

生态环境

淋洗法处理铬污染土壤研究进展

郭伯厚 陈睿颀 张基尧 凌晓杰 王娟

(嘉兴大学 生物与化学工程学院, 浙江 嘉兴 314033)

[摘要] 重金属铬进入土壤后不仅会污染地下水,还会在植物体内累积进而危害人体健康。淋洗技术具有操作简单、节约成本、效果显著等优点,是较为常用的铬污染土壤处理方法。本文整理和归纳了目前有关铬污染土壤淋洗的研究,介绍各种淋洗剂的淋洗原理、应用及存在问题,分析影响淋洗效果的因素,如土壤性质、淋洗剂性质、淋洗液 pH 值、淋洗时间、液固比及增强方式等,并针对铬污染土壤淋洗存在的黏性土壤中铬淋洗效率不高、淋洗后土壤的生态风险评价不足、淋洗废水处理和资源化不足等问题,提出相应建议。

[关键词] 铬污染; 土壤淋洗; 淋洗剂种类; 影响因素

[中图分类号] X53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)02-0066-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.012

0 前言

由于铬在许多工业部门都有无可替代的作用,随着社会经济的发展,铬的排放量也逐渐增多。铬及其化合物严重影响人体健康,如侵犯皮肤及呼吸道,刺激皮肤黏膜而诱发溃疡、皮炎等疾病。因此美国早已将铬污染场地列入常见的危险废物污染场地(位列第3)和无机物污染场地(位列第2)。据相关报道^[1]显示,全国土壤污染状况总体不容乐观,总超标率为16.1%,其中无机污染物铬的点位超标率为1.1%。我国历史堆存铬渣量超过600万t,每年排出的新铬渣为20万~30万t。铬渣堆放和填埋不符合危险废物处置要求,不仅占用土地,而且对人体健康和生态环境构成巨大威胁^[2]。铬污染土壤

的治理工作尤为迫切。

当前,铬污染土壤主要的污染治理方法包括物理法、化学法、生物法以及联合修复方法^[3]。其中,化学修复是指向土壤中加入化学物质,通过化学物质对污染物的吸附、氧化还原、拮抗或沉淀等作用,降低土壤中污染物的生物有效性或毒性的方法^[4]。淋洗法属于化学修复法之一,其原理是通过向土壤中灌注或渗透冲洗液实现从土壤基质中分离污染物,再对含污染物冲洗液进行处理和回用,从而降低污染物的浓度和对环境的威胁。淋洗技术具有操作简单、节约成本、效果显著等优点,因而应用广泛^[5]。本文整理和归纳了目前有关铬污染土壤淋洗的研究,介绍了目前的淋洗剂种类,分析 pH 值、土质、超声波强度等影响淋洗效果的因素,就目前淋洗技术存在的不足提出未来需要重点研究的方向。

1 淋洗剂种类

淋洗技术的重点是找寻一种既能分离各种污染物,又不会破坏土壤构造的淋洗溶液。目前土壤淋洗液种类繁多,包括无机淋洗剂、表面活性剂、复合淋洗剂、螯合剂、植物浸提液等。

1.1 无机淋洗剂

最初的土壤淋洗剂以无机淋洗液为主。无机淋洗液含有酸、碱和盐等无机物,其主要原理是通过酸

[收稿日期] 2023-11-02

[基金项目] 嘉兴大学大学生科研训练计划(SRT)项目(8517231461)。

[作者简介] 郭伯厚(2003—),男,浙江嘉兴人,本科在读,研究方向为土壤污染治理。

[引用格式] 郭伯厚,陈睿颀,张基尧,等.淋洗法处理铬污染土壤研究进展[J].绿色矿冶,2024,40(2):66-72.

GUO Bohou, CHEN Ruijie, ZHANG Jiyao, et al. Research progress on treatment of chromium contaminated soil by leaching method[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 66-72.

