

复配还原稳定化药剂修复铬污染土壤研究

和利钊^{1,2}, 顾静^{1,2}, 李琼^{1,2*}, 杨国航^{1,2}, 牛婧^{1,2}, 张海鸥^{1,2}, 郑子健^{1,2}, 赵振^{1,2}

(1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 广西南宁 530007; 2. 北京博世科环保科技股份有限公司, 北京 100000)

摘要 以甘肃省某化工厂历史遗留铬污染场地为研究对象, 开展还原稳定化法修复铬污染土壤小试研究, 确定最佳修复工艺参数。结果表明, 采用9种不同配比的复配修复药剂分别对铬污染土壤进行处理, 添加后养护3 d, 综合对比浸出液中的污染物浓度、还原稳定效率和反应前后土壤pH变化, 得出6%硫酸亚铁+3%硫化钠和6%氯化亚铁+3%硫化钠的修复效果较好。添加8%氯化亚铁+4%硫化钠, 养护3 d, 可使污染土浸出液中的总铬和Cr⁶⁺达到修复目标值, 养护30 d, 可使还原稳定效率达到100%。添加不同百分比的硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠, 对场地污染土壤pH影响不大; 添加不同百分比的硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠, 养护3 d和养护30 d, 对场地污染土壤pH影响不大。

关键词 土壤铬污染; 复配还原稳定剂; 添加量; 养护时间; 还原稳定效率; 土壤pH

中图分类号 X53 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)05-0043-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.05.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Remediation of Chromium Contaminated Soil by Compound Reduction and Stabilization Agents

HE Li-zhao^{1,2}, GU Jing^{1,2}, LI Qiong^{1,2} et al (1. Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530007; 2. Beijing Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100000)

Abstract Taking the historical chromium-contaminated site of a chemical plant in Gansu Province as the research object, a pilot study on the restoration of chromium-contaminated soil by reduction and stabilization was carried out to determine the best remediation process parameters. The results showed that 9 kinds of compound remediation agents with different proportions were used to treat the chromium-contaminated soil, three days after addition, the contaminant concentration in the leachate, the reduction stabilization efficiency and the soil pH change before and after the reaction were comprehensively compared, 6% ferrous sulfate + 3% sodium sulfide and 6% ferrous chloride + 3% sodium sulfide had the better remediation effects. Adding 8% ferrous chloride + 4% sodium sulfide for 3 days, the total chromium and hexavalent chromium in the leachate of contaminated soil could reach the target value of remediation. For 30 days, the reduction stability efficiency could reach 100%. Adding different percentages of ferrous sulfate + sodium sulfide and ferrous chloride + sodium sulfide had little effect on the pH of the contaminated soil. Adding different percentages of ferrous sulfate + sodium sulfide and ferrous chloride + sodium sulfide, maintenance for 3 days and 30 days, had little effect on the pH of contaminated soil.

Key words Chromium pollution; Compound reduction and stabilization agents; Additive amount; Conserving time; Reduction and stabilization efficiency; Soil pH

在重金属污染日趋严重的当下, 铬污染危害性尤为突出, 溶性六价铬具有较强的致癌和致突变特性, 是国际公认的47种最危险的废物之一。铬污染来源主要是工业废物排放造成的, 如铬矿的开采与冶炼、铬化合物的生产、电镀、制革等^[1-3]。在所有重金属污染场地中, 铬污染场地数量占较大的比重, 而铬污染的重污染区主要来自铬盐厂。我国铬盐生产多为有钙焙烧工艺, 该工艺过程铬渣产生量大, 三废污染重, 长期的降雨淋滤下铬盐生产场地的铬随雨水进入土壤, 造成严重的环境污染^[4]。据估算, 在我国仅铬渣造成的土地污染面积就高达500万m², 污染土方量约1500万m³^[5]。针对土壤铬污染, 土壤修复是解决现阶段土壤铬污染, 消除铬危害最有效的技术。国内外土壤六价铬污染的修复方法包括化学处理、固化/稳定化处理、植物处理、微生物处理、电处理等^[6-9], 但综合考虑技术、成本、污染物去除率等因素, 单一的修复技术往往达不到理想的修复效果。针对污染场地实际情况, 联合固化/稳定技术(是一种主要针对化工厂生产留下的铬渣的有效修复技术)与化学氧化/还原技

