等特点[5], 目前, 重金属危害人体的主要途径是其通过食物进入人体, 土壤中的重金属一旦经自然界植物的根茎吸收进入植物体内, 富集到植物的茎叶与果实中, 随后进入到食物链, 就会对其他生物的健康造成严重的威胁[6] [7]。重金属污染土壤的修复工作一直是环境领域研究的热点问题, 备受国内外研究学者的关注。

目前, 重金属污染土壤主要修复技术包括化学淋洗、固化/稳定化、生物修复等[8]-[12], 其中, 化学淋洗技术以其高效、修复效果彻底稳定、修复周期短、修复范围广及治理费用低廉[13]等优点逐渐成为重金属污染土壤治理的首选修复技术, 广泛应用于实际修复工程中[14], 化学淋洗技术是一种操作便捷且高效的土壤污染修复技术, 主要是使用能溶解、螯合或者迁移重金属的淋洗液, 将吸附在土壤颗粒表面的重金属从固相转移到液相, 形成溶解性的金属离子或者络合物, 从而达到修复污染土壤的目的[15] [16]。土壤化学淋洗技术的关键在于淋洗剂的选择, 近年来, 广泛应用于土壤修复工程的淋洗剂有乙二胺四乙酸(EDTA)及柠檬酸(CA)等[17]。EDTA 是一类人工合成、含氨基及羧基基团的螯合剂, 其价格低廉, 目前应用较为广泛; EDTA 作用的 pH 值范围较广, 对环境影响不敏感, 在溶液环境 pH 值为 3~8 时, 可以与土壤中大部分重金属离子进行络合, 与之形成稳定的复合物, 从而促进重金属的解析, 同时对土壤的物理结构和理化性质影响较小[18]; 然而已有研究文献[19]发现, EDTA 虽修复范围广, 但因其自身不可降解特性以及能提高重金属在土壤中的迁移能力, 可能会造成环境的二次污染从而增加人类健康风险。

CA 为分子量低的有机酸，自身可生物降解，是一种环境友好的天然淋洗剂，能通过释放 H^+ 改变土壤中重金属的形态，也可与重金属离子形成可溶性的络合物促进金属离子的解析，从而达到去除重金属的目的，但有机酸能修复的重金属对象有限，且容易使土壤酸化[20]-[22]。

目前，关于上述两种单一淋洗剂在修复重金属污染土壤方面的使用及其淋洗机理研究相对详尽。Wei [23] 等通过研究表明发现 EDTA 对重金属 Cd 的去除率与淋洗剂浓度及淋洗时间等条件相关，杨冰凡等 [24] 研究了 EDTA 浓度、淋洗时间、液固比、淋洗次数等因素对土壤中重金属去除效果的影响，结果表明，较高的淋洗剂浓度和液固比、较长的淋洗时间以及较多的淋洗次数，对重金属的去除效率越好；易龙生[25]等探究了柠檬酸等小分子有机酸对重金属 Cu、Zn、Pb 与 Cd 的去除效果，结果表明柠檬酸对重金属的去除能力均依次为 $Cd > Zn > Pb > Cu$ ，去除率分别为 59.5%、49.3%、43.5%、26.3%。单一淋洗剂虽然能修复重金属，但对重金属的淋洗特性各不相同，去除率较低，且针对存在多类复合重金属污染的地块，单一淋洗剂无法起到很好的修复效果，因此，为了提高其对多类重金属的淋洗去除效率，淋洗剂的复配就显得尤为重要。

复配淋洗剂主要是指在土壤修复中使用两种及以上的淋洗剂，不同种类的淋洗剂可呈现不同的协同效应，发挥各自的优势，从而提高淋洗效率，同时可以减少对土壤理化性质的改变，避免产生二次污染与潜在环境风险；目前复合淋洗研究中关于螯合剂 - 有机酸的混合淋洗应用较广[26]。刘霞等[27]研究了 EDTA、CA 淋洗剂对土壤中 Cu、Pb 的淋洗修复效果，结果表明，两种淋洗剂对土壤中 Cu、Pb 的淋洗百分率大小表现为：EDTA > CA，Guo [28]，尹雪[29]等研究发现 CA 复合 EDTA 可增强复配淋洗剂对土壤中重金属的去除效果。

淋洗剂的效率与众多因素相关，包括淋洗浓度、淋洗时间、复配比例、淋洗次数等，本研究以重庆某化工厂重金属污染地块的土壤为实验对象，通过研究 EDTA 及 CA 淋洗浓度、淋洗次数对不同重金属的去除率，确定适合本项目污染土壤的最佳淋洗工艺参数，从而为该类重金属污染土壤的淋洗修复技术及相关参数提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 供试土壤

