

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.101

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



腐解稻草 DOM 提取液洗脱六价铬污染土壤试验研究

张文艺¹, 陈婕¹, 朱雷鸣², 胡林潮¹, 陈杰¹, 吴光银¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 中石化广州工程有限公司, 广州 510000)

摘要:工矿企业产生的铬渣、含铬废水由于管理不善导致土壤铬污染严重,迫切需要寻求低成本铬污染土壤修复技术。提出腐解稻草中溶解性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)提取液洗脱铬污染土壤的技术,通过实验室模拟试验,以2种铬污染土壤(总铬含量分别为121.54、941.90 mg/kg,六价铬含量分别为119.90、856.90 mg/kg)为研究目标,采用振荡淋洗法考察了固液比、淋洗时间、淋洗次数等因素对土壤中总铬、六价铬洗脱效果的影响,并探讨了淋洗前后铬形态变化及淋洗后土壤残留六价铬的持续钝化能力。结果表明:稻草经35 d腐解后的DOM提取液洗脱土壤中铬效果最佳,确定为最佳淋洗剂;固液比1:15、淋洗4 h/次、淋洗2次为最佳淋洗工艺条件,该条件下,2种铬污染土壤总铬分别洗脱了47.79%、85.92%,六价铬含量分别削减了51.76%、95.09%;DOM提取液呈弱碱性,含大量羧基、羟基及酚类物质,对水溶态、弱酸提取态和残渣态铬有较好的洗脱效果,有效降低了土壤环境风险,且能持续钝化淋洗后土壤中残余的六价铬。

关键词:铬污染;土壤污染;溶解性有机质;稻草;铬形态

中图分类号:X53;X703 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)05-0196-07

Experimental study on hexavalent chromium contaminated soil elution by DOM extract from rice straw

ZHANG Wenyi¹, CHEN Jie¹, ZHU Leiming², HU Linchao¹, CHEN Jie¹, WU Guangyin¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China;
2. Sinopec Guangzhou Engineering Co., Ltd, Guangzhou 510620, P. R. China)

Abstract: Chromium slag and chromium-containing wastewater produced by some industrial and mining enterprises in our country often cause serious chromium pollution in soil due to poor management. It is urgent to seek low-cost remediation technology for chromium-contaminated soil. A technology for eluting chromium-contaminated soil with an extract of Dissolved Organic Matter (DOM) in decomposing rice straw was proposed. Through laboratory simulation tests, two types of chromium contaminated soil (the total chromium content was 121.54 mg/kg and 941.90 mg/kg respectively, and the hexavalent chromium was 119.90 mg/kg and 856.90 mg/kg respectively) as the research goals, the effect of solid-liquid ratio, leaching time, leaching times and other factors on the elution effect of total chromium and hexavalent chromium in the soil was investigated by the oscillation leaching method. The chromium form changes

收稿日期:2020-03-31

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技计划(319005-7);江苏省科技支撑计划(BE2016653)

作者简介:张文艺(1968-),男,教授,主要从事污染控制与生态修复研究,E-mail: zhangwenyi888@sina.com。

Received:2020-03-31

Foundation items: China Petroleum & Chemical Corporation Science and Technology Plan Project (No. 319005-7);
Jiangsu Science and Technology Support Plan Project (No. BE2016653).

Author brief: ZHANG Wenyi (1968-), professor, main research interests: pollution control and ecological restoration research, E-mail: zhangwenyi888@sina.com.

before and after leaching and the continuous passivation ability of hexavalent chromium remaining in the soil after leaching were also discussed. The results showed that DOM extract from rice straw decomposed for 35 had the best effect of eluting chromium in soil and was determined as the best eluent. The solid-liquid ratio being 1:15, leaching for 4 h/time, and leaching for 2 times is the best leaching process condition. Under this condition, the total chromium content in soil is eluted by 47.79% and 85.92%, and the hexavalent chromium content is reduced by 51.76% and 95.09%, respectively. DOM extract is weakly alkaline and contains a large number of carboxyl, hydroxyl and phenolic substances. It has good elution effect on chromium in water soluble, weak acid extracted and residue state, effectively reduces the environmental risk of soil, and can continuously passivate the residual hexavalent chromium in the leached soil.