溶、螯合和离子交换等作用,使重金属在土壤中形成的配合物溶解,从而实现淋洗。Alaboudi 等^[6]利用氯化铁溶液对沙质土淋洗 1 h,土壤中铬去除率最高可达 81.75%。Gitipour 等^[7]采用 EDTA、乙酸和盐酸作为铬浸出剂研究了铬的去除效果,结果表明用 0.3 mol/L 盐酸洗涤土壤可达到较好的去除效果,铬去除率达到 82.69%。但有研究表明无机盐溶液对沙质土以外的土壤去除效率低,且易破坏土壤结构,对操作人员身体易产生损伤^[5]。

1.2 表面活性剂

表面活性剂是一类能够降低液体表面张力并在液体表面形成一层薄膜的化学物质。表面活性剂的分子结构中常含有亲水性部分和亲油性部分,因而可以在水和油之间发挥乳化、分散、湿润等作用。土壤淋洗时常用的有化学表面活性剂和生物表面活性剂。

化学表面活性剂是一种由亲水、疏水基团固定的物质,能分布在溶液表面,具有显著减小表面张力的效果。其作用机制是通过改变土壤的表面特性,或通过与土壤中重金属离子进行离子交换实现对重金属的去除^[8]。曹晓雅等^[9]采用质量浓度为 1.0 g/L 的表面活性剂十二烷基苯磺酸钠洗涤铬污染土壤,研究结果表明经过 18 h 淋溶,Cr 以有机态和残余态存在于土壤中,淋溶效果较好,Cr(VI) 的转化率高达 95%。陈峰等^[10]讨论了三种常用的表面活性剂——聚氧乙烯脱水山梨糖醇单油酸酯(吐温-80)、十二烷基硫酸钠(SDS)和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)对铬的去除效果。浸出实验证明,这三种表面活性剂能有效地脱除土壤中的铬,其中聚氧乙烯脱水山梨糖醇单油酸酯对污染土壤中铬的去除率为 61.2%。虽然合成表面活性剂对重金属的去除效果较好,但其生产工艺复杂,价格昂贵,生物降解性差,易造成二次污染^[5]。

生物表面活性剂是一类由生物体产生的活性物质,具有类似于化学表面活性剂的功能,但是来源于自然界而非人工合成。目前,使用最广泛的是低分子量的生物界面活性剂。Hong 等^[11]将茶皂素用于去除生活垃圾中的铬,发现质量分数为 3.75% 的茶皂素溶液可去除 20%~45% 的铬。丁宁等^[12]采用鼠李糖脂对含 Cd 和 Pb 的污染土壤进行淋洗,Cd 的洗脱率为 60%~70%,Pb 的洗脱率接近 100%。虽然生物表面活性剂有很多优点,但在使用过程中仍存在一些问题。例如,生物表面活性剂在土壤中易

受复杂化学反应的影响,去除重金属物质的效果不稳定,在使用中需要进行更深入的研究和优化。此外,生物表面活性剂还可能对土壤生态系统产生不可逆的影响,因此需要进行全面的环境影响评估。

1.3 螯合剂

螯合剂是一类特殊的配位化合物中的配位体,具有多个可以提供电子对的配位原子,能够与中心金属离子形成稳定的螯合物。如乙二胺四乙酸(EDTA),可以与金属离子形成非常稳定的六配位环状结构,从而使金属在土壤中的迁移能力得到提高。栾雪等^[13]使用可生物降解螯合剂 GLDA 对含 Cd、Zn 的污染土壤进行淋洗,淋出率分别达到 61.7%、22.3%,表明螯合剂在土壤污染治理的过程中有一定的效果。Wasay 等^[14]采用弱有机酸盐与强螯合剂对铬污染土壤进行修复,并对比了修复效果。研究发现,强螯合剂 EDTA、DTPA 可高效脱除土壤中的 Cr 等重金属,并可从土壤中提取大量的营养物质;弱有机酸盐类(柠檬酸、酒石酸)可减少土壤中的营养元素流失,对土壤结构有一定的改善作用。

虽然螯合剂可以有效去除重金属污染物,但也存在一些潜在的问题和风险。例如,螯合剂价格较高,大规模应用时成本过高;螯合剂在分离重金属污染物的同时可能会对土壤微生物和植物造成有害影响,破坏土壤生态平衡;另外,螯合剂可能会在土壤中残留,形成慢性异物污染,对土壤环境造成损害。