供试土壤来自重庆市废弃的某化工厂场地，主要受汞、砷、钴重金属单一或复合污染，根据后期规划用地性质，该场地修复目标值采用《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)中第一类用地筛选值。根据场地重金属污染特点，初步选择三类污染土壤进行实验，其中 A、B 土壤分别为单独汞污染土壤(场地重金属汞的污染浓度远高于修复目标值，因此设置高低两种污染浓度，A 为高浓度汞污染土，B 为低浓度汞污染土)，C 土壤为砷、钴复合污染土壤，实验土壤经现场取样风干后，研磨过网孔直径为 10 mm 的过滤筛后混匀，贴好标签并装入聚乙烯塑料袋中密封，送入第三方检测单位进行分析检测，用于测定重金属全量，其测定结果见表 1。

Table 1. The total amount of heavy metals in the tested soils(mg/kg)
表 1. 供试土壤重金属全量(mg/kg)

实验土壤	汞	砷	钴
修复目标值	8	20	20
A	655		
B	11.4		
C		32.4	31.2

2.2. 试剂与装置

- 1) 实验药品。实验所用淋洗剂主要为乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA)及柠檬酸(CA)，纯度均为分析纯(AR)。
- 2) 实验仪器。本文所用的仪器设备及具体信息如下：电热鼓风干燥箱(DHG-9055A，上海一恒科学仪器有限公司)；悬臂式电动搅拌器(SR-OES-40M，常州苏瑞仪器有限公司)；电子天平(JE2002，上海浦春计量仪器有限公司)。

2.3. 实验方法

2.3.1. 不同浓度 EDTA 和 CA 药剂对污染土壤的淋洗实验

污染土壤 A：称取 600 g 的污染土壤分别于 2 L 的量杯中，其中一份加入 1 mM 的 EDTA 及 1 mM 的 CA，另一份加入 0.5 mM 的 EDTA 及 4 mM 的 CA，保持固液比为 1:5，用电动搅拌器进行搅拌淋洗，淋洗时间为 0.5 h，静置后倒出上层液体，下层固体放入烘箱 28 摄氏度烘干，得到的样品均送第三方检测单位进行污染重金属的含量检测。

污染土壤 B：称取 500 g 的土壤三份分别于 2 L 的量杯中，其中一份加入 0.5 mM 的 EDTA 及 0.5 mM 的 CA，另两份分别加入 1 mM 的 EDTA、1 mM 的 CA 及 2 mM 的 EDTA、2 mM 的 CA，保持固液比为 1:5，用电动搅拌器进行搅拌淋洗，淋洗时间为 0.5 h，静置后倒出上层液体，下层固体放入烘箱 28 摄氏度烘干，得到的样品均送第三方检测单位进行污染重金属的含量检测。

污染土壤 C：称取 500 g 的土壤三份分别于 2 L 的量杯中，其中一份加入 1 mM 的 EDTA 及 1 mM 的 CA，另两份分别加入 2 mM 的 EDTA、2 mM 的 CA 及 0.5 mM 的 EDTA、4 mM 的 CA，保持固液比为 1:5，用电动搅拌器进行搅拌淋洗，淋洗时间为 0.5 h，静置后倒出上层液体，下层固体放入烘箱 28 摄氏度烘干，得到的样品均送第三方检测单位进行污染重金属的含量检测。

三种污染土壤淋洗实验药剂配比方案详见表 2：

Table 2. Three types of experimental reagents for leaching polluted soil proportioning scheme
表 2. 三种污染土壤淋洗实验药剂配比方案

污染土壤类别	EDTA	柠檬酸	固液比	土壤重量	淋洗时间	淋洗次数
污染土壤 A	1 mM	1 mM		600 g		
	0.5 mM	4 mM				
污染土壤 B	0.5 mM	0.5 mM	1:5	500 g	0.5 h	1
	1 mM	1 mM				
	2 mM	2 mM				
污染土壤 C	1 mM	1 mM				
	2 mM	2 mM				
	0.5 mM	4 mM				

备注：污染土壤质量、EDTA 及 CA 浓度的选取与污染土壤的种类，含量有关。

2.3.2. 增加淋洗次数对污染土壤的淋洗实验

三种类型污染土壤 A、B、C 经不同浓度淋洗剂淋洗一次后，除污染土壤 B 淋洗后的重金属含量达到修复目标值外，其余两种类型的污染土重金属含量均不满足项目地块修复目标值，查阅相关文献[30][31]可知，淋洗次数可能会对重金属的去除率产生影响，因此，针对污染土壤 A 和污染土壤 C，保持固液比、

