**污染土壤淋洗修复技术研究方向与进展分析**

刘仁华，孙加山，宋亚丹，吴丛杨慧

（苏州市宏宇环境科技股份有限公司，江苏 苏州215000）

**摘要：**土壤淋洗修复技术具有周期短、成本低等特点，具有重大的现实研究意义。本文从淋洗药剂、淋洗技术和淋洗设备三方面对污染土壤淋洗修复技术研究情况进行分析。通过分析淋洗技术在不同研究方向的进展，说明目前淋洗技术研究的前沿成果。并根据淋洗技术的发展情况研判淋洗修复技术未来的发展方向，以期为后续相关研究人员研究方向提供参考，为土壤修复单位在选择修复药剂、修复方法及修复设备时提供指导。

**关键词：**土壤；淋洗；修复；药剂；技术；设备

**Analysis of research direction and development on polluted soil leaching remediation technology**

Liu Renhua , Sun Jiashan , Song Yadan , Wucongyang Hui

（Suzhou Hongyu Environmental Science and Technology Co., Ltd. Suzhou Jiangsu 215000，China）

**Abstract:** The technology of soil leaching and remediation has the characteristics of short cycle and low cost, which is of great practical significance. In this paper, analyzed the research situation in remediation technology of contaminated soil leaching from three aspects: leaching agent, leaching technology and leaching equipment. Through the analysis of the development of leaching technology in different research directions, explained the leading achievements in the research of leaching technology. According to the development of leaching technology, studied and judged the future development direction of leaching repair technology , in order to provide reference for the follow-up research direction of relevant researchers, and provide guidance for Soil remediation units in selecting remediation agents, remediation methods and remediation equipment.

**Key words:** Soil; leaching; remediation; agents; methods; equipment

**引言**

土壤淋洗又分为异位淋洗和原位淋洗[7]。异位化学淋洗技术始于1980年，最初由美国环保局以及其他国家环保机构开始研究[9]。淋洗修复技术是通过借助传统物理、化学提取和分离技术来去除土壤中的有机污染物、无机污染物以及放射性污染，最终将土壤中的污染物转移到水溶液中，再对水溶液进行处理，进而达到修复的目的[21]。相较于固化/稳定化、水泥窑协同处置、植物修复、生物堆等修复技术，淋洗修复技术具有彻底清除土壤中污染物、一定程度上保留土壤原有功能、周期较短等优点。因此，淋洗技术的研究与完善对于推动土壤修复行业发展至关重要。为寻求低价、高效、环保的淋洗修复方式，相关研究人员在淋洗药剂的选择和配比、淋洗技术以及设备上进行不断改良，并取得了一定的成果。

本文重点对淋洗药剂和淋洗技术研究状况进行分析，就相关研究内容及发展情况进行剖析，给出淋洗修复技术研究热点、成果及发展趋势，为后续研究方向提出参考意见，为工程修复单位提供技术指导。

**1 淋洗药剂研究分析**

常见的淋洗剂主要分为无机酸、螯合剂和表面活性剂三大类（表1）。不同淋洗药剂在修复能力、修复成本、降解性等方面存在一定的缺陷，目前相关研究人员主要从配制复配药剂、使用淋洗助剂、研发绿色淋洗药剂三方面对淋洗药剂进行改善[5]。

表1 淋洗药剂的分类与特点

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **药剂类型** | | **药剂种类** | **缺点** |
| 无机淋洗剂 | | 盐酸、硫酸、氯化铁、氯化钙溶液 | 破坏土壤的物理化学和生物性质[5] |
| 表面活性剂 | 化学表面活性剂 | 十二万基本磺酸钠、吐温、曲拉通、十二万基硫酸钠 | 价格昂贵、生物降解性差[5] |
| 生物表面活性剂 | 鼠李糖脂、单宁酸、茶皂素、皂角苷、腐殖酸等 | 成本高[5]，产量低[10] |
| 螯合剂 | 化学合成螯合剂 | 乙二胺四乙酸、乙二胺二琥珀酸、谷氨酸二乙酸四钠、二乙三胺五醋酸等 | 难降解、易引发二次污染[5]，价格昂贵[10] |
| 天然螯合剂 | 草酸、柠檬酸、酒石酸、乙酸等 | 修复能力有限[5] |

