



杨周白露,张望,吴闻东,等.化学淋洗法对石煤矿山放射性-重金属复合污染土壤的修复研究[J].煤炭科学技术,2022,50(9):261-266.  
YANG Zhou Bailu, ZHANG Wang, WU Wendong, *et al.* Study on remediation effect of radioactive-heavy metal contaminated soil in stone coal mines by chemical elution[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 261-266.

# 化学淋洗法对石煤矿山放射性-重金属 复合污染土壤的修复研究

杨周白露<sup>1,2</sup>, 张望<sup>1,2</sup>, 吴闻东<sup>1,2</sup>, 马志飞<sup>3,4</sup>, 李海辉<sup>1,2</sup>, 张麟熹<sup>1,2</sup>

(1.江西省核工业地质局测试研究中心,江西 南昌 330002;2.江西核工业环境保护中心,江西 南昌 330002;  
3.南昌大学 资源环境与化工学院,江西 南昌 330031;4.南昌大学 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,江西 南昌 330031)

**摘要:**石煤中含有较高含量的天然放射性核素,它的开发与利用会对环境造成放射性污染以及伴生的重金属污染等,近年来石煤的开发与利用对环境产生的放射性污染以及重金属污染等问题越发受到公众关注,江西作为全国石煤储量最为丰富的省份之一,石煤矿山大多为露天开采,废弃矿山长期受雨水淋溶、地表径流等对周边土壤环境造成了严重损害,为了对石煤矿区周边放射性及重金属复合污染土壤进行修复技术研究,采用振荡淋洗方法进行室内小试试验,根据江西省某石煤矿区现场采集的土壤检测结果显示,主要污染物指标为放射性核素铀以及重金属锌和镉;依据前人研究,针对其特有的放射性及重金属复合污染特征,选用盐酸、柠檬酸、草酸、EDTA、三氯化铁为淋洗剂,通过控制淋洗浓度、混合淋洗等因素来确定较优的淋洗条件。结果表明:各淋洗剂对复合污染土壤的去污效果综合最佳是草酸、盐酸以及三氯化铁;而不同浓度梯度下淋洗率最好的分别是 1 mol/L 的草酸和 1 mol/L 的盐酸溶液,组合淋洗剂对比单一淋洗剂的淋洗效果均有一定程度的提升,1 mol/L 的草酸溶液与 1 mol/L 的盐酸溶液组合的淋洗剂对 U、Cd、Zn 的淋洗率均达到最高,分别是 99.2%、97.8%和 43.7%。该研究成果可用于现场淋洗修复复合污染土壤的小试,同时仍需考虑淋洗修复后土壤的潜在环境风险问题。

**关键词:**化学淋洗;石煤矿山;放射性核素;复合污染土壤;土壤修复

中图分类号:X53;X751 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)09-0261-06

## Study on remediation of radioactive-heavy metal contaminated soil in stone coal mines by chemical elution

YANG Zhou bailu<sup>1,2</sup>, ZHANG Wang<sup>1,2</sup>, WU Wendong<sup>1,2</sup>, MA Zhifei<sup>3,4</sup>, LI Haihui<sup>1,2</sup>, ZHANG Linxi<sup>1,2</sup>

(1. Test and Research Center of Jiangxi Nuclear Industry Geological Bureau, Nanchang 330002, China; 2. Jiangxi Nuclear Industry Environmental Protection Center, Nanchang 330002, China; 3. School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 4. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China))

**Abstract:** Stone coal contains a relatively high content of natural radionuclides. Its development and utilization will cause radioactive pollution and associated heavy metal pollution to the environment. In recent years, the development and utilization of stone coal has caused radioactive pollution and heavy metal pollution to the environment. More and more public attention has been paid to Jiangxi. As one of the provinces with the most abundant stone coal reserves in the country, most stone coal mines are open-pit mining. The long-term rainwater leaching and surface runoff of abandoned mines have caused serious damage to the surrounding soil environment. In order to study the remediation technology of the radioactive and heavy metal compound contaminated soil around the stone coal mine area, the vibration leaching method was used to conduct the indoor test. According to the soil test results collected on site in a stone coal mine area in Jiangxi Province, the main pollutant indexes were radionuclide uranium and heavy metal zinc and cadmium. According to previous studies, in