淋洗液浓度、淋洗时间等其它条件不变，增加淋洗次数来进行实验，具体实验步骤见表 3：

Table 3. Two experimental schemes for the number of leaching cycles of polluted soil
表 3. 两种污染土壤淋洗次数实验方案

污染土壤类别	EDTA	柠檬酸	固液比	土壤重量	淋洗时间	淋洗次数
污染土壤 A	1 mM	1 mM	1:5	800 g	0.5 h	2
						3
						4
污染土壤 C						2
						3

2.4. 分析方法

检测单位采用原子荧光光度计测定淋洗前后污染土壤重金属的含量。
土壤淋洗前测定的污染重金属含量为 W1(mg/kg)，淋洗后测定的污染土壤相应重金属含量为 W2(mg/kg)，即可得到重金属的去除率 W(%)。重金属的去除率计算公式如式(1)所示。

$$W = \frac{W1 - W2}{W1} * 100$$

(1)

3. 结果与讨论

3.1. 不同浓度 EDTA 和 CA 药剂对污染土壤去除率的影响

土壤中重金属的去除率与淋洗剂的复配浓度有关，淋洗剂浓度过高或过低均不利于重金属淋洗效果，因此需对复配药剂的浓度进行优化。不同浓度 EDTA 和 CA 两种淋洗剂对本项目中三类污染土壤重金属的去除率结果见表 4~6。

由表 4~6 可知，EDTA 和 CA 复配淋洗剂对不同浓度的重金属汞污染土壤都有较好的去除效果，对重金属砷和钴的去除率也能达到三分之一以上。其中，对于污染土壤 A、C，当 EDTA 与 CA 浓度分别为 1 mM，1 mM 时，重金属中高浓度汞、砷、钴的去除率最大，原因可能是相对 CA 而言，EDTA 与重金属反应的稳定系数较高，随着 EDTA 与 CA 复配浓度的增加，导致混合淋洗液中的 pH 值逐渐升高，酸解作用减弱从而无法有效促进重金属离子的解吸[32]，因此复配浓度较低时，对三种重金属的去除效率高；而对于污染土壤 B，当 EDTA 与 CA 浓度分别为 2 mM，2 mM 时，重金属中低浓度汞的去除率最佳，说明 EDTA 与 CA 浓度较高时，能促进该土壤中低浓度汞与复配淋洗剂发生强烈的络合作用而生成稳定的水溶性络合物，从而增加淋洗效率[33]。

结合本项目地块的修复目标值，三种重金属污染土壤中，仅污染土壤 B 经一次淋洗就达到了修复目标值，其余两种污染土壤均不满足修复目标值要求，因此针对污染土壤 A、C，后续考虑先增加淋洗次数，保持固液比，搅拌时间，淋洗时间等条件不变，进行实验。

Table 4. The removal efficiency results of two different concentrations of EDTA and CA leaching agents on polluted soil A
表 4. 不同浓度 EDTA 和 CA 两种淋洗剂对污染土壤 A 的去除率结果

样品编号	EDTA	柠檬酸	重金属汞			是否满足修复目标值
			W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	
S-1	1 mM	1 mM	655	254	61	否
S-2	0.5 mM	4 mM		283	57	

Table 5. The removal efficiency results of two different concentrations of EDTA and CA leaching agents on polluted soil B
表 5. 不同浓度 EDTA 和 CA 两种淋洗剂对污染土壤 B 的去除率结果

样品编号	EDTA	柠檬酸	重金属汞			是否满足修复目标值
			W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	
H-1	0.5 mM	0.5 mM		2.73	76	是
H-2	1 mM	1 mM	11.4	1.42	88	
H-3	2 mM	2 mM		1.25	89	

Table 6. The removal efficiency results of two different concentrations of EDTA and CA leaching agents on polluted soil C
表 6. 不同浓度 EDTA 和 CA 两种淋洗剂对污染土壤 C 的去除率结果

样品编号	EDTA	柠檬酸	重金属砷			重金属钴			是否满足修复目标值
			W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	
X-1	1 mM	1 mM		19.7	39		20.7	34	否
X-2	2 mM	2 mM	32.4	19.8	39	31.2	23.2	26	
X-3	0.5 mM	4 mM		29.2	10		19.8	37	