1.4 复合淋洗剂

复合淋洗剂是由两种或两种以上的淋洗剂混合而成的溶液。这些淋洗剂可以是化学的、生物的或者自然的物质,混合在一起,通过各组分之间的协同作用增强对土壤中污染物的溶解、扩散和迁移能力,从而提高淋洗效率。孙玉焕等^[15]以不同浓度的盐酸、柠檬酸、石灰水、碳酸钠、氯化钙等物质制备了 20 种混合淋洗剂并进行试验,淋洗结果表明,单独使用盐酸,总铬去除率为 4.1%~11.2%;单独使用柠檬酸,总铬去除率为 8.9%~23.3%;采用柠檬酸与盐酸复合淋洗剂,总铬去除率为 20.8%~34.8%,因此盐酸与柠檬酸的组合可以更好地去除总铬。郭平等^[16]研究表明,0.5 mol/L 草酸+水、0.5 mol/L 柠檬酸+水组成的混合淋洗剂与单一淋洗剂相比,可明显提高 Cr 的去除率。杨宗政等^[17]研究表明,采用 NTA、EDTA、草酸和酒石酸所配制的复配淋洗剂可以有效去除 Cr,混合等体积的

0.25 mol/L NTA 和 0.3 mol/L 草酸,在固液比为 1:9、pH 为 3.0、淋洗时间为 240 min 条件下,Cr(VI)去除效率达到最大 82.94%。Ma 等^[18]研究了盐酸、草酸、水、柠檬酸、磷酸和 EDTA 等 6 种淋洗剂的淋洗效果,结果表明由体积比为 1:1 的 0.6 mol/L 草酸与 0.6 mol/L 柠檬酸组成的混合淋洗剂对 Cr 的淋洗效果最好,总铬去除率为 62.0%。关峰^[19]采用室内振荡淋洗技术探究了不同淋洗剂(盐酸、柠檬酸和草酸)以顺序投加或混合投加的方式淋洗某铬渣堆场受铬污染土壤的效果,结果表明复合淋洗较单一淋洗能显著提高铬污染土壤中总铬的去除率,且顺序复合淋洗的去除效果要显著优于混合复合淋洗($p < 0.05$),其中 4 h 盐酸 + 4 h 草酸顺序淋洗、4 h 草酸 + 4 h 柠檬酸顺序淋洗和盐酸 + 柠檬酸混合 8 h 复合淋洗在二次淋洗条件下的总铬去除率分别可达 77.64%、68.32% 和 62.35%。

1.5 植物浸提液

植物提取物是天然的绿色药剂,从芳香植物中提取芳香族化合物而成,还含有不溶性物质或熔点较高的杂质^[20]。植物提取物包含了多种无机盐、有机酸和生物表面活性剂等多种复合物。肖罗怡^[21]采用春季浆果、鸢尾、葡萄和大绿叶等植物提取物进行土壤重金属去除测试,结果发现,植物提取物明显减少了 Cr 交换态,而土壤中的 N、P、K 元素含量几乎未发生变化,同时土壤结构没有受到影响。曹雅茹^[22]以马桑(CN)、铁线莲(CB)、清香木(PW)和蓖麻(RC)4 种植物提取物为试验材料,通过添加可降解辅助剂水解聚马来酸酐(HPMA)和 2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸(PBTCA),考察单一植物淋洗剂及其与 HPMA 和 PBTCA 复合对土壤重金属的去除效果,结果表明,与单一的植物提取物淋洗相比,HPMA 或 PBTCA 与植物提取复合淋洗,可以显著提高土壤重金属的去除率。其中,HPMA 在酸性条件下与植物淋洗剂复合对重金属的去除提高率大于 PBTCA,PW + HPMA 复合体系最大可提高 18.69%;在中性或碱性条件下,HPMA 与植物淋洗剂复合对重金属去除率提高则小于 PBTCA,此时土壤 Cd 去除率最大提升自于 PW + PBTCA 复合体系,为 24.18%。