view of its unique radioactive and heavy metal compound pollution characteristics,hydrochloric acid, citric acid, oxalic acid, EDTA and ferric trichloride were selected as eluents, and the better leaching conditions were determined by controlling leaching concentration and mixed leaching. The results show that in eluents the best comprehensive decontamination effects on compound polluted soil were oxalic acid, hydrochloric acid and ferric trichloride. The best leaching rates under different concentration gradients were 1 mol/L oxalic acid and 1 mol/L hydrochloric acid solution, and the elution effect of combined eluent was improved to some extent compared with a single eluent. The leaching rate of U, Cd and Zn with the mixture of 1 mol/L oxalic acid solution and 1 mol/L hydrochloric acid solution was the highest achieved 99.2%, 97.8% and 43.7%. The research results can be used for the small-scale trial of on-site leaching of remediation of compound contaminated soil, and the potential environmental risks of the soil after leaching and remediation still need to be considered.

**Key words:**chemical leaching;stone coal mine;radionuclide;compound contaminated soil;soil remediation

0 引 言

江西作为全国石煤储量最为丰富的省份之一,石煤地层面积可达约 6 200 km<sup>2</sup>,拥有丰富的石煤资源,主要分布在修水、武宁、玉山等 8 个市县<sup>[1]</sup>。由于省内石煤矿山大多为露天开采,废弃矿山通常具有极端裸露、植被稀少、水土流失严重等特征,地表堆积的大量矿石、废石中往往含有大量酸性、碱性、毒性物质或具有重金属成分的物质,这些物质极易通过地表、地下径流和大气扩散,污染水、大气、土壤及生物环境。已有大量研究显示,石煤中伴生部分重金属,石煤的开发和利用对矿区周围的土壤已经产生了一定的污染,尤其是剧毒物质 Cd 的污染严重<sup>[2]</sup>。

石煤是一种重要的伴生放射性矿产资源,其含有较高的天然放射性核素,石煤的开发与利用会对环境造成比较严重的污染。土壤放射性污染“看不见、摸不着”,该类污染土壤兼具重金属毒性及辐射照射双层危害<sup>[3-6]</sup>。因此,废弃或者退役的石煤矿山周围土壤的放射性及重金属污染状况已成为目前备受关注的领域<sup>[7-8]</sup>。

目前,国内外学者对于矿山土壤中放射性污染主要参照重金属污染的治理方法并结合其自身特殊性进行了有针对性的调整和优化。现有的修复方法一般可分为物理法、化学法和生物法 3 类<sup>[9-10]</sup>。化学淋洗是一种简单、高效的土壤修复方法,淋洗剂的选择及淋洗条件的设定直接决定淋洗效果的好坏。常用的淋洗剂有无机酸、有机酸和螯合剂等,国内外学者利用淋洗剂对放射性污染土壤进行了大量研究<sup>[11-15]</sup>,研究主要针对各个重金属或放射性污染指标进行单一修复处理,淋洗剂的淋洗效果未有综合性的对比分析,本次研究则以石煤矿山特征污染指标为例进行针对性的淋洗修复实验,以多种不同类别淋洗剂进行对比分析其综合性的修复效果。

1 研究区概况

此次调查选取江西省内某典型废弃石煤矿山,

区内出露地层以寒武系为主,仅出露下寒武统的荷塘组,呈近似 NNE 的长条状展布。荷塘组沉积最大特点是有机质组分高,广泛存在由菌藻类等低等生物形成的石煤,石煤通常是似层状、透镜状,普遍见有黄铁矿、磷质结核。

