

# 重金属污染土壤淋洗的最新进展

陈逸斌<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海申环环境工程有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2022年2月23日; 录用日期: 2022年3月25日; 发布日期: 2022年4月1日

## 摘要

土壤淋洗是指将淋洗剂注入到受重金属等污染的土壤中, 使污染物溶解或迁移到液相, 进而降低被污染土壤有害毒性的一种方法。现一般将土壤淋洗剂分为无机淋洗剂、螯合剂、表面活性剂和复合淋洗剂四种, 根据淋洗剂的不同和淋洗环境的不同, 淋洗效果也各有不同。

## 关键词

重金属, 土壤淋洗, 淋洗剂

# Latest Developments on the Washing Technology for Heavy Metal Contaminated Soil

Yibin Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Shenhuan Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 1<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Soil washing is a technology that injects a liquid medium as the washing solution into heavy metal contaminated soil to dissolve or remove the pollutants for further wastewater treatment, so as to reduce the harmful and toxic contaminants in the soil. Currently, there are four common types of washing reagents including inorganic solvents, chelating agents, surfactants, and compound agents. According to the different washing agents and washing environment, the effect is also dif-

ferent.

## Keywords

**Heavy Metal, Soil Washing, Soil, Washing Reagent**

Copyright © 2022 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. 淋洗法概念

土壤淋洗是指将可以是不同类型的试剂作为淋洗剂，把它们注入到受重金属等污染的土壤中[1]，并通过螯合、溶解等不同作用，使存在于固体中的重金属元素进入液体成分中，进而大幅度降低被污染土壤有害毒性的一种方法。淋洗法修复的土壤污染源可以是无机污染物或有机污染物，淋洗液[2]的种类很多，可以是无机或者有机溶剂，甚至可以是能够将污染物从土壤中带出的气体。根据当下的研究进展，相比黏土，化学淋洗法对砂土的去除率更高且更容易成功。

根据净化土壤污染时是否需要改变受污染土壤所在的位置，一般可以将土壤淋洗区分为异位和原位两种不同的修复方法。现在一般公认，原位修复技术在达到理想的既定治理目标时需要花费大量的时间，但是修复所需要的费用较少。而异位修复技术则被认为是一种能够在更短时间里获得相比原位法更有效去除效率的治理方式。

原位修复法是指在受污染的土壤中直接向下加入特制的化学淋洗剂。在重力等的作用下，淋洗剂可以通过土壤介质层层向下渗透，最终与土壤中的重金属污染物发生一系列反应，进而将重金属元素与土壤分离开，达到修复土壤的目的。这种原位法普遍应用于透水性强[3]、土壤空隙多、淋洗液便于渗透的土壤，具有如治理有效性长、操作简便等优点[4]。Budianta W. [5]等人就通过向已加入淋洗液的污染土壤注入高压气体，可以使污染土壤中的重金属和淋洗液更加高效反应的同时逐步将其分离。

异位化学淋洗技术通常通过物理或化学的方式把污染土壤从污染地转移出来，之后再淋洗剂进行淋洗，最后做到将土壤中的重金属污染物从土壤中剔除出去。异位法修复土壤相比原位法能够更好地收集土壤中淋出的液体，并对其中的重金属回收再利用。异位化学淋洗技术的适用范围非常广泛，不仅仅是重金属，就是石油类碳氢化合物或者易挥发有机物等污染的土壤都可采用异位淋洗法修复。

除了原位、异位修复的分类法，按淋洗剂在受污染土壤中的运行方式的不同，在淋洗操作过程中，我们还可以将淋洗法进行单级或者多级的区分。顾名思义，多级淋洗就是在单级淋洗的基础上通过积累淋洗液中的污染物质的量，来逐步清除土壤中的重金属污染物。多级淋洗[6]相比单级淋洗，不受平衡淋洗条件的影响，在处理方式上就显得尤其灵活，可以采用顺流、逆流或交叉等多种不同的工艺方式开展相关淋洗。