Keywords: chromium pollution; soil pollution; dissolved organic matter; rice straw; speciation of chromium

工矿企业产生的铬渣、含铬废水常由于管理不善而引起严重的土壤铬污染^[1]。土壤中铬主要以三价铬和六价铬的形式存在,六价铬毒性高,迁移性强,是一种潜在的致癌物质^[2]。目前,常用的修复含铬土壤的方法有物理法、化学法和微生物法。化学淋洗法因其见效快、操作方便等优势而被广泛应用,通过酸溶液、表面活性剂等化学淋洗剂促进铬发生解吸、螯合或络合作用,使其从土壤转移至淋洗液,达到去除目的^[3]。然而化学药剂易造成土壤板结、二次污染土壤或地下水,因此,亟需寻找出一种修复铬污染土壤的绿色高效淋洗剂。

中国是农业大国,每年生产稻草等植物秸秆达8亿t以上,富含大量有机物及营养元素,为避免资源浪费和环境污染,往往被制成肥料、饲料等。大量研究表明,溶解性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)是自然界中一种重要的、活跃的组分,其化学行为直接影响土壤各种元素,尤其是金属离子的形态。张庆沛等^[4]曾将未腐熟秸秆还田,发现土壤DOM含量升高,显著降低了土壤中镉的有效性;高瑞莉等^[5]将水稻秸秆制成生物炭,加入镉、铅复合污染的土壤中,促进了重金属可提取态向残渣态的转变;王豪吉等^[6]将水稻秸秆与铬污染土壤混合培养,发现随着水稻秸秆投加量的增大和培育时间的延长,土壤六价铬含量逐步降低。以上几种向土壤施加稻草的措施虽然能改变土壤重金属形态,降低毒性,但存在可逆的风险,难以长期推广。

针对铬污染土壤不易治理的难题,响应“以废治废”新理念,前期以猪粪源DOM提取液为淋洗剂洗脱铬污染土壤,得到在固液比为1:10、振荡6h、淋洗1次条件下,当土壤总铬含量为121.54 mg/kg(六价铬含量为119.9 mg/kg)时,其总铬和六价铬

洗脱率分别为43.27%、48.99%;当土壤总铬含量为941.9 mg/kg(六价铬含量为856.9 mg/kg)时,洗脱率达84.89%、96.32%,依据《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018),修复后土壤中六价铬含量低于第二类建设用地管制值,因此,猪粪源DOM提取液可作为一种修复铬污染土壤的高效绿色淋洗剂。笔者以稻草为原料,收集0~50d内腐解释放的DOM,采用振荡淋洗的方式,研究不同时间DOM提取液对土壤中铬的洗脱效果,并找出最佳淋洗工艺参数,以期在避免稻草资源浪费的同时提供一种高效无害化修复铬污染土壤的方法。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

恒温培养箱、恒温振荡箱、总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)仪、AAS原子吸收分光光度计、紫外分光光度计;二苯碳酰二肼,其他化学试剂为分析纯;试验用水为去离子水。

1.2 供试材料

试验用稻草及土壤取自于江苏省常州市武进区某稻田。土壤于通风处自然风干,去除石块、树枝等杂质后过2mm网筛;依据《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)六价铬管控值,将土壤分成2份,用无水铬酸钠染毒,其六价铬理论含量分别为100、1000 mg/kg,通风环境下老化2个月;老化后土壤经粉碎过2mm网筛,小部分研磨过0.149mm网筛,密封保存。将取回的稻草烘干,粉碎成1cm左右,于-18℃下保存备用。

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test soil

土壤	pH 值	总有机碳/(g · kg ⁻¹)	DOM/(mg · L ⁻¹)	总铬/(mg · kg ⁻¹)	三价铬/(mg · kg ⁻¹)	六价铬/(mg · kg ⁻¹)
A	8.44	14.17	8.14	121.54	1.64	119.90
B	8.54	14.52	10.88	941.90	85.00	856.90