通过对石煤矿区周边农田等地巡测  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率以及地面  $\gamma$  能谱来确定周边放射性环境偏高值点位,同时利用便携式重金属快速测定仪对周边土壤进行测定,初步筛选出石煤矿区周边土壤环境超标点位(超背景值点),分别采集了矿区矿石以及周围土壤若干个样品,分析其土壤样品中的重金属及放射性核素含量,重金属指标参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值,必测项目中包括重金属镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌这八项,放射性指标则因暂时没有明确的标准规范界定其是否超标,因此参考该地区的环境背景值作为判断其是否受到放射性污染<sup>[16]</sup>。该石煤矿区石煤样品的放射性及重金属指标检测结果见表 1—表 3,土壤样品采集点位如图 1 所示。

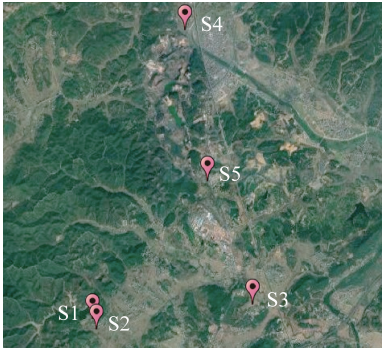


图 1 石煤矿区土壤采样点位图

Fig.1 Location of soil sampling points in stone coal mining

通过表 1—表 3 数据可以看出,该石煤矿区周边农田土壤普遍出现放射性核素含量以及重金属含量偏高现象,对比石煤样品以及背景点的放射性核素含量可以发现,石煤样品与周边农田土壤中放射

性核素含量的特征一致,<sup>238</sup>U 与<sup>226</sup>Ra 远高于全省土壤背景值,而放射性核素<sup>232</sup>Th 和<sup>40</sup>K 含量则均明显低于全省土壤放射性核素背景值,较远距离的背景点土壤中含量则是显著低于矿区周边土壤,虽较全省土壤背景值偏高,但石煤矿区对其周边土壤放射性影响也同样有明显关联;

重金属方面,农用地土壤污染风险筛选值视 pH 值的不同来界定各重金属含量的筛选值,样品 pH 值基本都在 5.5 以内,统一以其最严格的风险筛选值来对比所有样品的重金属含量,见表 3,Cu、Zn、Ni、Cd 这 4 个重金属指标几乎全都超出风险筛选值,而 Zn 与 Cd 这两个指标更是超出数倍甚至数十倍不止,其余指标除个别点位超出外,大多在风险筛

选值左右或者以内,同样存在一定风险;对比该区石煤样品的重金属检测结果可以发现,其 Zn 与 Cd 含量相较周边土壤远低于风险筛选值,与其背景点土壤中的含量特征一致,其他几个指标则相对关联性较明显一些,排除工作区土壤本身背景值偏高的因素,考虑石煤样品单一可能存在其他矿石中的重金属来源对土壤造成了一定的影响。

最后综合现场调研结果,同时为了方便下一步室内试验的检测,自然环境中天然铀是<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和<sup>234</sup>U 的混合物,其中<sup>238</sup>U 占 99.27%,<sup>235</sup>U 占0.714%,剩余的是微量的<sup>234</sup>U,选定放射性指标 U 以及重金属 Cd 和 Zn 作为此次研究的目标污染物,下一步对其展开针对性的复合污染土壤修复治理研究。

表 1 某石煤矿区石煤样品中放射性核素及重金属指标检测结果  
Table 1 Detection results of radionuclides and heavy metals in coal samples from a stone coal mine

编号	各元素含量											
	<sup>238</sup> U/	<sup>232</sup> Th/	<sup>226</sup> Ra/	<sup>40</sup> K/	Cu/	Pb/	Zn/	Cr/	Cd/	Ni/	As/	Hg/
	( Bq ·	( Bq ·	( Bq ·	( Bq ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·	( mg ·
	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )	kg <sup>-1</sup> )
Y1	3 770	26.38	1 491	406	316	80.8	10.9	134	0.2	6	20.9	0.593

表 2 某石煤矿区周围土壤样品基本理化指标及放射性核素含量检测结果  
Table 2 Basic physical and chemical indexes and radionuclide content test results of soil samples around a stone coal mine area