术(是很有潜力的铬污染土壤修复技术)修复铬污染土壤, 具有很高的潜在可行性和广阔的应用前景^[10]。笔者通过前期研究, 筛选出几种复配还原稳定剂, 采用室内模拟试验, 研究这几种复配还原稳定剂对污染土中总铬和Cr⁶⁺的还原稳定效果, 并筛选出最佳复配还原稳定剂; 研究不同养护时间下复配还原稳定剂对污染物还原稳定效率的影响, 以及复配还原稳定剂的添加量对土壤pH的影响, 为联合固化/稳定与化学氧化/还原技术修复铬污染土壤的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试样品和材料 选用甘肃省某化工厂历史遗留铬污染场地的土样作为供试样品, 挑出其中石块、植物残体等杂物, 破碎过5 mm筛, 混匀, 缩分后装入自封袋, 密封备用。所用的修复药剂腐殖酸钠(C₉H₈Na₂O₄)、硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O)、氯化亚铁(FeCl₂·4H₂O)、硫化钠(Na₂S)、氯化镁(MgCl₂·6H₂O)、氯化铝(AlCl₃·6H₂O)均购自国药集团化学试剂有限公司, 所用的工业级水泥(CaO 60%~65%、SiO₂ 20%~25%、Al₂O₃ 4%~8%、Fe₂O₃ 3%~6%)、石灰(CaO 90%~95%、CaCO₃ 5%~10%)、复合碱[Ca(OH)₂ 20%~30%、硅藻土 30%~40%、活性炭 10%~12%、活性白泥 15%~25%]和水滑石[Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O]均采购自当地。

1.2 试验方法 称取前处理后的土壤样品500 g, 分别置于

基金项目 国家重点研发计划(2020YFC1808500); 广西重点研发计划(桂科AB18281002)。

作者简介 和利钊(1985—), 男, 河北衡水人, 高级工程师, 硕士, 从事污染土壤修复治理研究。*通信作者, 高级工程师, 博士, 从事土壤与地下水修复研究。

收稿日期 2021-06-01

塑料容器内;按小试试验设计的投加比,向土壤样品中加入定量的复配还原稳定剂,搅拌均匀,再加入去离子水,使样品的含水率控制在30%左右;搅拌均匀后盖上塑料容器,室温下养护3,30 d;将养护后的样品进行风干,采用硫酸硝酸法浸出,检测分析浸出液。

表1 分析项目及方法

Table 1 Analysis items and methods

监测项目 Monitoring items	监测依据 Monitoring basis	仪器名称及型号 Instrument name and model
总铬 Total chromium	《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)	电感耦合等离子体光谱仪 Optima8000
Cr ⁶⁺	《固体废物六价格的测定二苯砷酸二胂分光光度法》(GB/T 15555.5—1995)	紫外可见分光光度计 DR6000
土壤 pH Soil pH	《土壤检测第2部分:pH的测定》(NY/T 1121.2—2006)	pH/mV 多参数测量仪 S400-K

2 结果与分析

2.1 复配还原稳定剂的筛选

2.1.1 土壤污染状况。从受试污染土壤中的重金属浸出浓度、pH和修复目标值(表2)可以看出,受试污染土壤样品中的总铬和Cr⁶⁺含量均很高,且浸出浓度分别超过修复目标值的363.8和921.4倍。

表2 土壤污染状况和修复目标

Table 2 Soil pollution status and restoration target

项目 Item	总铬 Total chromium mg/L	Cr ⁶⁺ mg/L	土壤 pH Soil pH
浓度 Concentration	547.2	461.2	8.6
修复目标值 Restoration target value	1.5	0.5	—

2.1.2 几种复配还原稳定剂添加量及修复效果。该试验采用的复配还原稳定剂为前期试验选出的9种,分别为6%腐殖酸钠+50%水泥、6%腐殖酸钠+1.5%石灰、6%硫酸亚铁+3%石灰、10%硫酸亚铁+5%石灰、6%硫酸亚铁+3%硫化钠、6%氯化亚铁+3%硫化钠、3%石灰+4.2%氯化镁+1.8%氯化铝、3%石灰+3.5%氯化镁+2.5%硫酸亚铁、6%硫酸亚铁+3%复合碱。复配还原稳定剂在添加后均养护3 d,修复效果和修复前后的pH见图1~2。由图1~2可知,添加土壤质量6%硫酸亚铁+3%硫化钠和6%氯化亚铁+3%硫化钠对铬污染土壤修复效果较好,浸出液中总铬浓度分别为5.0和3.3 mg/L, Cr⁶⁺浓度均为0.1 mg/L,且Cr⁶⁺达到修复目标值;浸出液中总铬的还原稳定效率分别为99.1%和99.4%, Cr⁶⁺的还原稳定效率均达到100%。研究表明,亚铁盐除了能将Cr⁶⁺还原为Cr³⁺外,同时土壤中OH⁻与Fe³⁺形成的Fe(OH)₃胶体可对CrO₂⁴⁻进行吸附,因此化学还原和胶体吸附双重作用显著降低了Cr⁶⁺和总铬的浸出浓度。Fe(OH)₃胶体吸附CrO₄²⁻共沉淀能形成铁胶,Fe(OH)₃与Cr(OH)₃共沉淀形成铬铁矿^[11]。硫化钠具有强还原性,与Cr⁶⁺反应生成二氧化硫和Cr³⁺,但是当硫化钠药剂量过量时,硫化钠会发生水解,水解呈碱性,而土壤中的Cr³⁺与Cr⁶⁺之间的转化会受到pH的影响,pH增加会降低Cr⁶⁺的还原作用^[12-14],从而使Cr⁶⁺的去除率降低,另外试验过程中加入硫化钠过多还会产生硫化氢