1.3 试验方法

1.3.1 腐解稻草中 DOM 的制备 取新鲜土样于室内放置 4 d,待微生物活化;以质量比 $m(\text{土壤}):m(\text{自来水})=1:15$ 将其混合,150 r/min 振荡 2 h,静置过夜,上清液为微生物接种液;设置质量比 $m(\text{石英砂}):m(\text{稻草})=10:1$,保持田间含水率 80% 左右,置于 25 °C 环境中培养 2、4、6、8、10、15、20、35、50 d,制得稻草腐熟液;按 $m(\text{稻草}):V(\text{去离子水})=1:20$ 加去离子水于腐熟液中,连续振荡 2 h,5 000 r/min 离心 30 min,收集上清液即为 DOM 提取液,测定 pH 值及 DOM 浓度后于 4 °C 下保存^[7]。

1.3.2 淋洗剂的优化 将 5 g 铬污染土壤置于塑料管中,分别加入 50 mL 培养 2、4、6、8、10、15、20、35、50 d 收集的 DOM 提取液,25 °C 下以 200 r/min 振荡 6 h,通过检测淋洗后土壤中总铬及六价铬含量对比洗脱效果,将效果最佳的 DOM 提取液确定为淋洗剂。

1.3.3 稻草 DOM 提取液淋洗铬污染土壤振荡试验 以去离子水作对比试验,将 5 g 土壤置于塑料管中,加入 DOM 提取液,设置 $m(\text{土壤}):V(\text{DOM 提取液})$ 分别为 1:5、1:10、1:15 和 1:20,25 °C 环境中以 200 r/min 振荡 6 h,探究最优固液比;将 5 g 土壤样品置于塑料管中,根据前期探究出的最佳固液比加入 DOM 提取液,设置振荡速度 200 r/min,25 °C 下分别淋洗 4、6、8、10、12 h,探究最佳淋洗时间;基于前期探究出的最佳淋洗条件,将 5 g 土壤置于塑料管中,设置振荡速度 200 r/min,25 °C 下分别淋洗 1~4 次,探究最佳淋洗次数。

1.3.4 铬化学形态分析 采用 BCR 连续提取法对原污染土壤及淋洗后去除率最高的土壤进行铬形态分析。将土壤重金属形态分为水溶态、弱酸提取态、可还原态、可氧化态、残渣态 5 种形态,依据火焰原子吸收分光光度法测定不同形态铬的质量浓度。

1.4 测试方法

DOM 提取液 pH 值测定采用 pH 仪,DOM 浓

度用 TOC 分析仪测定,DOM 分组方法依据 Leenheer 分组法,总铬测定采用直接吸入火焰原子分光光度法,六价铬测定采用二苯碳酰二肼分光光度法。土壤总铬测定采用火焰原子吸收分光光度法,土壤六价铬测定采用碱溶液提取-火焰原子吸收分光光度法,土壤基本理化性质的分析采用常规方法。

2 结果

2.1 腐解稻草中 DOM 提取液对铬污染土壤的洗脱效果

以不同天数稻草 DOM 提取液作淋洗剂,设置固液比为 1:10,25 °C 下以 200 r/min 振荡 6 h 后,土壤总铬和六价铬去除效果变化如图 1 所示。

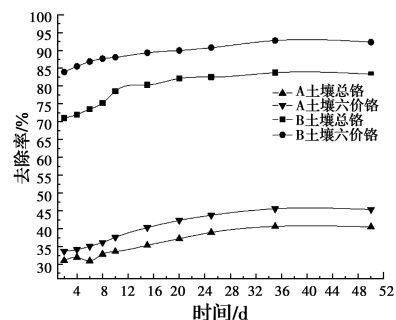


图 1 不同天数 DOM 提取液淋洗后土壤铬洗脱效果变化图

Fig. 1 Change chart of soil chromium elution effect after DOM extract leaching in different days

由图 1 可知,0~50 d 内,随着天数增加,DOM 提取液对 A、B 土壤中总铬和六价铬洗脱率总体均呈上升趋势,35 d 时达到最高,然后趋于平缓,因此,确定 35 d DOM 提取液为本研究淋洗剂。此时,A 土壤总铬浓度从 121.54 mg/L 降至 72.13 mg/L,去除率为 40.56%,六价铬从 119.9 mg/L 降至 65.23 mg/L,洗脱了 45.59%;B 土壤总铬浓度从 941.90 mg/L 降至 153.06 mg/L、六价铬浓度从 856.90 mg/L 降至 61.87 mg/L,洗脱率分别高达 83.75%、92.78%。