2 影响淋洗效果的因素

影响淋洗效果的因素主要有污染土壤的性质、淋洗剂的性质和淋洗时的工作条件等。

2.1 土壤性质

土壤的性质主要包括土壤质地、土壤 pH 值、土壤有机物含量等,其中对重金属淋洗影响最大的是土壤质地。不同质地的土壤的粒径大小分布不同,因而对重金属的吸附能力也有较大差异^[23]。Cheng 等^[24]的研究表明土壤颗粒大小和土壤中铬的存在形态都影响淋洗效果。我国国土面积辽阔,土壤种类多样,因此在对污染土壤进行淋洗时需要针对不同土质开展研究。姜晓琪等^[25]采用柠檬酸对不同质地土壤进行修复,结果表明柠檬酸对不同质地的铬污染土壤的修复效果顺序为:沙土 > 壤土 > 黏土。在其他条件相同的情况下,土壤中土壤颗粒的粒径越小(< 0.053 mm),其吸附重金属的能力越强,反之则越弱。谢明月等^[26]采用浓度为 0.15 mol/L 的柠檬酸对人工制备的不同质地的铬污染土壤进行了土柱淋洗试验,铬污染壤土、砂质壤土和砂土的总铬去除率分别达到 82.86%、77.27% 和 82.15%。

2.2 淋洗剂性质

淋洗剂对淋洗效果的影响可以从淋洗剂种类和浓度两个方面研究。郭平等^[16]研究表明,不同淋洗剂种类对 Cr 的去除效果差异明显,柠檬酸和草酸的最大去除率较高,分别为 83.54% 和 88.45%;水(7.64%)、鼠李糖脂(66.38%)、酒石酸(64.43%)和富里酸(53.83%)的最大去除率相对较低。且在相同淋洗剂不同浓度下,总 Cr 去除率随着淋洗剂浓度的增加而增加,而六价铬去除率并不随着洗剂浓度的增加而增加;当淋洗剂浓度大于 0.5 mol/L 时,淋洗效果改善不明显。夏张等^[27]采用振荡淋洗的方式研究柠檬酸(CA)、硝酸和乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)对 Cr、Cd 复合污染土壤的淋洗脱除效果,结果表明,总 Cr 去除率随着淋洗剂浓度的增加而增大,在最佳淋洗剂浓度(CA 浓度 0.08 mol/L、HNO₃浓度 0.6 mol/L、EDTA-2Na 为 0.1 mol/L),最佳液固比为 20:1,最佳淋洗时间 12 h 的条件下,HNO₃的淋洗效率最高,Cr 淋洗率为 72.09%。可见,淋洗剂的种类和浓度直接决定了淋洗剂与铬相互作用的有效物质量,不同淋洗剂对铬的淋洗效果差异明显;同一淋洗剂在一定浓度范围内,铬的去除效果与淋洗剂浓度呈正相关,且针对不同污染程度的土壤,最佳淋洗剂的浓度也不同。

2.3 淋洗液 pH 值

淋洗液 pH 值的改变会对原土及各粒级团聚体吸附 Cr(VI)效果造成差异,酸性条件会促进羟基

质子化程度的提高,导致洗脱难度加大^[28],而土壤中 Cr(VI) 吸附量随 pH 增加而减少。胡静^[29]研究表明,铬在碱性条件下(pH = 12)的解吸率高于中性条件下(pH = 6.8)的解吸率,提高 pH 值均有利于六价铬从土壤颗粒表面的解吸。刘云惠等^[30]的实验结果也表明,当淋洗液的 pH 值为 2.0 ~ 6.5 时,土壤颗粒对六价铬的吸附量与 pH 值的大小成正比,但变化幅度较小;当 pH 值大于 6.5 时,土壤中六价铬的吸附量随着 pH 值升高急剧下降;当 pH 为 8.5 时,土壤颗粒基本不再吸附六价铬。孙德林^[31]的研究也表明,铬污染土壤六价铬解吸效率随 pH 值的升高而增加。可见,淋洗剂的 pH 值会影响重金属铬的解吸和吸附行为,但淋洗效果同时也受污染土壤本身 pH 值的影响,因此适宜的淋洗剂 pH 值应根据土壤和淋洗剂的性质来确定。