3.2. 淋洗次数对污染土壤去除率的影响

针对未达到修复目标值的污染土壤 A、C, 结合 2.1 章节中两种污染土壤的最佳复配淋洗剂浓度(EDTA 及 CA 均为 1 mM), 增加淋洗次数后得到的结果见表 7~8 所示:

Table 7. Results of removal efficiency of polluted soil A with different washing times
表 7. 不同淋洗次数对污染土壤 A 的去除率结果

样品编号	淋洗次数	重金属汞			是否满足修复目标值
		W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	
Y-1	2		52.8	92	否
Y-2	3	655	38	95	
Y-3	4		27.6	96	

Table 8. Results of removal efficiency of polluted soil C with different washing times
表 8. 不同淋洗次数对污染土壤 C 的去除率结果

样品编号	淋洗次数	重金属砷			重金属钴			是否满足修复目标值
		W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	W1/mg/kg	W2/mg/kg	去除率 W/%	
M-1	2		18.1	44		20.1	36	否
M-2	3	32.4	16.2	50	31.2	19.7	37	

由表 7~8 可知, 随着淋洗次数的增加, 污染土壤重金属的去除率有显著提升。结合本项目地块的修复目标值, 污染土壤 C 经二次或三次淋洗后, 重金属污染物浓度就达到了修复目标值, 而污染土壤 A 经多次淋洗后, 土壤中的重金属汞逐渐被淋洗出来, 即残留在土壤中的汞逐渐降低, 但随着此数的增加, 其去除率增长较缓慢, 且药剂消耗成本和工程费用成本显著上升, 因此该类高浓度汞污染土壤需结合淋洗及其他修复技术才能达到本项目的修复目标值。

4. 结论

- 1) 采用 EDTA 与 CA 复配淋洗本项目三种重金属污染土壤, 按照固液比为 1:5, 淋洗时间为 0.5 h, 当 EDTA 与 CA 的浓度均为 1 mM 时, 去除率明显高于其它三种浓度。
- 2) 在相同的淋洗条件下, 增加淋洗次数能显著提高污染土壤中重金属的去除率。
- 3) 对于高浓度汞污染土壤, 采用 EDTA 与 CA 复配或增加淋洗次数虽能使其含量大大降低, 但随着淋洗次数的增加, 修复成本会显著提高, 因此需考虑结合其他修复技术来达到要求。

参考文献

- [1] 雍正, 罗泽娇, 宋萌萌, 等. 武汉某退役电镀车间场地土壤重金属污染及形态分析[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(3): 46-50, 59.
- [2] He, Z., Shen, J., Ni, Z., Tang, J., Song, S., Chen, J., *et al.* (2015) Electrochemically Created Roughened Lead Plate for Electrochemical Reduction of Aqueous CO₂. *Catalysis Communications*, **72**, 38-42. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2015.08.024>
- [3] 罗泽娇, 李冉, Mohammed, A.S.A., 等. 某钢管厂退役场地土壤重金属污染特征分析[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(4): 75-81.
- [4] 黄正玉, 包亮, 刘小龙, 等. 某磷化工企业污染地块土壤污染状况调查案例分析[J]. 环保科技, 2021, 6(27): 41-46.
- [5] 韩君. 黏土矿物对南方酸性水稻田重金属污染钝化修复效应和机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [6] 刘青林. 高浓度重金属复合污染土壤的复配淋洗技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [7] Xiong, T., Dumat, C., Pierart, A., Shahid, M., Kang, Y., Li, N., *et al.* (2016) Measurement of Metal Bioaccessibility in Vegetables to Improve Human Exposure Assessments: Field Study of Soil-Plant-Atmosphere Transfers in Urban Areas, South China. *Environmental Geochemistry and Health*, **38**, 1283-1301. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9796-2>
- [8] 朱瑞利. EDTA 淋洗重金属污染土壤的修复应用实例[J]. 云南化工, 2021, 48(5): 95-97.
- [9] Piccolo, A., De Martino, A., Scognamiglio, F., Ricci, R. and Spaccini, R. (2021) Efficient Simultaneous Removal of Heavy Metals and Polychlorobiphenyls from a Polluted Industrial Site by Washing the Soil with Natural Humic Surfactants. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 25748-25757. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12484-x>
- [10] 孙涛. 柠檬酸和 EDTA 对重金属复合污染土壤的浸提效果研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [11] Hu, W., Niu, Y., Zhu, H., Dong, K., Wang, D. and Liu, F. (2021) Remediation of Zinc-Contaminated Soils by Using the Two-Step Washing with Citric Acid and Water-Soluble Chitosan. *Chemosphere*, **282**, Article ID: 131092. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131092>
- [12] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 213-222.
- [13] 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.
- [14] 黄川, 李柳, 黄珊, 等. 重金属污染土壤的草酸和 EDTA 混合淋洗研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(8): 3480-3486.
- [15] Ullmann, A., Brauner, N., Vazana, S., Katz, Z., Goikhman, R., Seemann, B., *et al.* (2013) New Biodegradable Organic-Soluble Chelating Agents for Simultaneous Removal of Heavy Metals and Organic Pollutants from Contaminated Media. *Journal of Hazardous Materials*, **260**, 676-688. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.027>
- [16] Liu, C. and Lin, Y. (2013) Reclamation of Copper-Contaminated Soil Using EDTA or Citric Acid Coupled with Dissolved Organic Matter Solution Extracted from Distillery Sludge. *Environmental Pollution*, **178**, 97-101. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.034>
- [17] 陈果. 重金属污染土壤化学修复剂的研究进展[J]. 应用化工, 2017, 9(46): 1810-1814.
- [18] Beiyuan, J., Tsang, D.C.W., Valix, M., Baek, K., Ok, Y.S., Zhang, W., *et al.* (2018) Combined Application of EDDS and EDTA for Removal of Potentially Toxic Elements under Multiple Soil Washing Schemes. *Chemosphere*, **205**, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.081>
- [19] Begum, Z.A., Rahman, I.M.M., Tate, Y., Sawai, H., Maki, T. and Hasegawa, H. (2012) Remediation of Toxic Metal Contaminated Soil by Washing with Biodegradable Aminopolycarboxylate Chelants. *Chemosphere*, **87**, 1161-1170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.032>
- [20] 向玥皎, 刘阳生. 柠檬酸、草酸对污染土壤中铅锌的静态浸提实验研究[J]. 环境工程, 2015, 33(9): 153-157.
- [21] 黎诗宏, 蒋卉, 朱梦婷, 等. 有机酸对成都平原镉污染土壤的淋洗效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3227-3232.