**1.1 复配药剂研究**

目前，研究人员对重金属污染土壤复配药剂研究成果显著；石油类有机污染土壤复配药剂的研究以几种表面活性剂复配为主，大多研究处于分析及结果预测阶段[1]。

复配淋洗药剂在一定程度上能够提高污染物的去除效率。在对去除重金属污染的淋洗药剂研究中，张亚宁等[18]研究结果表明，乙二胺四乙酸（EDTA）与柠檬酸的复配淋洗剂对土壤中Cu、Zn、Pb、Ni污染物的去除效果较其任何单一淋洗剂效果好。董汉英等[4]研究结果表明，EDTA与草酸的复配淋洗剂对土壤中的Zn、Ni、Cr污染物的去除效果强于任何单一淋洗药剂。姚瑶等研究结果表明，衣康酸—丙烯酸共聚物复配淋洗剂对土壤中的Pb污染物的去除比衣康酸单一药剂时效果好，而丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸共聚物对Pb污染物的去除效果更好[17]。由此可见，一定条件下复配淋洗药剂比单一淋洗药剂淋洗效果好。

复配淋洗剂并非在任何情况下对污染物的去除效率较单一淋洗剂高。土壤来源相同，单一药剂可能比复配药剂淋洗效率高。张亚宁等研究结果表明，柠檬酸较EDTA、EDTA和柠檬酸复配剂对Cr的去除效果更好[18]。董汉英等研究结果表明，EDTA比草酸、EDTA和草酸复配剂对Pb的去除效率高[4]。土壤来源不同，同种药剂对同类污染物的淋洗去除效率也是有差异的，如邢宇等用柠檬酸对铜污染土壤进行淋洗，Cu去除效率为89.37%[14]，而许超等用柠檬酸对铜污染土壤进行淋洗，Cu去除效率仅为11.18%[15]。

综合而言，淋洗药剂对污染物的去除效率不仅与药剂的种类有关，还与污染土壤自身性质、污染物与土壤的结合状态、污染物的含量、药剂的含量、反应条件、反应时间等多种因素有关。某些复合药剂的配制，提高了相应污染物的去除效率，实现了药剂的减量化，一定程度上节省了修复成本并减少了二次污染问题[5]。复合药剂在淋洗修复过程中优势明显，但淋洗药剂的选择要结合土壤自身性质、修复成本和要达到的效果选择适合的药剂。

表2 不同药剂淋洗去除率

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **污染物** | **污染物含量（mg/kg）** | **淋洗药剂** | **去除率** | **污染物** | **污染物含量（mg/kg）** | **淋洗药剂** | **去除率** |
| Cu | 5028.34 | 柠檬酸 | 89.37%[14] | Pb | 1283.21 | 丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸共聚物 | 59.12%[17] |
| Cu | 593.37 | 柠檬酸 | 11.18%[15] | Pb | 1283.21 | 衣康酸-丙烯酸共聚物 | 50.62%[17] |
| Cu | 2800 | EDTA | 64.5%[18] | Ni | 2310 | EDTA | 27.12%[4] |
| 2800 | 柠檬酸 | 53.8%[18] | 2310 | 草酸 | 29.08%[4] |
| 2800 | EDTA和柠檬酸 | 79.1%[18] | 2310 | EDTA和草酸 | 62.1%[4] |
| Zn | 3240 | EDTA | 45.3%[18] | Ni | 1260 | EDTA | 35.6%[18] |
| 3240 | 柠檬酸 | 63.2%[18] | 1260 | 柠檬酸 | 43.6%[18] |
| 3240 | EDTA和柠檬酸 | 82.6%[18] | 1260 | EDTA和柠檬酸 | 53.9%[18] |
| Zn | 2040 | EDTA | 50.9%[4] | Cr | 3390 | EDTA | 15.1%[4] |
| 2040 | 草酸 | 41.9%[4] | 3390 | 草酸 | 36.23%[4] |
| 2040 | EDTA和草酸 | 75.21%[4] | 3390 | EDTA和草酸 | 60.72%[4] |
| Pb | 14300 | EDTA | 24.3%[4] | Cr | 3840 | EDTA | 22.9%[18] |
| 14300 | 草酸 | 8%[4] | 3840 | 柠檬酸 | 58.2%[18] |
| 14300 | EDTA和草酸 | 21.3%[4] | 3840 | EDTA和柠檬酸 | 53.8%[18] |
| Pb | 2070 | EDTA | 63.2%[18] | Cd | 47.23 | 柠檬酸 | 86.39%[14] |
| 2070 | 柠檬酸 | 46.1%[18] | Cd | 16.44 | FeCl3和HCl | 78.9%[2] |
| 2070 | EDTA和柠檬酸 | 78.7%[18] | 16.44 | NaCl和HCl | 70.6%[2] |
| Pb | 1283.21 | 衣康酸 | 31.76%[17] | 16.44 | CaCl2和HCl | 50.7%[2] |