编号	含水率/ %	pH	各元素含量				
			有机质/	<sup>238</sup> U/	<sup>232</sup> Th/	<sup>226</sup> Ra/	<sup>40</sup> K/
			( g · kg <sup>-1</sup> )	( Bq · kg <sup>-1</sup> )	( Bq · kg <sup>-1</sup> )	( Bq · kg <sup>-1</sup> )	( Bq · kg <sup>-1</sup> )
S1	7.89	7.02	103	500.1	37.51	415.6	393.9
S2	12.48	4.67	85.5	858.4	31.34	400	413.8
S3	13.53	5.55	34.9	460	46.42	294.9	311.1
S4	20.95	5.15	84.5	773.9	23.96	248.4	265.1
S5	13.98	4.58	63.8	641.6	39.94	363.8	292.8
背景点	6.81	4.12	18.2	289.9	34.57	222.1	239.7

表 3 某石煤矿区周围土壤样品重金属含量检测结果  
Table 3 Test results of heavy metal content in soil samples around a stone coal mine area

编号	各元素含量/( mg · kg <sup>-1</sup> )							
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	As	Hg
S1	107	73.2	465	154	10.1	111	39.1	0.182
S2	122	50.5	540	173	4.54	169	43.8	0.235
S3	62.8	43.7	311	141	3.78	78.7	31	0.224
S4	154	44.6	620	129	7.3	196	39	0.247
S5	93.3	56.4	280	149	1.28	87.4	21.6	0.188
背景点	61.1	31.1	29.5	83.8	0.16	15	34.7	0.215

## 2 材料与方法

### 2.1 供试土壤

供试土壤采集江西省内某废弃石煤矿区周边土壤,为多点混合样,采样深度 0~20 cm,共采集土壤 2 kg。土样采回后置于阴凉通风处风干,除去植物

根系及大石块后过筛。土壤样品消解后利用 ICP-OES 测得其含铀量以及重金属锌、镉含量,pH 采用 pH 计测定浸提液,其中浸提液采用固液质量比为 2.5 : 1 的比例进行制备;含水率采用烘干法来测定,有机质采用重铬酸钾容量法—稀释热法来检测。检测结果见表 4。



表 4 土壤样品基本理化性质

Table 4 Basic physical and chemical properties of soil samples

土壤质地	pH	含水率/ %	有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	元素含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )		
				U	Zn	Cd
砂壤	5.15	20.95	84.5	62.7	620	7.3

2.2 试剂与仪器

化学试剂: 盐酸、柠檬酸、草酸、三氯化铁、EDTA,除盐酸是优级纯外其他均为分析纯,试验用水为超纯水。

仪器设备:数显恒温搅拌水浴锅(HH-6);电感耦合等离子发射光谱仪(Optima5300dv);台式低速离心机(TD5M-WS);电子天平(AL204);石墨电热板(HO-3500);常规玻璃仪器。

2.3 试验方法

分别称取 5 g 土壤于离心管(100 mL)中,根据以下淋洗条件进行振荡试验,恒温搅拌水浴锅转速 500 r/min 左右,振荡 240 min 后,离心机 3 000 r/min 离心 10 min,取得上清液通过 0.45 μm 滤膜过滤后转移到 50 mL 离心管中,利用 ICP-OES 测定其铀以及锌、镉的浓度。

1)淋洗剂筛选。根据复合污染特征以及前人的研究成果<sup>[17-22]</sup>选定去离子水、FeCl<sub>3</sub>、有机酸(柠檬酸、草酸)、无机酸(盐酸)、螯合剂(EDTA)为淋洗剂,浓度均为 0.5 mol/L,液固比 10:1,温度 25℃,振荡时间 4 h。

2)淋洗剂不同浓度对比筛选。将上一步 5 种淋洗剂中淋洗效果较好的 3 种淋洗剂按浓度梯度 0.05、0.1、0.2、1 mol/L 分别进行淋洗,液固比 10:1,温度 25℃,振荡时间 4 h;