2.2 土壤铬洗脱效果影响因子分析

2.2.1 固液比对铬污染土壤洗脱率的影响 基

于前期试验,得出稻草腐熟 35 d 的 DOM 提取液对铬污染土壤洗脱效率达到最高。为了进一步探究稻草 DOM 对土壤铬淋洗效果,将 5 g 土壤置于塑料管,设置固液比分别为 1:5、1:10、1:15、1:20,25 °C 下以 200 r/min 振荡 6 h,考察固液比对去除效果的影响。

由图 2 可知,随着 DOM 提取液的增加,A、B 土壤总铬及六价铬洗脱率均先升高后趋平。当固液比为 1:15 时,洗脱效果达到最佳,A 土壤残留总铬及六价铬分别为 69.14、62.88 mg/kg,洗脱了 43.11%、47.56%,B 土壤残留量分别为 196.95、74.29 mg/kg,去除率高达 79.09%、91.33%。因此,确定 1:15 为最佳固液比。研究还发现,以去离子水洗脱试验作对比,去离子水对土壤中总铬洗脱效果总体优于 DOM 提取液,对六价铬去除效率略低于 DOM,这可能是因为在在此固液比下,清水对总铬洗脱效果较好,而 DOM 淋洗后土壤中有机质含量增多,为土壤残留六价铬还原提供了大量电子容库,使得 DOM 对六价铬淋洗效果更好。

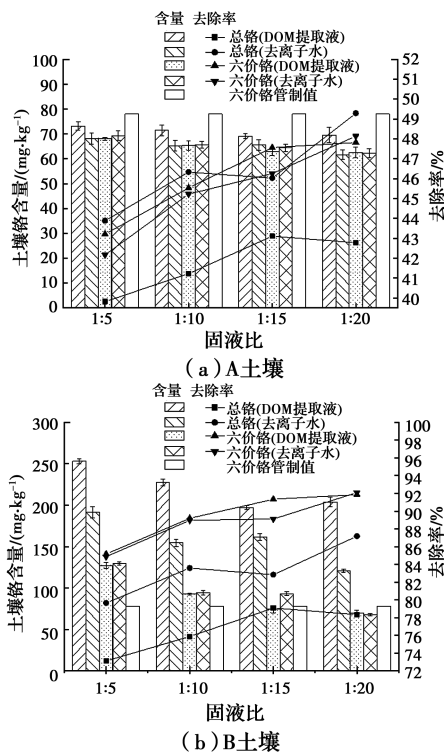


图 2 A、B 土壤不同固液比铬洗脱效果图
Fig. 2 Effect diagram of chromium elution with different solid-liquid ratio in soil A and B

2.2.2 淋洗时间对铬污染土壤洗脱率的影响

淋洗时间是土壤淋洗技术中一个重要的工艺参数,找到适宜时间对土壤修复效果十分关键。图 3 是在

固液比为 1:15 时,DOM 提取液 1 次振荡淋洗时间对铬洗脱效果的影响,其在土壤中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。

由图 3 可知,4 h 时,DOM 提取液对土壤总铬及六价铬洗脱率显著优于去离子水,A 土壤总铬和六价铬去除率分别为 43.27%(降至 68.95 mg/kg)、51.59%(降至 58.04 mg/kg),而 B 土壤洗脱效果更好,达 85.24%(降至 139.02 mg/kg)、91.06%(降至 76.61 mg/kg)。