**1.2 淋洗助剂研究**

一般重金属污染土壤淋洗过程能去除大部分的水溶态和可交换态的重金属，难以去除结合态和残渣态重金属，而淋洗助剂的使用有助于结合态和残渣态的重金属的去除。CAO等利用清香木、马桑、短尾铁线莲和蓖麻提取液作为淋洗药剂进行土壤重金属去除实验，并使用2-膦酰基丁烷-1,2,4-三羧基酸和水解聚马来酸酐两种助剂与植物淋洗剂组合研究其淋洗效果，结果表明，添加助剂后重金属淋洗去除率得到提升[5]。

目前研究常使用磷酸盐类、中性电解质类和硅酸盐类等作为表面活性剂修复石油类有机污染土壤时的助剂，这些助剂可以降低界面张力和临界胶速浓度，且能够络合水中的金属离子，调节pH。常用的表面活性剂助剂有醋酸铵、碳酸钠和硅酸钠[1]。

**1.3 绿色淋洗药剂研究**

随着环保法规的不断完善及人们对环境保护意识的不断增强，绿色修复技术越来越被重视。在寻找安全、可降解、高效的淋洗药剂过程中，植物淋洗材料成为绿色淋洗药剂研究的重要部分。周晨颖等研究结果表明乌药和枳椇子对镉的去除效率高达82.60%和73.12%，马桑对铅和镍的去除效率高达36.40%和27.88%[19]。徐小逊等研究结果表明驳骨丹对土壤中镉的去除效率达72.45%，对铅的去除效率为17.27%，紫茎泽对镉的去除效率达59.81%[16]。

近年来研究表明，绿色药剂不仅可以在淋洗修复技术中得到应用，还可在植物修复过程中促进植物对重金属的富集，如朱志鹏等[20]研究结果表明，凤丹叶浸提液能够促进吊兰对铜的富集。由此可以看出，绿色药剂的研究前景较好。

**2 淋洗技术研究分析**

近年来，研究人员不断对联合修复技术进行了探索和研究，在微波、超声强化H2O2氧化法-淋洗联合修复、电刺激/H2O2氧化法-淋洗联合修复、UV/H2O2氧化—淋洗联合修复、化学淋洗与固定联合修复技术等方面取得了一定的成果。

刘亦博用电刺激/H2O2氧化—淋洗复合修复技术对铬污染土壤进行修复研究，相比于传统的淋洗修复技术，该技术修复药剂环保易得，化学试剂用量大幅度减少，治理成本降低，修复效果更加显著，且不产生二次污染[8]。贾桂云用UV/H2O2氧化—淋洗联合修复技术对铬污染土壤进行了研究，该技术在高浓度、低活性指数的铬污染场地治理具有明显的优势，较传统淋洗修复方式修复效果更佳，费用更合理[6]。卫泽斌等对稳定化固化—淋洗复合修复技术进行了研究，先对深层土壤进行固化，再对污染耕作层进行化学淋洗，深层土壤中固定的重金属很难被降水淋洗出来，进而控制对地下水污染的风险，同时又不影响表层土壤耕作，从而快速到达修复目的且不影响土壤用途[11]。

**3 淋洗设备研究分析**

在工程应用中，淋洗修复是对污染土壤逐级淋洗筛分的过程，淋洗后的土壤按照土壤粒径由大到小逐级筛分出来，土壤中吸附的污染物转移至淋洗废水中，再对废水进行处理，最终达到修复目的。

淋洗修复设备主要包含破碎机、螺旋洗砂机、滚筒洗砂机、旋流除砂器、振动筛、卧式离心机等。这些设备并非淋洗生产线的专用设备，破碎机和振动筛等设备在矿石洗选过程中广泛应用，螺旋洗砂机在洗砂行业中技术研究也已非常成熟。目前更多的是对旋流除砂器的研究。

目前对于旋流除砂器的研究更多的是验证该设备在某些新领域应用的可能性和技术改良。崔岩等利用RSM和DPM数值模型模拟及实验，为TP-Ⅱ-250型旋流除砂器能在海上油田注水工艺中应用提供依据[3]。邵春等研究成果表明在旋流除砂器中间加装圆杆除砂效率可达91%[12]。于驰等通过数值模拟分析，对旋流除砂器的结构进行改良，对新型油田除砂旋流器的设计和制作提供依据和技术支撑。