国外较早地开展了针对土壤淋洗去除重金属的研究，除了淋洗剂的研发、还针对如何在减少二次污染、增强土壤肥力等领域有了一定程度的研究。而国内相关研究在2016年《土壤污染防治行动计划》颁布后，针对淋洗技术的研究才逐渐兴起，研究领域仍主要集中在不同淋洗剂在国内不同类型土壤中的重金属去除效果上。本文较前人已有工作，相对系统地阐述了近年来国内外较热门淋洗剂配比、淋洗环境等淋洗技术的进展。

## 2. 淋洗剂的分类

### 2.1. 无机淋洗剂

在土壤淋洗的过程中，水是最简单也是最常见的无机淋洗剂之一，在去除土壤中的可溶性重金属盐方面能发挥出很好的作用。无机酸在水中能够分解产生  $H^+$  离子。而这些被分解出的  $H^+$  能够与吸附在受污染的土壤上的重金属发生离子交换等一系列反应，最终导致重金属和土壤分离。而无机酸[7]特有的酸性条件，也能够分解在土壤中存在的大量重金属氧化物，进而降低重金属在污染土中的含量。无机盐作为淋洗剂也主要是使土壤中的重金属溶解在液体内，其通常是与重金属形成可溶性螯合物来完成土壤净化的。无机淋洗剂在去除土壤中的重金属成分时能够取得很好的效果，有着省时低价等一系列的特点。然而无机淋洗剂也有一些必须承认的劣势，长期使用无机酸或者无机盐作为淋洗剂去除土壤中的重金属，在一定程度上会改变原本有待净化的土壤的理化性质，并大幅度使土壤中失去营养，降低了这些土壤再次使用的价值。XI B D [8]有研究表明，HCl 能够有效去除某些重金属，但是由于其强酸性，对土壤本身肥力及养分有较强的影响。

近些年针对无机淋洗剂去除土壤中的重金属成分又有了一些新的进展。李世业[9]等发现，HCl 浓度为 0.16 mol/L 时可以较好的去除土壤中的重金属 Cd。Tokunaga 和 Hakutu [10]研究表明， $H_3PO_4$  能够有效地去除土壤中的重金属 As 污染物，在满足一定淋洗条件时甚至可以做到全部去除。Makino 等人[11]则研究发现铁盐对 Cd 的淋洗效果最好，土壤中不同形态的 Cd 去除率均大于了 40%，最高甚至可以达到 66%。这可能是因为  $Fe^{3+}$  可以促进重金属在土壤颗粒表面进行离子交换，同时水解产生  $H^+$ ，可以有效阻碍土壤对解吸后的重金属的再吸附作用[12]。Moon D H [13]等人发现在去除土壤中的重金属锌元素时盐酸的淋洗效率要大于酒石酸，更是远远大于草酸；而在去除土壤中的铅的时候，草酸的去除率却显得非常出色，远远大于酒石酸[14] [15]。

### 2.2. 螯合剂

螯合剂作为土壤淋洗剂能够大幅度提高重金属在土壤中的移动能力，使之能够更好地与土壤进行分离[16]。一般来说，最常见的螯合剂淋洗剂就是人工螯合剂 EDTA 和天然小分子有机螯合剂 CA。

EDTA 去除土壤中的重金属污染物主要是通过络合作用来实现的[17]，通过络合作用，土壤中的重金属可以大幅度的溶解在淋洗剂中，从而将污染物和土壤进行分离，达到有效去除污染并净化土壤的效果。可欣等人[18]通过采用振荡淋洗的方法发现 EDTA 对土壤中的交换态、碳酸盐结合态和氧化物结合态重金属具有较好的去除效果。张丰如[19]等人发现低浓度 EDTA 在 pH 较低的情况下可以高效去除土壤中的重金属 Cd。Udovic M 等人[19] [20]就针对 EDTA 在 pH 为 7 的常温下难溶于水的理化性质进行了研究。他们将 EDTA 与  $Na(OH)_2$  进行组合形成了去除阳离子金属效率最高的人工合成螯合剂  $Na_2EDTA$ 。