2.4 淋洗时间

通常情况下淋洗效果和淋洗时间成正比,但是并非淋洗时间越长越好,难以淋洗的重金属并不会随着时间的增加而产生明显的效果,在实践中也要综合考虑运行时间、运行成本和淋洗效率等因素。夏张等^[27]研究表明,CA、HNO₃、EDTA-2Na 三种淋洗剂对 Cr 的淋洗率随时间增长先增加后趋于平稳,这是由不同形态的 Cr 和土壤结合力的大小不同,最佳淋洗时间为 12 h。张文艺等^[32]采用腐解稻草 DOM 提取液洗脱六价铬污染土壤,当固液比为 1:15 时,通过 DOM 提取液 1 次振荡,总铬和六价铬洗脱率随着淋洗时间的延长先不断增加,后趋于平缓,在 4 h 时达到最大。陈松敏^[33]采用草酸和柠檬酸对六价铬污染土壤进行淋洗,结果表明并非淋洗时间越长,效果越好,最佳淋洗时间为 4 h。李润^[34]采用 0.5 mol/L 的柠檬酸溶液对某铬盐厂的铬污染土壤进行淋洗,经过 12 h 后,土壤中残留的六价铬含量为 10.96 mg/kg,低于建设用地土壤相关标准中一类用地管制值规定的 30 mg/kg。邓江兰等^[35]采用 0.5 mol/L 的复合淋洗剂对某铬污染场地土壤进行淋洗,60 min 后,土壤中的铬浓度便可达到修复目标值。可见,淋洗时间直接关系到去除率,不同淋洗剂的最佳淋洗时间不同,但在实际工程中淋洗时间主要由后续污染土壤的二次利用目的决定。

2.5 液固比

液固比主要影响淋洗剂与土壤的接触和混合效果,液固比过低,则土壤与淋洗剂不能充分混合,而液固比过高,则会产生大量废水,增加后续处理的成

本和难度^[36]。郭平等^[16]用草酸、柠檬酸和复合淋洗剂淋洗铬污染土壤时,采用最佳液固比 10:1。夏张等^[27]用 CA、HNO₃、EDTA-2Na 淋洗铬污染土壤时,采用最佳液固比 20:1。张文艺等^[32]用腐解稻草 DOM 提取液洗脱六价铬污染土壤,液固比采用 15:1。可见,不同程度的铬污土壤、淋洗剂种类和浓度、淋洗去除率要求等都会导致液固比有所差异。

2.6 淋洗温度

淋洗温度对土壤中铬的去除效率有一定影响,不同的淋洗方式、淋洗剂要求的最佳淋洗温度也不同^[37]。胡静^[29]采用电化学淋洗铬污染土壤,表明升高温度能显著提高六价铬从土壤颗粒表面的解吸效率。刘越^[38]的研究表明,EDTA 和柠檬酸的最佳淋洗温度均为 30 ℃,草酸的最佳淋洗温度为 40 ℃,去离子水的淋洗率随着温度的升高而升高。解楠^[39]选用硫酸钠淋洗铬污染土壤,通过正交试验得到最佳淋洗温度为 50 ℃。张恩智^[40]选用多种微生物的菌液对六价铬污染土壤进行生物淋洗,通过淋洗条件优化,最佳淋洗温度为 35 ℃。满益东等^[41]采用柠檬酸淋洗六价铬污染土壤,将淋洗温度提高至 90 ℃,可进一步显著降低难溶态六价铬浓度。但在多数研究中,考虑到处理成本或净化要求,淋洗温度一般选用室温^[16,32,42,43]。

2.7 淋洗时其他强化方式

淋洗时也可以通过增加其他辅助方式实现淋洗过程的优化,具体包括超声强化、微波强化、化学强化等^[44]。超声波可以使液体更快地进行机械运动,从而有利于淋洗剂与土壤的粘结;超声波还能有效地分解土壤黏粒团聚体,加速其中重金属元素的释放,将污染粒子的形态变为游离态,从而提高重金属去除率。微波主要通过短时间内提高温度、促进重金属迁移活性、增加反应速率和重金属的转化,从而达到提高淋洗去除率的效果。唐晗^[45]分别采用超声波、微波、加热方式结合复配淋洗剂淋洗污染土壤,结果表明,超声 1 h + 振荡 4 h 对铬的淋洗效率 86.62%,微波(8 min, 600 W)的淋洗效率为 84.34%,加热(6 h, 60 ℃)的淋洗效率为 84.35%;与振荡淋洗相比,超声波、微波、加热的淋洗效率均有提升。李华鹏^[46]研究表明,微波强化 H₂O₂ 氧化-淋洗联合使用时,在最佳条件下,铬污染厂区四个场地的总铬去除率分别 60.79%、53.66%、89.77%、83.53%;超声强化 H₂O₂ 氧化-淋洗联合使用时,在最佳条件下,铬污染厂区四个场地的总铬去除率分