-
- [22] Wuana, R.A., Okieimen, F.E. and Imborvungu, J.A. (2010) Removal of Heavy Metals from a Contaminated Soil Using Organic Chelating Acids. *International Journal of Environmental Science & Technology*, **7**, 485-496. <https://doi.org/10.1007/bf03326158>
- [23] Wei, M., Chen, J. and Wang, X. (2016) Removal of Arsenic and Cadmium with Sequential Soil Washing Techniques Using Na₂ EDTA, Oxalic and Phosphoric Acid: Optimization Conditions, Removal Effectiveness and Ecological Risks. *Chemosphere*, **156**, 252-261. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.106>
- [24] 杨冰凡, 胡鹏杰, 李柱, 等. 重金属高污染农田土壤 EDTA 淋洗条件初探[J]. 土壤, 2013, 45(5): 928-932.
- [25] 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(4): 701-707.
- [26] Cao, M., Hu, Y., Sun, Q., Wang, L., Chen, J. and Lu, X. (2013) Enhanced Desorption of PCB and Trace Metal Elements (Pb and Cu) from Contaminated Soils by Saponin and EDDS Mixed Solution. *Environmental Pollution*, **174**, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.015>
- [27] 刘霞, 王建涛, 张萌, 等. 螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染填土的淋洗修复[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1590-1597.
- [28] Guo, X., Wei, Z., Wu, Q., Li, C., Qian, T. and Zheng, W. (2016) Effect of Soil Washing with Only Chelators or Combining with Ferric Chloride on Soil Heavy Metal Removal and Phytoavailability: Field Experiments. *Chemosphere*, **147**, 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.087>
- [29] 尹雪, 陈家军, 蔡文敏. EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3096-3101.
- [30] 谭学军, 向甲甲, 殷瑶, 等. 重金属污染土壤联合强化淋洗修复技术研究进展[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(4): 74-82.
- [31] 孙涛, 陆扣萍, 王海龙, 等. 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.
- [32] Rastas Amofah, L., Maurice, C., Kumpiene, J. and Bhattacharya, P. (2011) The Influence of Temperature, pH/Molarity and Extractant on the Removal of Arsenic, Chromium and Zinc from Contaminated Soil. *Journal of Soils and Sediments*, **11**, 1334-1344. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0411-y>
- [33] 贾俊峰, 黄阳, 刘方, 等. 汞矿区汞污染土壤的淋洗修复[J]. 化工环保, 2018, 38(2): 231-235.