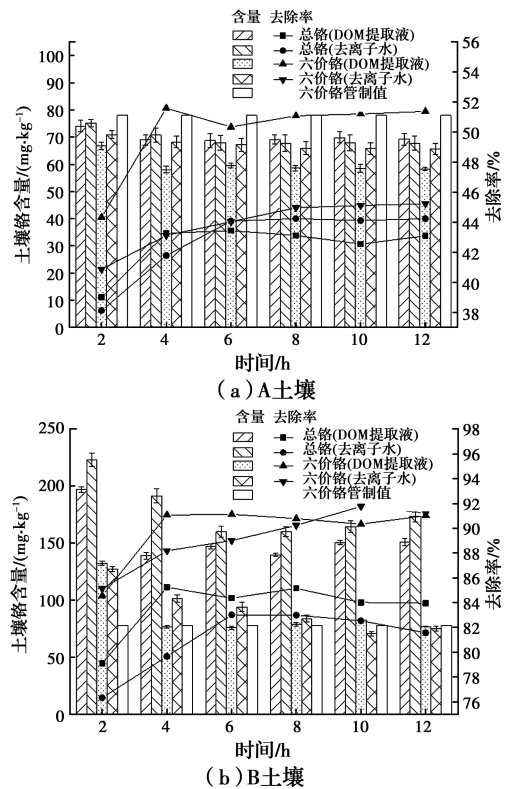


图 3 A、B 土壤不同淋洗时间铬洗脱效果图
Fig. 3 Effect diagram of chromium elution at different leaching times in soil A and B

2.2.3 淋洗次数对铬污染土壤洗脱率的影响

利用稻草 DOM 提取液对 A、B 土壤分别进行 2、3、4 次淋洗,其结果如表 2 所示。DOM 提取液前 2 次淋洗效果好,经 2 次淋洗后,A 土壤总铬去除率和六价铬去除率分别为 47.79%、51.76%,B 土壤分别为 85.92%和 95.09%,第 3、4 次洗脱效果不明显,这是由于前两次将土壤中大部分可提取态的重金属都洗脱掉了。

修复后测得 A、B 土壤 pH 值分别为 8.07、8.14,DOM 浓度分别为 18.95、16.32 mg/L。结合表 2、表 3 可以看出,腐解稻草中 DOM 提取液对 A、B 土壤中铬

2 次洗脱率与猪粪源 DOM 提取液 1 次洗脱率相近。

表 2 DOM 提取液淋洗次数对 A、B 土壤中铬去除效率的影响

Table 2 Effect of DOM extract leaching times on chromium removal efficiency in soils A and B

淋洗次数	A 土壤去除率/%		B 土壤去除率/%	
	总铬	六价铬	总铬	六价铬
1	42.98	48.64	83.37	90.52
2	4.81	3.12	2.55	4.57
3	1.04	2.13	1.02	1.59
4	0.12	0.15	0.02	0.04

表 3 不同淋洗剂淋洗铬污染土壤效果对比表

Table 3 Comparison of effects of different leaching agents on chromium contaminated soil

淋洗剂	A 土壤去除率/%		B 土壤去除率/%		淋洗后 A 土壤含量/(mg · kg ⁻¹)		淋洗后 B 土壤含量/(mg · kg ⁻¹)	
	总铬	六价铬	总铬	六价铬	总铬	六价铬	总铬	六价铬
猪粪源沼液	43.27	48.99	84.89	96.32	68.95	61.16	142.32	31.54
稻草 DOM 提取液	47.79	51.76	85.92	95.09	63.46	57.84	132.62	42.07

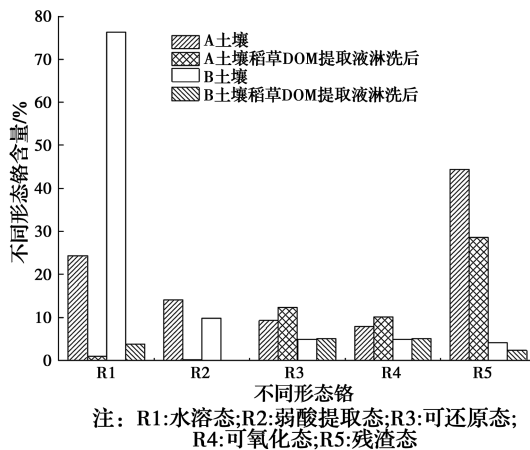


图 4 处理前后铬形态的变化

Fig. 4 Change of chromium morphology before and after treatment

3 讨论

3.1 稻草 DOM 提取液对铬形态变化的影响

由图 4 处理前后铬形态变化可知,稻草 DOM 提取液淋洗后,水溶态、酸可提取态和残渣态比例显著减少,可氧化态和可还原态略有升高。水溶态和酸可提取态明显减少,主要是因为这部分铬活性较高,淋洗过程中易被洗脱^[8];残渣态极其稳定,但仍有减少,可能是因为 DOM 中羟基等物质占据了土壤位点,使得固定在土壤中的部分残渣态铬解吸,从土壤淋出;可氧化态和可还原态比例略有增加,可能