3)不同淋洗剂组合对比筛选。结合上步综合效果较好的淋洗剂浓度两两组合进行淋洗,A+B、A+C 以及 B+C 三种组合对比淋洗效果,液固比 10:1,温度 25℃,振荡时间 4 h。

3 结果与讨论

3.1 淋洗剂筛选

淋洗率可表示淋洗前后土壤中污染物的去除效果,以淋洗液中重金属总量比土壤中重金属全量进行计算<sup>[23]</sup>。根据试验数据,淋洗剂去离子水、EDTA、草酸、柠檬酸、三氯化铁、盐酸对应的土壤铀淋洗率分别为:0、7.23%、65.05%、22.98%、60.02%、57.59%;锌淋洗率分别为:2.37%、14.59%、29.43%、18.94%、23.98%、23.88%;镉淋洗率分别为:11.54%、59.18%、61.10%、62.00%、60.97%、81.10%。

通过图 2 对比结果分析可知,当去离子水作为

淋洗剂,对铀和锌的淋洗效果不足 5%,螯合剂(EDTA)作为淋洗剂淋洗率均明显低于其他淋洗剂,其次是有机酸(柠檬酸),对铀及锌的淋洗率明显低于其他几种淋洗剂,对镉则基本差异不大。各淋洗剂中对铀和锌淋洗率最高的均为草酸,对镉淋洗率最高的则是盐酸,综合来看,针对 U、Cd、Zn 这 3 种目标污染物的综合淋洗效果较好的分别是草酸、三氯化铁以及盐酸溶液。

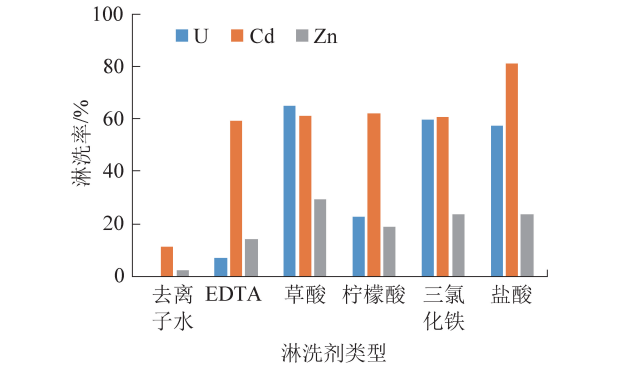


图 2 不同淋洗剂对铀、镉、锌的淋洗效果对比

Fig.2 Comparison of leaching effects of different eluting agents on uranium, cadmium and zinc

3.2 淋洗剂浓度筛选

综合上一步淋洗剂筛选结果,以及结合前人研究结果,选择草酸、三氯化铁以及盐酸溶液分别按 0.05、0.1、0.2 mol/L 以及 1 mol/L 的浓度梯度进行对比分析不同淋洗剂浓度的去除效果。

通过不同淋洗剂不同浓度下的淋洗率对比图可以看出,对 U 来说,淋洗率最好的分别是 1 mol/L 的草酸和 1 mol/L 的盐酸溶液,分别达到了 82% 和 79%,3 种淋洗剂均呈现随着淋洗剂浓度升高淋洗率不断增高的趋势,其中盐酸溶液的变化最为显著,三氯化铁溶液则在达到一定浓度后变化不太明显(图 3);对 Cd 则总体淋洗率呈现较为平均的效果,均在 60% 左右浮动,其中效果最好的仍是 1 mol/L 的盐酸溶液,淋洗率达到 93%,盐酸溶液各浓度梯度下的淋洗率同样也偏高于另外 2 种淋洗剂,其中草酸溶液随着浓度升高变化不太明显,达到 1 mol/L 时有较大的增幅,而三氯化铁溶液则在浓度达到 0.1~0.2 mol/L 后淋洗率呈明显下降趋势,淋洗率最高在 73% 左右,说明三氯化铁溶液对 Cd 的去除效果