别 12.44%、8.39%、61.45%、57.67%。与添加强化措施前相比,四个场地的总铬去除效率均有所提升。王沐等^[47]分别采用 H_2O_2 氧化、盐酸和柠檬酸淋洗电镀工厂铬污染黏性土壤,淋洗后土壤中 Cr(VI) 浓度仍然超过修复目标值,而采用 H_2O_2 氧化联合盐酸和柠檬酸化学淋洗,土壤中 Cr(VI) 去除率为 85.5%,总铬去除率为 50%,满足修复要求。此外,贾桂云^[48]采用 UV/ H_2O_2 氧化-淋洗联合修复技术、刘亦博^[49]采用电刺激/ H_2O_2 氧化-淋洗修复技术、包丽婷^[50]采用淋洗与还原联合技术、纪国柱^[51]采用焦亚硫酸钠电化学淋洗还原修复技术去除污染土壤中的重金属铬,都取得很好的修复效果。

3 结束语和展望

铬污染土壤淋洗受土壤性质、淋洗剂性质和淋洗时工作条件等因素的影响,目前在实验室模拟和实际修复工程方面都有较多的研究及应用,也都取得较好的铬去除效果,但也存在黏性土壤的铬淋洗率不高、淋洗后土壤的生态风险评价不足、淋洗液的二次利用不足以及重金属铬的回收率不高等问题,因此铬污染土壤淋洗技术未来应注重以下几方面的研究。

1) 对于铬淋洗效果较差的黏性土壤和细颗粒土壤,可开发适合低渗透黏性土壤的淋洗剂,或者使用表面活性剂提高土壤渗透性后再进行淋洗,以提高淋洗效果。

2) 对于单一淋洗剂或复合淋洗剂,往往重在考虑铬的淋洗效果,对淋洗后土壤的综合质量和生态风险评价还不足。为此可以考虑开发更为绿色和高效的淋洗剂,减少淋洗剂对土壤理化性质的改变,并及时开展淋洗后土壤的生态风险评价工作。

3) 淋洗后废水中含有大量的污染物,必须经过适当的处理才能排入污水系统,因此后续可开发更有效的铬回收工艺以及淋洗剂循环利用技术,实现铬的资源化利用和淋洗剂的闭路循环。

[参考文献]

- [1] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 环境教育, 2014(5):8-10.
- [2] 蒋子文,全学军,李纲,等. 铬渣资源化利用研究进展[J]. 无机盐工业, 2022, 55(2):26-35.
- [3] 颜加情,周书葵,段毅,等. 电动-淋洗联合修复重金属污染土壤研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(12):3634-3640.
- [4] 环境保护部和国土资源部等相关负责人就全国土壤污染状况调查答记者问[J]. 中国环保产业, 2014(5):12-14.
- [5] 胡造时,苏渭水,李丽和. 淋洗剂法修复铬污染土壤的研究现状及展望[J]. 四川环境, 2023, 42(3):335-339.
- [6] ALABOUDI K A, AHMED B, BRODIE G. Soil washing technology for removing heavy metals from a contaminated soil: a case study [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(2):1029-1036.
- [7] GITIPOUR S, AHMADI S, MADADIAN E, et al. Soil washing of chromium- and cadmium-contaminated sludge using acids and ethylenediaminetetra acetic acid chelating agent [J]. Environmental Technology, 2016, 37(1):145-151.
- [8] 可欣,李培军,巩宗强,等. 重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5):145-149.
- [9] 曹晓雅,曹俊雅,李媛媛,等. 表面活性剂对 SRB 修复 CR 污染土壤的影响[C]//中国化工学会 2013 年学术年会论文集, 2013:477-477.
- [10] 陈锋,傅敏,马文琳. 表面活性剂修复重金属污染土壤的研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(8):79-82.
- [11] HONG K J, TOKUNAGA S, ISHIGAMI S, et al. Extraction of heavy metals from MSW incinerator fly ash using saponins [J]. Chemosphere, 2000, 41(3):345-352.
- [12] 丁宁,刘伊,徐贝妮,等. 鼠李糖脂和月桂基醚硫酸钠对土壤中 Cd 和 Pb 去除效果的比较[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12):326-330.
- [13] 栾雪,吴磊,谢晴,等. 可生物降解螯合剂 GLDA 土柱淋洗修复镉锌污染土壤[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(2):134-140.
- [14] WASAY S A, TOKUNAGA S, BARRINGTON S. Organic acids for the in situ remediation of soils polluted by heavy metals: Soil flushing in columns [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, 127(1/4):301-314.
- [15] 孙玉焕,宋淑敏,张亮. 复合淋洗剂柱淋洗法修复工业废弃地铬污染土壤[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2):191-196, 201.
- [16] 郭平,李欣锋,郭美彤,等. 复合淋洗剂对土壤中铬的淋洗规律[J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 58(6):1507-1514.
- [17] 杨宗政,李文轩,董春婷,等. 螯合剂与低分子有机酸复配淋洗修复 Cr(VI) 污染土壤[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-17 [2024-03-19].