2.3 淋洗前后土壤铬形态变化

将淋洗前后 A、B 土壤进行 BCR 形态分级,研究稻草 DOM 提取液对不同形态铬提取的影响,结果如图 4 所示。在未处理的土壤中,A 土壤中铬主要以水溶态、弱酸提取态和残渣态为主,分别占 24.34%、44.47%,B 土壤中铬主要以水溶态和弱酸提取态为主,分别占 76.31%、9.80%。当用稻草 DOM 提取液淋洗后,A、B 土壤铬形态分布均发生明显变化,水溶态、弱酸提取态和残渣态减少明显,可氧化态和可还原态有所提高。

是因为淋洗后土壤中 DOM 浓度升高,pH 值呈微碱性,电子增多,结合试验淋洗效果数据,A、B 土壤六价铬去除量大于总铬去除量,说明经过 DOM 提取液淋洗后土壤中部分残余六价铬被 DOM 还原成三价铬形式存在。Stewart 等^[9]学者曾发现此 pH 值下土壤对三价铬有较强的吸附能力,导致被还原的三价铬被吸附,Choppala 等^[10]也曾证明土壤有机质含量增加会增强土壤对三价铬的吸附能力,因此,可氧化态和可还原态铬比例略增加。淋洗后的水溶态、酸可提取态和残渣态比例显著减少,可氧化态和可还原态略有升高,说明淋洗过后铬生物活性大大降低,毒性削弱,同时带走部分极为稳定的铬,避免今后活化产生危害,从而达到修复的目的。

3.2 稻草 DOM 提取液对铬污染土壤洗脱机理

稻草腐解过程中,前期 DOM 组分主要以疏水中性(Hydrophobic Neutral, HON)、亲水性(Hydrophilic, HIM)物质为主,随着腐解反应的进行逐渐转化为以酸不溶(Acid Insoluble, AIM)、疏水酸性(Hydrophobic Acid, HOA)及 HIM 物质为主。HON 主要包括碳水化合物、长链脂肪酸、烷基醇等,HIM 包含较多的碳水化合物和羧基、羟基类物质,AIM 和 HOA 为大量多酚类及腐殖物结合成的碳水化合物。0~7 d 内,HON 含量快速上升,随着反应时间进行,其质量分数逐渐下降;0 d 时,HIM 质量分数达到 73.08%,在微生物作用下,其碳

水化合物快速分解,7 d 后 HIM 质量分数降至 21.37%,之后随着时间缓慢减少;35 d 时,DOM 主要以 AIM、HOA 及 HIM 类物质为主,其组分变化如图 5 所示。杨春江等^[11]、Reddy 等^[12]曾研究过羧基、羟基对羧酸脱铬性能的影响,发现,羧基有利于铬的脱除,羟基则加重胶原的水解;Jiang^[13]在研究聚羧酸盐在六价铬/亚硫酸盐反应体系中的作用研究中发现,羧基数越多,除铬效果越明显。本试验稻草腐解 35 d 后的 DOM 提取液对 A 土壤中总铬、六价铬洗脱率分别为 63.46 mg/kg(削减了 47.79%)、57.84 mg/kg(削减了 51.76%),B 土壤总铬和六价铬含量分别降至 132.62 mg/kg(削减了 85.92%)、42.07 mg/kg(削减了 95.09%),达到最佳淋洗效果,原因可能是因为腐解前期 DOM 主要包含碳水化合物及大分子类物质,随着腐解时间的延长,羧酸及酚类物质质量分数占主导且在 35 d 时趋于稳定^[14-15],其与铬有较强的结合能力,使得吸附在土壤表面的部分铬化合物解吸,转为液相,与土壤分离。