Drahota P 等人[21]还发现，与人工螯合剂所不同，天然小分子有机螯合剂能够更好地从土壤、沉积物和矿石材料中去除阴离子金属。Lee 等[22]就发现 CA 可以去除土壤中的 95% 以上的重金属 As。这些有机酸作为螯合剂，相比无机酸有着更加温和的酸性。同时，相比无机淋洗剂和其他的人工螯合剂，CA 等天然小分子有机螯合剂有着更好的生物降解性，不会造成二次污染[23]。

### 2.3. 表面活性剂

表面活性剂的亲水或亲油基团能够在溶液的表面能进行定向排列所以其作为淋洗剂在土壤淋洗反应中会发生活化反应和溶解反应[24]。活化反应在表面活性剂浓度低于 CMC 时发生，而溶解反应发生在表面活性剂浓度较高时。CMC 浓度这一表面活性剂的参数，是每个研究表面活性剂实验中都绕不开的一环。

而在选择表面活性剂作为土壤淋洗剂的浓度时,也是如此。国内外一些研究[25]发现表面活性剂作为淋洗剂的浓度较低时,重金属去除率并不高,但随着其浓度的增大有一个明显的提升,但很快就会达到去除率的最大值,继续增加其浓度也不会对净化土壤有更明显的作用。而这个能够最大程度提升污染物在土壤淋洗中去除率的表面活性剂浓度值就是 CMC。针对这一现象, Rosen M J [26]就做了相关的研究,他发现表面活性剂浓度超过 CMC 时会出现絮凝,土壤中的物质与这些絮凝物质结合就会形成粘性的乳状液,从而降低土壤孔隙率使淋洗液不能充分与土壤中的重金属污染物发生反应,进而影响其去除效果。

生物表面活性剂除了绿色环保、不容易产生二次污染等特性之外还具有生产工艺简单,造价低廉等一系列的优点[27]。生物表面活性剂可以与土壤液相中游离的金属离子发生络合反应从而将重金属带离土壤。除此之外,它还能通过降低界面张力的方式使土壤中的重金属离子与淋洗剂直接发生反应,从而促进重金属污染物与土壤颗粒的分离,达到有效去除污染的效果[28]。Fande [29]等人就用腐殖质淋洗了受 Cd 污染的土壤。他们发现这种由风化褐煤转化而成的腐殖质有很大的研究潜力,针对土壤中三种不同形态的 Cd,这种淋洗剂的效果分别为 41.6%, 36.8%和 74.9%。他们因此认为和其他的淋洗剂相比,在淋洗效率、安全性、对土壤无害、价格低廉等特性上占有很大优势。

## 2.4. 复合淋洗剂

在上文中,我们介绍了多种不同的淋洗剂,由于其各不同的理化性质,在净化受重金属污染的土壤时,针对不同的污染物,它们的淋洗效果也不相同。至今我们仍未探索出某一种能够应对所有污染条件的完美淋洗剂。就比如在上文中介绍的,EDTA 虽然能够较好地完成淋洗去除重金属的任务,但是它本身固有的低生物降解性,容易造成二次污染等不良后遗症。同样的,一些像是 HCl 一样的无机酸,也因为会破坏土壤结构,造成土壤中的各种营养成分流失而在实际运用过程中被谨慎使用。因此,现有针对土壤淋洗剂的研究已经不再是只研究新型的单一淋洗剂,越来越多的科研人员看到了复合淋洗剂的应用前景,开始着手研究不同淋洗剂之间的协同作用是否在去除土壤中的重金属污染过程中有帮助。