- [18] MA Wanzheng, WANG Hong, LI Xiaoliang, et al. Study on Screening of Chromium-Contaminated Soil Eluents and Optimization of Elution Conditions[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2022, 233(12): 527.1 - 527.8.
- [19] 关峰. 化学淋洗法修复工业场地铬污染土壤的过程控制及效果研究[D]. 青岛科技大学, 2018.
- [20] 郭涛, 曹宏斌, 杨秀红. 重金属铬污染土壤淋洗修复技术研究进展[C]//2010 重金属污染综合防治技术研讨会论文集, 2010:130 - 134.
- [21] 肖罗怡. 植物材料水浸提剂对污染土壤锌和镉淋洗效率研究[D]. 成都:四川农业大学, 2016.
- [22] 曹雅茹. 单一植物淋洗剂及其与 HPMA 和 PBTCA 复合对土壤重金属的去除研究[D]. 成都:四川农业大学, 2019.
- [23] 丁秀红. 山东省典型土壤对重金属的吸附/解吸及其结合机理的研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [24] CHENG Shufen, HUANG Chinyuan, TU Yaoting, et al. Remediation of soils contaminated with chromium using citric and hydrochloric acids; the role of chromium fractionation in chromium leaching[J]. *Environmental Technology*, 2011, (32)8: 879 - 889.
- [25] 姜晓琪, 李旭霖, 张娇, 等. 柠檬酸对铬污染不同质地土壤萃取与淋洗的研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 278 - 281.
- [26] 谢明月, 曹明超, 任宇鹏, 等. 土柱淋洗法修复铬污染土壤的水力梯度优化试验[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(2): 627 - 633.
- [27] 夏张, 何苑静, 高康宁, 等. 三种淋洗剂淋洗脱除土壤中 Cr、Cd 的效果研究[J]. *应用化工*, 2022, 51(9): 2505 - 2510.
- [28] 洪祖喜. 土壤淋洗技术分析及应用现状[J]. *节能与环保*, 2022(9): 88 - 89.
- [29] 胡静. 铬污染土壤电化学淋洗还原修复实验研究[D]. 重庆大学, 2017.
- [30] 刘云惠, 魏显有, 王秀敏, 等. 土壤中铬的吸附与形态提取研究[J]. *河北农业大学学报*, 2000, 23(1): 16 - 20.
- [31] 孙德林. 铬污染土壤电化学淋洗实验研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [32] 张文艺, 陈婕, 朱雷鸣, 等. 腐解稻草 DOM 提取液洗脱六价铬污染土壤试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 196 - 202.
- [33] 陈松敏. 研究六价铬在污染土壤淋洗修复技术[J]. *广东化工*, 2023, 50(4): 173 - 175, 172.
- [34] 李润. 某铬盐厂遗址重金属污染特征及修复实验研究[D]. 贵阳:贵州民族大学, 2021.
- [35] 邓江兰, 叶明强, 周泽民, 等. 铬污染场地修复淋洗工艺应用[J]. *有色冶金节能*, 2022, 38(3): 57 - 60.
- [36] 张桐, 张展华, 胡杰华, 等. 淋洗技术在土壤污染修复中的应用与挑战[J]. *环境化学*, 2022, 41(11): 3599 - 3612.
- [37] 宁银中, 李超, 付微. 土壤重金属污染淋洗修复影响因素研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(1): 116 - 119.
- [38] 刘越. 铬污染土壤的综合治理方法研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2019.
- [39] 解楠. 工业铬污染场地治理技术研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2021.
- [40] 张恩智. Cr(VI) 污染土壤微生物多样性分析及土壤 Cr(VI) 淋洗菌的筛选研究[D]. 重庆理工大学, 2021.
- [41] 满益东, 李东, 胡思扬, 等. 难溶态 Cr(VI) 对重度铬污染土壤淋洗还原修复效果的影响[J]. *环境工程*, 2022, 40(7): 132 - 138, 164.
- [42] ZOU Quan, XIANG Honglin, JIANG Jianguo, et al. Vanadium and chromium-contaminated soil remediation using VFAs derived from food waste as soil washing agents: A case study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232895 - 901.
- [43] 汤迪勇, 向琦, 雷炜东. 有机酸对污染土壤中重金属镉、铬、锰解吸效果的影响研究[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 44 - 50.
- [44] 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.
- [45] 唐晗. 复合重金属污染土壤强化淋洗修复技术研究[D]. 常州:常州大学, 2022.
- [46] 李华鹏. 微波、超声强化 H₂O₂ 氧化-淋洗联合修复铬污染场地技术研发[D]. 济南:山东师范大学, 2017.
- [47] 王沐, 宋骏杰, 谢荣焕. H₂O₂ 氧化联合化学淋洗修复电镀工厂铬污染黏性土壤的试验研究[J]. *环境工程*, 2022(4)8: 125 - 130.
- [48] 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]. 济南:山东师范大学, 2017.
- [49] 刘亦博. 电刺激/H₂O₂ 氧化-淋洗修复铬污染场地技术研发[D]. 济南:山东师范大学, 2018.
- [50] 包丽婷. 淋洗与还原联合技术对铬污染土壤的解毒研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2020.
- [51] 纪国柱. 铬污染土壤焦亚硫酸钠电化学淋洗还原修复实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.