在浓度 0.1 mol/L 左右达到了峰值(图 4)。最后是 Zn,通过对比发现总体去除效率明显不及另外 2 个指标,草酸溶液相较于另外 2 种淋洗剂的去除效果更加显著,3 种淋洗剂同样呈现去除效率与浓度正相关的趋势,淋洗率最高的同样是 1 mol/L 的草酸和 1 mol/L 的盐酸溶液,分别达到 30%和 32%,三氯化铁相对去除效果较弱,最高达到 25%(图 5)。

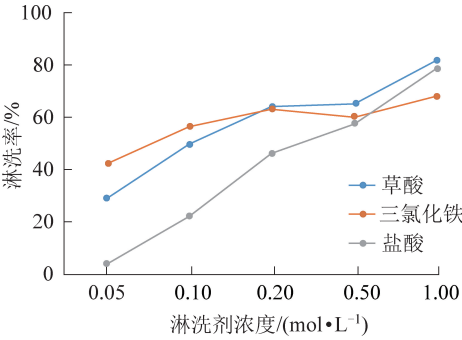


图 3 淋洗剂浓度对铀淋洗率的影响

Fig.3 Effects of eluant concentration on uranium removal rate

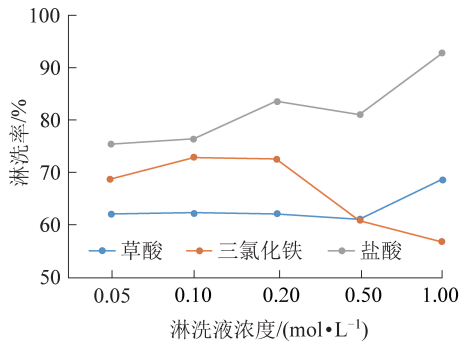


图 4 淋洗剂浓度对镉淋洗率的影响

Fig.4 Effects of eluant concentration on cadmium removal rate

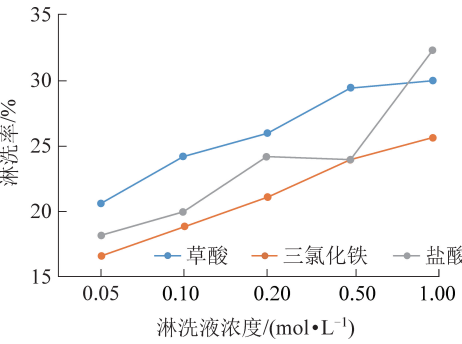


图 5 淋洗剂浓度对锌淋洗率的影响

Fig.5 Effects of eluant concentration on zinc removal rate

3.3 淋洗剂组合对比筛选

综合上述 3 种淋洗剂在不同浓度梯度下的淋洗效果对比,选定 1 mol/L 的草酸溶液、0.2 mol/L 的三氯化铁溶液以及 1 mol/L 的盐酸溶液作为淋洗效果最好的进行两两组合对比其去除目标污染物的效果。组合淋洗剂对比单一淋洗剂的淋洗效果均有一

定程度的提升,1 mol/L 的草酸溶液与 1 mol/L 的盐酸溶液组合的淋洗剂对 U、Cd、Zn 的淋洗率均达到最高,分别是 99.2%、97.8%和 43.7%,Zn 的去除率相对另 2 个指标还是明显偏低,均不到 50%;单一盐酸溶液对 Cd 的淋洗率则接近于草酸的组合淋洗率,甚至高出三氯化铁与盐酸的组合淋洗效率;对 U 则可以看出有机酸和无机酸的淋洗效率明显高出三氯化铁溶液,而三氯化铁与酸混合后的组合淋洗剂效率大幅度提升了 50%左右(图 6)。

综合来看,有机酸-草酸与无机酸-盐酸各 1 mol/L 的组合淋洗剂对目标污染物的淋洗效率最高,其次是 0.2 mol/L 的 FeCl<sub>3</sub>和 1 mol/L 有机酸-草酸溶液的组合淋洗剂。