屠亮[30]等人研究表明当将 0.1 mol/L 的葡萄糖酸、0.2 mol/L 的氯化钠和 0.01 mol/L 的六偏磷酸钠一起使用作为复合淋洗剂,能够大幅度的去除 Pb 和 Cd 元素造成的重金属污染。而孙磊[31],也研究发现,磷酸二氢钾无论是和石灰还是和粉煤灰组合制成复合淋洗剂,其去除土壤中的重金属的效果都远远大于单独使用磷酸二氢钾作为淋洗剂时的效果。薛清华[32]等发现,柠檬酸与一定浓度的 DTPA 混合淋洗,可有效降低 Cd、Pb 的生物有效性,从而达到降低环境风险的目的。陈逸斌[33]等也发现 CA 分别与吐温 80、腐殖酸等表面活性剂复合淋洗可以有效去除土壤中的 Cu、Zn 和 Pb 等重金属。王佳明[34]还发现,复合淋洗过程中不同的淋洗剂添加顺序也在一定程度影响淋洗效果。

我们在上文中提到,EDTA 作为淋洗剂在去除土壤中的重金属的过程中,会有造成二次污染的风险,针对这一现状,EDDS 就因为其生物降解性非常好的特点,成为了 EDTA 作为土壤淋洗剂的替代品。而 Bolan 等人[35]在此基础上又做出了改良,他将 EDTA 和 EDDS 进行复合,制成复合淋洗剂,发现这种复合淋洗剂相比低剂量的 EDTA 或者 EDDS 能够更好地去除土壤中的重金属 Pb 和 Cu。Jong-Chan [36]等人最近的研究表明,将 EDDS 与生物炭相结合作为复合淋洗剂,可以降低电子垃圾回收点和木材处理点处土壤中残余的重金属含量,并能够保护土壤肥力不受影响。

## 3. 不同淋洗条件对淋洗效率的影响

不同的淋洗剂在淋洗不同的重金属时,都会出现并不相同的淋洗效果。而除了淋洗剂之外,不同的淋洗条件也会造成土壤淋洗在去除重金属时最终效果的不同。李江山[4]认为,决定化学淋洗修复有效性的最关键因素是淋洗液是否能够充分渗透在土壤中,而 pH 值、液固比等淋洗条件和环境等也是影响淋

洗效果的原因。

不同的土壤性质对这些土壤经过淋洗后所能达成的净化效果有很大的影响是显而易见的。当 pH 值较低时, 重金属主要以吸附的形态存在于受污染土壤中, 具有不错的迁移性。而当污染土壤为碱性时, 重金属的迁移转化能力就会相应的大幅度降低[7]。就有研究认为[5]随着土壤中  $H^+$  的减少,  $Pb^{2+}$  的去除率会相应不断降低。除了 pH 值对土壤淋洗的影响外, 陈灿[37]等人研究发现, 当使用磷酸钾作为淋洗剂去除土壤中的类金属 As 时, 去除率随着液固比的增大而增大。然而当液固比继续增大到某一程度, 去除率的增长就不再明显。

一定程度上更改淋洗环境, 对淋洗去除土壤中重金属的含量也有很多帮助。史天成[38]等人发现, 在超声强化淋洗的条件下, CA 对 Fe、Mn 等重金属有较好的去除效果。Mason 等人[39]对此进行了一些专门的研究, 他们发现超声波通过造成固体颗粒的微破碎或者干扰固液界面来实现对土壤中的重金属淋洗强化。而韩有定也研究发现[40]超声空化引起的物理效应能够造成吸附在土块中的各种物质发生解析, 从而帮助污染物与土块进行分离, 最终实现净化土壤的目的。王佳明[34]发现, 重金属 Pb、Zn 的去除率, 随着超声频率越高, 重金属 Pb 和 Zn 的去除率就会降低, 而超声功率的增加则会相应增强这两种重金属的去除率。当然, 虽然有不少研究认为超声振荡能够帮助去除土壤中的污染物, 但是对超声振荡在各种不同的条件下加强土壤淋洗去除土壤中的重金属污染的原理以及所能提升的效果仍然有待进一步的研究。