Research Progress on Treatment of Chromium Contaminated Soil by Leaching Method

GUO Bohou, CHEN Ruijie, ZHANG Jiyao, LING Xiaojie, WANG Juan

(College of Biological, Chemical Science and Engineering, Jiaying University, Jiaying 314033, China)

Abstract: Heavy metal chromium not only pollutes groundwater after entering the soil, but also accumulates in plants and endangers human health. Leaching technology has the advantages of simple operation, cost saving and remarkable effect. It is a commonly used treatment method for chromium contaminated soil. This paper summarized the current research on the leaching of chromium-contaminated soil, introduced the leaching principle, application and existing problems of various eluents, and analyzed the factors affecting the leaching effect, such as soil properties, eluent properties, eluent pH value, leaching time, liquid-solid ratio and enhancement methods. It was pointed out that the leaching of chromium-contaminated soil has problems such as low efficiency of chromium leaching in cohesive soil, insufficient ecological risk assessment of soil after leaching, and insufficient treatment and resource utilization of leaching wastewater. In the future, it is necessary to strengthen the research on these problems.

Key words: chromium pollution; soil leaching; type of eluent; influencing factors

(上接第 45 页)

recent years. The application of metal materials in the electrolytic cell mainly includes low resistance anode steel claw, high conductivity cathode steel rod, super wear-resistant shell hammer, etc. The application of coating materials mainly includes heat reflection insulation coating of the tank cover plate, anode and steel claw oxidation resistance coating, etc. The application of ceramic materials mainly includes ceramic-based cathodes and ceramic-based inert anodes. Carbon materials are mainly used in graphite or graphitized cathode carbon blocks; in terms of refractory materials, there are mainly new anti-seepage and thermal insulation materials, new silicon carbide/carbon composites and so on. While continuously optimizing the production and operation process, domestic electrolytic aluminum production enterprises pay more and more attention to the application of new materials in energy-saving and efficiency-increasing technology. At the same time, it is pointed out that the application of new materials still needs systematic research.

Key words: steel claw; thermal insulation coating; inert anode; cathode carbon block; ceramic materials; coating material; refractory materials