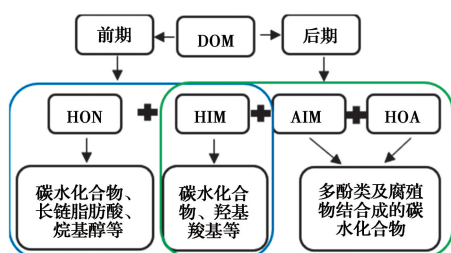


图 5 腐解前后 DOM 组分变化

Fig. 5 Changes of DOM components before and after decomposition

3.3 稻草 DOM 提取液对铬污染土壤钝化机理

刘叶等^[16]通过向种植红苋菜六价铬污染土壤中添加有机肥发现,施用有机肥的红苋菜体内铬累积量减少、产量增加;丁文川等^[17]研究腐殖酸对生物炭去除废水中六价铬的影响发现,腐殖酸能够促进生物炭对六价铬的吸附及还原。DOM 作为有机物的重要组成部分,Pang 等^[18]和 Gao 等^[19]证明其既是三价铬最好的络合剂,也是六价铬最好的还原剂。笔者以重金属铬为目标污染物,基于振荡淋洗法,选用稻草 DOM 提取液为淋洗剂,归因于 DOM 提取液为有机酸、碳水化合物、氨基酸、富里酸和腐殖酸等多种有机物组成的复合淋洗剂,包含大量羧基、羟基和酚基,与六价铬竞争吸附位点,使土壤对六价铬吸附减少,与之分离,又因其对三价铬有较强的络合能力,也能洗脱 DOM 与三价铬生成的络合物;同时,淋洗后土壤 DOM 含量显著增加,土壤中电子增多,使其对残留土壤中的六价铬具有较强的

还原能力。

试验土壤中铬主要以六价铬价态存在,风险极大,以去离子水作对比,发现稻草 DOM 提取液洗脱铬污染土壤效果较优,可行性较高。当固液比为 1:15、进行 2 次淋洗、每次淋洗时间为 4 h 时,去除效果达到最佳。A、B 土壤总铬含量分别降低了 58.08、809.28 mg/kg,而六价铬却减少了 62.06、814.83 mg/kg,这是因为修复后土壤 DOM 含量升高,使得土壤中羧基、羟基、电子等大量增加,未洗脱出来的部分六价铬被络合还原,毒性降低。

4 结论

1) 稻草腐解培养 0~50 d,随着反应的进行,提取的 DOM 组分由以 HON、HIM 为主逐渐转化为以 AIM、HOA 及 HIM 为主,羧基、羟基和酚类物质逐渐增多,其中 35 d 时达到最高,对土壤中铬去除效果最好,确定其为最佳淋洗剂。

2) 腐解稻草中 DOM 提取液洗脱铬污染的最佳工艺条件为:固液比 1:15,淋洗 4 h/次,淋洗 2 次。该条件下,当总铬含量为 121.54 mg/kg(六价铬含量为 119.9 mg/kg)时,修复后土壤总铬和六价铬含量分别降至 63.46、57.84 mg/kg,削减了 47.79%、51.76%;当总铬含量为 941.9 mg/kg(六价铬含量 856.9 mg/kg)时,修复后土壤总铬和六价铬含量分别减少了 85.92%、95.09%,降至 132.62、42.07 mg/kg。

3) 腐解稻草中 DOM 提取液呈弱碱性,包含大量羧基、羟基和酚类物质,有效洗脱了土壤中水溶态、弱酸提取态和残渣态铬,削弱了环境风险,且对土壤残余六价铬有持续钝化作用。

参考文献:

- [1] 李玉皎,李杰. 工业用地土壤铬污染现状及修复技术概述[J]. 绿色科技, 2019(2): 52-55.
LI Y J, LI J. Contamination present condition in industrial land and restoration technologies survey [J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(2): 52-55. (in Chinese)
- [2] MONTES M O, PERALTA-VIDEA J R, PARSONS J G, et al. Spectroscopic determination of the toxicity, absorption, reduction, and translocation of Cr(VI) in two Magnoliopsida species [J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(2): 168-187.
- [3] LIN Z B, ZHANG R D, HUANG S, et al. Impact of chemical leaching on permeability and cadmium removal from fine-grained soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(22): 18229-18239.
- [4] 张庆沛,李冰,王昌全,等. 秸秆还田配施无机改良剂