#### 4. 结论、问题与展望

经过多年研究, 现已有不少针对重金属污染土壤淋洗的研究。不同研究发现, 可以通过调整淋洗剂和淋洗环境有效去除土壤中的重金属污染物。

土壤淋洗因其能够高效去除土壤中的重金属元素和其实际操作过程中的低成本低风险, 体现出了很强的研究价值。然而诸如上海等地区的土壤结构属于并不是通常淋洗所适用的黏土, 具有高含水率、小渗透性、强结构性、大孔隙比等一系列特点[41]。这就需要相关科研人员针对这一现状进行进一步的研究。同时, 选择更加绿色环保的淋洗剂, 改善土壤淋洗的环境进而增强淋洗效果也是目前土壤淋洗研究中所面对的一大课题。

#### 基金项目

一体化强化渗透成套预制多项抽提井构建技术研究(上海市科委 - 扬帆计划, 编号 20YF1434800)。

#### 参考文献

- [1] Evans, L.J. (1989) Chemistry of Metal Retention by Soils. *Environmental Science & Technology*, **23**, 1046-1056. <https://doi.org/10.1021/es00067a001>
- [2] Elliott, H.A. and Brown, G.A. (1989) Comparative Evaluation of NTA and EDTA for Extractive Decontamination of Pb-Polluted Soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, **45**, 361-369. <https://doi.org/10.1007/BF00283464>
- [3] Wan, X.M., Lei, M. and Chen, T.B. (2019) Review on Remediation Technologies for Arsenic-Contaminated Soil. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, **14**, 38-51.
- [4] 李江山. Pb(II)污染土淋洗修复技术与预测评价模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
- [5] Budianta, W., Salim, C., Hinode, H. and Ohta, H. (2008) *In Situ* Soil Washing on Metal-Contaminated Sandy Soil by Sedimentation Method: A New Approach on Soil Remediation. *Psychological Science*, **21**, 1394-1398.
- [6] 贾建丽, 于妍, 王晨. 环境土壤学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [7] 陶冶. 镉铬污染土壤淋洗剂筛选研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [8] Xi, B.D., Dang, Q.L., Wei, Y.Q., *et al.* (2020) Biogas Slurry as an Activator for the Remediation of Petroleum Contaminated Soils through Composting Mediated by Humic Acid. *Science of the Total Environment*, **730**, Article ID:

139117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139117>
- [9] 李世业, 成杰民. 化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 869-878.
- [10] Tokunaga, S. and Hakuta, T. (2002) Acid Washing and Stabilization of an Artificial Arsenic-Contaminated Soil. *Chemosphere*, **46**, 31-38. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00094-7)
- [11] Makino, T., Takano, H., Kamiya, T., *et al.* (2008) Restoration of Cadmium-Contaminated Paddy Soils by Washing with Ferric Chloride: Cd Extraction Mechanism and Bench-Scale Verification. *Chemosphere*, **70**, 1035-1043. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.080>
- [12] 刘培亚, 李玉姣, 胡鹏杰, 董长勋. 复合淋洗剂土柱淋洗法修复 Cd、Pb 污染土壤[J]. 环境工程, 2015, 33(1): 163-167.
- [13] Moon, D.H., Lee, J.R., Wazne, M. and Park, J.H. (2012) Assessment of Soil Washing for Zn Contaminated Soils Using Various Washing Solutions. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, **18**, 822-825. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.137>
- [14] Debela, F., Arocena, J.M., Thring, R.W. and Whitcombe, T. (2010) Organic Acid-Induced Release of Lead from Pyromorphite and Its Relevance to Reclamation of Pb-Contaminated Soils. *Chemosphere*, **80**, 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.04.025>
- [15] Elliott, H.A. and Shastri, N.L. (1999) Extractive Decontamination of Metal-Polluted Soils Using Oxalate. *Water, Air, & Soil Pollution*, **110**, 335-346. <https://doi.org/10.1023/A:1005067404259>
- [16] 严智俊. 茶皂素对土壤中镉的解吸及植物吸收行为的影响[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2011.
- [17] 孔春燕. 化学淋洗法修复重金属污染土壤效果研究[J]. 德州学院学报, 2008, 24(6): 50-54.
- [18] 可欣, 李培军, 张昀. 孙铁珩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.
- [19] 张丰如, 潘巧敏, 杨鸿凯, 等. EDTA 淋洗重金属 Cd 污染土壤实验研究[J]. 山东化工, 2020, 49(14): 243-244.
- [20] Udovic, M. and Domen, L. (2010) Fractionation and Bioavailability of Cu in Soil Remediated by EDTA Leaching and Processed by Earthworms. *Environmental Science & Pollution Research*, **17**, 561-570. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0262-x>
- [21] Drahotová, P., Grösslová, Z. and Kindlová, H. (2014) Selectivity Assessment of an Arsenic Sequential Extraction Procedure for Evaluating Mobility in Mine Wastes. *Analytica Chimica Acta*, **839**, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.06.022>
- [22] Lee, M., Paik, I.S., Do, W., *et al.* (2007) Soil Washing of As-Contaminated Stream Sediments in the Vicinity of an Abandoned Mine in Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, **29**, 319-329. <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9093-1>
- [23] 钟玉凤, 吴少林, 戴玉芬, 张婷, 朱振兴. 有机整合剂在环境保护中的应用[J]. 江西科学, 2007, 25(3): 351-354.
- [24] Urum, K. and Pekdemir, T. (2004) Evaluation of Biosurfactants for Crude Oil Contaminated Soil Washing. *Chemosphere*, **57**, 1139-1150. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.048>
- [25] 何泽能, 李振山, 籍国东. 油田污染土壤中石油回收的模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(2): 136-145.
- [26] Rosen, M.J. (1989) *Surfactants and Interfacial Phenomena*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [27] 梅建风, 王普. 生物表面活性剂[J]. 精细与专用化学品, 2002, 10(10): 11-12.
- [28] Miller, R.M. (1995) Biosurfactant-Facilitated Remediation of Metal-Contaminated Soils. *Environmental Health Perspectives*, **103**, 59-62. <https://doi.org/10.2307/3432014>
- [29] Meng, F.D., Yuan, G.D., Wei, J., *et al.* (2017) Humic Substances as a Washing Agent for Cd-Contaminated Soils. *Chemosphere*, **181**, 461-467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.127>
- [30] 屠亮, 陈洪龄. 一种修复 Pb-Cd 污染污泥的复合淋洗剂的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 151-154.
- [31] 孙磊. 淋洗法和稳定化法修复镉污染土壤[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [32] 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.
- [33] 陈逸斌, 吴明红, 杨洁. 表面活性剂与柠檬酸联合洗涤高黏性土壤中的重金属[J]. 化工环保, 2019, 39(5): 532-537.
- [34] 王佳明. 铅锌污染土壤超声强化有机酸淋洗技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [35] Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., *et al.* (2014) Remediation of Heavy Metal(loid)s Contaminated

- 
- Soils—To Mobilize or to Immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, **266**, 141-166.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>
- [36] Yoo, J.C., Beiyuan, J.Z., Wang, L., *et al.* (2018) A Combination of Ferric Nitrate/EDDS-Enhanced Washing and Sludge-Derived Biochar Stabilization of Metal-Contaminated Soils. *Science of the Total Environment*, **616-617**, 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.310>
- [37] 陈灿, 等. 砷污染土壤磷酸盐淋洗修复技术研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2582-2588.
- [38] 史天成, 高柏, 蒋文波, 等. 超声辅助柠檬酸化学淋洗复合污染土壤的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(10): 102-110.
- [39] Mason, T.J., Collings, A. and Sumel, A. (2004) Sonic and Ultrasonic Removal of Chemical Contaminants from Soil in the Laboratory and on a Large Scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, **11**, 205-210.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.01.025>
- [40] 韩有定. 石油污染土壤超声波净化实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [41] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.