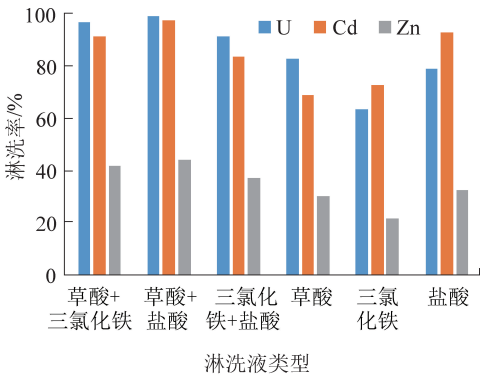


图 6 不同淋洗剂组合对铀、锌、镉淋洗率影响

Fig.6 Effects of mixed elution on uranium, zinc and cadmium removal rate

4 结 论

- 1)通过调查,江西省某石煤矿区周边土壤放射性核素铀、镭普遍高出全省背景值,土壤中重金属以镉普遍超出农田筛选值为主,其次是锌含量同样超标严重。
- 2)综合淋洗结果来看,同样条件下针对 U、Cd、Zn 这 3 种目标污染物的综合淋洗率较好的分别是草酸、三氯化铁以及盐酸溶液。而这 3 种淋洗剂在不同浓度条件下的对比结果则显示 1mol/L 的草酸溶液及盐酸溶液、0.2 mol/L 的三氯化铁溶液的淋洗效果最佳。此外,组合淋洗剂对比单一淋洗剂的淋洗效果均有一定程度的提升,1 mol/L 的草酸溶液与 1 mol/L 的盐酸溶液组合的淋洗剂对 U、Cd、Zn 的淋洗率均达到最高,分别是 99.2%、97.8%和 43.7%,其次是 0.2 mol/L 的三氯化铁和 1 mol/L 有机酸-草酸溶液的组合淋洗剂。
- 3)上述 3 种溶液针对石煤矿山周边复合污染土壤的淋洗效果较好,研究成果可用于进一步的现场淋洗污染土壤的试验,但是仍需考虑淋洗剂修复