**4 结论与展望**

对于淋洗修复技术中淋洗药剂的研究已由单一药剂向复合药剂方向研究发展。研究结果表明，多数情况下复合药剂较单一药剂淋洗效果好，如一定比例的乙二胺四乙酸与柠檬酸的复配淋洗剂对土壤中Cu、Zn、Pb、Ni污染物的去除效果较其任何单一淋洗剂效果好。另外，淋洗助剂的研究是利用淋洗助剂促进污染物的结构或状态的改变，进而提高修复效率；绿色淋洗药剂能够减少对土壤的二次污染问题，淋洗助剂和绿色淋洗药剂在高效和环保方向具有重大现实研究意义，日益受到研究人员的青睐与重视。

淋洗技术的研究也由单一技术向多种修复技术与淋洗技术复合方向研究，如电刺激/H2O2氧化法、微波、超声强化H2O2氧化法、UV/H2O2氧化法等与淋洗技术联合修复技术，均取得一定成效。

淋洗设备的研究已基本成熟，目前对于淋洗设备的研究更多的是对于设备的小部件改良。

未来对于淋洗修复技术的研究，淋洗药剂将向更绿色环保、多种复合方向研究，淋洗技术的研究也将向多种技术与淋洗技术相结合的方向发展。

**参考文献**

[1]毕璐莎,张焕祯,罗成成,祝红. 表面活性剂淋洗修复石油类污染土壤的研究[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(S1):195-198.

[2]陈春乐,王果,王珺玮.3种中性盐与HCl复合淋洗剂对Cd污染土壤淋洗效果研究[J].安全与环境学报,2014,14(05):205-210.

[3]崔岩,王建军,孙茂生,金有海.水力旋流除砂器内液-固两相流动试验与数值模拟[J].石油机械,2015,43(11):123-128.

[4]董汉英,仇荣亮,赵芝灏,邹泽李,张涛,仇浩,蔡信德.工业废弃地多金属污染土壤组合淋洗修复技术研究[J].土壤学报,2010,47(06):1126-1133.

[5]胡永丰,郦和生,秦会敏.重金属污染土壤淋洗优化技术进展[J].化工环保,2019,39(05):506-509.

[6]贾桂云. UV/ H2O2氧化—淋洗联合修复铬污染场地技术参数研究[D].山东师范大学,2017.

[7]李玉双,胡晓钧,孙铁珩,侯永侠,宋雪英,杨继松,陈红亮.污染土壤淋洗修复技术研究进展[J].生态学杂志,2011,30(03):596-602.

[8]刘亦博. 电刺激/H2O2氧化—淋洗修复铬污染场地技术研发[D].山东师范大学,2018.

[9]宁小兵. 石油污染土壤异位淋洗修复技术的研究与应用[D].湖南农业大学,2010.

[10]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(01):140-149.

[11]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(02):407-408.

[12]邵春,鄢泰宁.旋流除砂器的改进及其试验效果[J].煤田地质与勘探,2006(05):71-74.

[13]武星. 铅锌多金属尾矿砂的淋洗处理技术研究[D].陕西师范大学,2015.

[14]邢宇,党志,孙贝丽,卢桂宁,郭楚玲.柠檬酸淋洗去除电子垃圾污染土壤中的重金属[J].化工环保,2014,34(02):110-113.

[15]许超,夏北城,林颖.柠檬酸对中低污染土壤中重金属的淋洗动力学[J].生态环境学报,2009,18(02):507-510.

[16]徐小逊,腾艺,杨燕,王贵胤,张世熔.4种植物水浸提液对铅镉污染土壤的淋洗效果[J].农业环境科学学报,2019,38(08):1954-1962.

[17]姚瑶,张世熔,王怡君,王贵胤,徐小逊,李婷.3种环保型淋洗剂对重金属污染土壤的淋洗效果[J].环境工程学报,2018,12(07):2039-2046.

[18]张亚宁,徐明,董颖,艾尚友,吴喜军.EDTA与柠檬酸复配淋洗对土壤中重金属去除效果研究[J].当代化工,2018,47(08):1617-1621.

[19]周晨颖,徐小逊,杨燕,赵伟,陶丽.3种植物水浸提液对工业园区污水处理厂污泥中重金属的淋洗效果[J].环境工程学报,2018,12(11):3221-3233.

[20]朱志鹏,王鑫,王友保,周会,徐夏,王振东,王兴飞.凤丹组织浸提液对Cu污染土壤中吊兰生长及其Cu富集特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(03):285-289.

[21]左玉辉.环境学[M],北京:高等教育出版社,2002.