- 对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2345-2352.
- ZHANG Q P, LI B, WANG C Q, et al. Effects of combined application of straw and inorganic amendments on cadmium speciation and bioavailability in paddy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2345-2352. (in Chinese)
- [5] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- GAO R L, ZHU J, TANG F, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 251-256. (in Chinese)
- [6] 王豪吉, 江滔, 苏淑敏, 等. 水稻秸秆用于修复 Cr(VI)污染土壤的研究[J]. 环境影响评价, 2017, 39(3): 79-83.
- WANG H J, JIANG T, SU S M, et al. Research on Cr(VI) contaminated soil remediation with rice straw [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2017, 39(3): 79-83. (in Chinese)
- [7] 肖燊杰. 水稻秸秆腐解产生溶解性有机质的分组组成及其环境意义[D]. 四川 雅安: 四川农业大学, 2009.
- XIAO Y J. Composition of dissolved organic matter produced by decomposition of rice straw and its environmental significance [D]. Yaan, Sichuan; Sichuan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [8] 范明霞, 童仕唐. 活性炭上吸附态重金属稳定性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 312-316.
- FAN M X, TONG S T. Stability of heavy metals by adsorption on activated carbons [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 312-316. (in Chinese)
- [9] STEWART M A, JARDINE P M, BARNETT M O, et al. Influence of soil geochemical and physical properties on the sorption and bioaccessibility of chromium(III) [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(1): 129-137.
- [10] CHOPPALA G, KUNHIKRISHNAN A, SESHADRI B, et al. Comparative sorption of chromium species as influenced by pH, surface charge and organic matter content in contaminated soils [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 184: 255-260.
- [11] 杨春江, 田荟琳, 付丽红. 羧基对羟基酸脱铬性能的影响[J]. 西部皮革, 2016, 38(7): 36-41.
- YANG C J, TIAN H L, FU L H. Study on the influence of carboxyl group on the dechroming performance of hydroxy acids [J]. West Leather, 2016, 38(7): 36-41. (in Chinese)
- [12] REDDY N A, LAKSHMIPATHY R, SARADA N C. Application of *Citrullus lanatus* rind as biosorbent for removal of trivalent chromium from aqueous solution [J]. Alexandria Engineering Journal, 2014, 53(4): 969-975.
- [13] JIANG B, WANG X L, LIU Y K, et al. The roles of polycarboxylates in Cr(VI)/sulfite reaction system: Involvement of reactive oxygen species and intramolecular electron transfer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 304: 457-466.
- [14] BORGGGAARD O K, HOLM P E, STROBEL B W. Potential of dissolved organic matter (DOM) to extract As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn from polluted soils: A review [J]. Geoderma, 2019, 343: 235-246.
- [15] 韦梦雪, 王彬, 谌书, 等. 川西平原还田秸秆腐解释放 DOM 的光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2861-2868.
- WEI M X, WANG B, CHEN S, et al. Study on spectral characteristics of dissolved organic matter collected from the decomposing process of crop straw in west Sichuan plain [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(9): 2861-2868. (in Chinese)
- [16] 刘叶, 郭良珍, 杨杰文, 等. 有机肥缓解红苋菜六价铬毒害效应研究[J]. 西北农业学报, 2019, 28(5): 789-795.
- LIU Y, GUO L Z, YANG J W. Effect of organic fertilizer on alleviation of hexavalent chromium toxicity to red amaranth [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(5): 789-795. (in Chinese)
- [17] 丁文川, 田秀美, 王定勇, 等. 腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3847-3853.
- DING W C, TIAN X M, WANG D Y, et al. Mechanism of Cr(VI) removal from aqueous solution using biochar promoted by humic acid [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(11): 3847-3853. (in Chinese)
- [18] PANG H C, GAO T Z, YU G S, et al. Effect of dissolved organic matter in landfill leachate on the adsorption of heavy metals in soils [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(2): 215-221.
- [19] GAO J X, YANG H X, LI B. Investigating the roles of dissolved organic matter on arsenic mobilization and speciation in environmental water [J]. Clean - Soil, Air, Water, 2016, 44(7): 818-828.