土壤后可能存在的环境风险问题,确定其为对环境友好型淋洗剂以降低潜在环境风险。

# 参考文献(References):

- [1] 李莹,万明,陈晓峰,等.江西省伴生放射性石煤矿开发利用环境影响研究[J].辐射防护,2004,24(5):297-313.  
LI Ying,WAN Ming,CHEN Xiaofeng,*et al.*Study on environmental effect of mining and utilizing radioactive bone-coal mine in Jiangxi province[J].Radiation Protection,2004,24(5):297-313.
- [2] 叶际达,孔玲莉,李莹,等.五省放射性伴生石煤矿的开发和利用对环境影响研究[J].辐射防护,2004,24(1):1-23.  
YE Jida,KONG Lingli,LI Ying,*et al.*Study of radioactivity effect of mining and utilizing bone-coal mine on environment[J].Radiation Protection,2004,24(1):1-23.
- [3] 刘赓.煤矿周围土壤中铜、锌污染状况及特征分析[J].能源环境保护,2010,24(1):48-56.  
LIU Yi.The contamination and characteristics analysis of Cu and Zn of soils around coal mine[J].Energy Environmental Protection,2010,24(1):48-56.
- [4] 刘媛媛,魏强林,高柏,等.放射性核素在不同介质中的迁移规律研究现状及进展[J].有色金属(冶炼部分),2018(6):76-82.  
LIU Yuanyuan,WEI Qianglin,GAO Bai,*et al.*Research status and progress of radionuclide migration in different media[J].Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2018(6):76-82.
- [5] 陈怀满,郑荣春,周东美,等.关于我国土壤环境保护研究中一些值得关注的问题[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1244-1245.  
CHEN Huaiman,ZHENG Rongchun,ZHOU Dongmei,*et al.*Some issues worthy of attention in the research of soil environmental protection in China[J].Journal of Agro-Environment Science,2004,23(6):1244-1245.
- [6] 黄铭洪,骆永明.矿区土地修复与生态恢复[J].土壤学报,2003,40(2):161-169.  
WONG Minghong,LUO Yongming.Land remediation and ecological restoration of mined land[J].Acta Pedologica Sinica,2003,40(2):161-169.
- [7] LEYDIER A,LIN Y,ARRACHART G,*et al.*EDTA and DTPA modified ligands as sequestering agents for uranyl decorporation[J].Tetrahedron,2012,68(4):1163-1170.
- [8] LI J,ZHANG L B,PENG J H,*et al.*Removal of uranium from uranium plant wastewater using zero-valent iron in an ultrasonic field[J].Nuclear Engineering & Technology,2016,48(3):744-750.
- [9] 罗恺,李洋,陈海龙,等.土壤放射性污染源分析与修复技术[J].环境影响评价,2019,41(1):58-61.  
LUO Kai,LI Yang,CHEN Hailong,*et al.*Radioactive contaminated soil's source analysis and remediation technologies[J].Environmental Impact Assessment,2019,41(1):58-61.
- [10] ZHANG Q,CHEN J R,ZHANG C M,*et al.*Research progress of remediation contaminated soil by radioactive Cs[J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2014,28(10):1924-1931.
- [11] 沈威,高柏,章艳红,等.化学淋洗法对铀污染土壤的修复效果研究[J].有色金属(冶炼部分),2019(11):81-86.  
SHEN Wei,GAO Bai,ZHANG Yanhong,*et al.*Study on remediation effect of uranium contaminated soil by chemical elution[J].Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2019(11):81-86.
- [12] 张伯强,蒋经乾,高柏.相山铀尾矿库周边土壤中放射性核素的研究[J].有色金属(冶炼部分),2016(6):76-79.  
ZHANG Boqiang,JIANG Jingqian,GAO Bai.Study on radionuclide of soil surrounding xiangshan uranium tailings[J].Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2016(6):76-79.
- [13] CRAWFORD S E,LOFTS S,LIBER K.The role of sediment properties and solution pH in the adsorption of uranium(VI) to freshwater sediments[J].Environmental Pollution,2017,220:873-881.
- [14] 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.  
LI Yushuang,HU Xiaojun,SUN Tieheng,*et al.*Soil washing/flushing of contaminated soil;a review[J].Chinese Journal of Ecology,2011,30(3):596-602.
- [15] YANG X,MAO X,SHAO X,*et al.*Enhanced techniques of soil washing for the remediation of heavy metal-contaminated soils[J].Agricultural Research,2018,7(2):99-104.
- [16] 潘自强.中国辐射水平[M].北京:原子能出版社,2010.  
PAN Ziqiang.Radiation Level in China[M].Beijing:Atomic Energy Press,2010.
- [17] KIM G N,PARK U R,KIM S S,*et al.*Decontamination of gravels contaminated with uranium[J].Annals of Nuclear Energy,2014,72(Complete):367-372.
- [18] COX L,STAHL P.Analysis of remediation strategies for radionuclide-contaminated soils in uranium mining[C]//Proceedings America Society of Mining and Reclamation,2011:143-151.
- [19] MANN M J.Full-scale and pilot-scale soil washing[J].Journal of Hazardous Materials,1999,66(1/2):119-136.
- [20] 陈欣园,仵彦卿.不同化学淋洗剂对复合重金属污染土壤的修复机理[J].环境工程学报,2018,12(10):2845-2854.  
CHEN Xinyuan,WU Yanqing.Remediation mechanism of multi-heavy metal contaminated soil by using different chemical washing agents[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2018,12(10):2845-2854.
- [21] QIAO J,SUN H,LUO X,*et al.*EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil[J].Chemosphere,2017,167:422-428.
- [22] BEIYUAN J,TSANG D C W,VALIX M,*et al.*Combined application of EDDS and EDTA for removal of potentially toxic elements under multiple soil washing schemes[J].Chemosphere,2018,205:178-187.
- [23] 刘培亚,李玉姣,胡鹏杰,等.复合淋洗剂土柱淋洗法修复Cd、Pb污染土壤[J].土壤修复,2015,33(1):163-167.  
LIU Peiya,LI Yujiao,HU Pengjie,*et al.*Column leaching of cadmium and lead from a contaminated soil using composite leaching agent[J].Soil Remediation,2015,33(1):163-167.