1.3 测试方法

1.3.1 样品浸出方法。样品浸出采用《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)。

1.3.2 分析项目及方法。样品的分析项目及分析方法如表1所示。

剧毒物质,因此需控制硫化钠的药剂量。添加这2种复配还原稳定剂后,土壤pH变化不大。

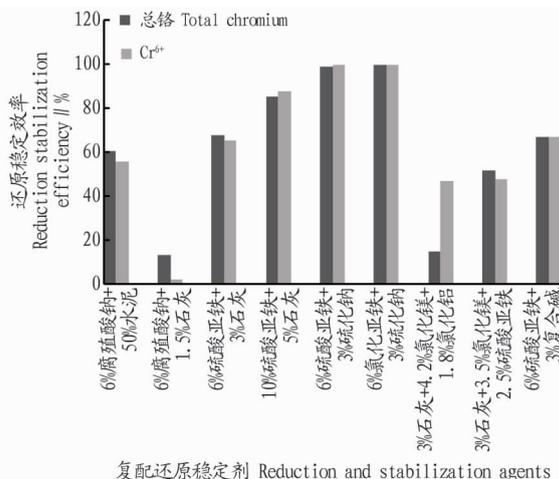


图1 不同复配还原稳定剂对铬污染土壤的修复效果

Fig. 1 Effect of different compound reduction and stabilization agents on the remediation of chromium contaminated soil

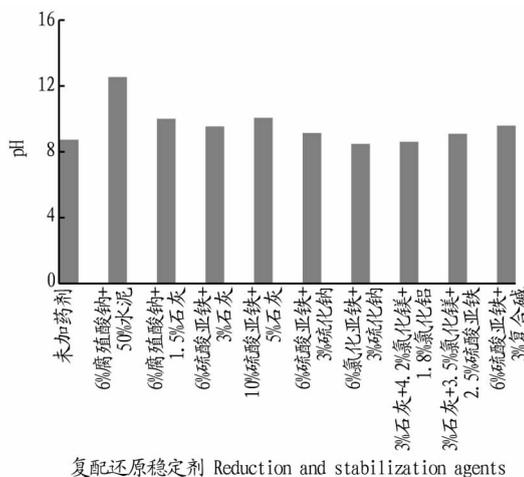


图2 不同复配还原稳定剂对土壤pH的影响

Fig. 2 Effects of different compound reduction and stabilization agents on soil pH

添加土壤质量10%硫酸亚铁+5%石灰对铬污染土壤修复效果也较好,浸出液中总铬浓度为79.0 mg/L, Cr⁶⁺浓度为57.5 mg/L;浸出液中总铬和Cr⁶⁺的还原稳定效率分别为

85.6%和87.5%。石灰的加入提高了土壤的pH,期间 Cr^{6+} 以碳酸盐或氢氧化物形式被快速沉淀下来,在碱性和中性环境中,此沉淀可以稳定存在,减少了生物有效性^[15]。但同样经过硫酸硝酸法的浸出,部分氢氧化物沉淀会溶解,使金属离子释放出来^[16]。添加该药剂后,土壤pH变化较大,由添加前的8.6上升为10.0。

添加土壤质量6%硫酸亚铁+3%石灰和6%硫酸亚铁+3%复合碱对铬污染土壤修复效果一般,浸出液中总铬浓度分别为176.7和179.0 mg/L, Cr^{6+} 浓度分别为160.0和151.7 mg/L;浸出液中总铬的还原稳定效率分别为67.7%和67.3%, Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为65.3%和67.1%。复合碱的主要成分是氢氧化钠,氢氧化钠提高了土壤的pH,可与土壤中可溶性重金属离子形成氢氧化物沉淀^[17]。在碱性和中性环境中,此沉淀可以稳定存在,但同样经过硫酸硝酸法的浸出,部分氢氧化物沉淀会溶解,使金属离子释放出来。添加这2种药剂后,土壤pH变化较大,都由添加前的8.6上升为9.5。

添加土壤质量6%腐殖酸钠+50%水泥和3%石灰+3.5%氯化镁+2.5%硫酸亚铁对铬污染土壤修复效果差,浸出液中总铬浓度分别为214.6和263.2 mg/L, Cr^{6+} 浓度分别为203.0和241.0 mg/L;浸出液中总铬的还原稳定效率分别为60.8%和51.9%, Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为56.0%和47.8%。 Cr^{6+} 在水泥水化过程中被包裹在生成的水化产物中或吸附于水化产物的表面^[16],从而实现控制土壤中铬扩散的目的。而且水化反应能增加污染土的pH,使铬的形态由可溶态转化为不溶态,发生化学稳定作用。腐殖酸钠(HA-Na)是以风化煤、泥炭与褐煤等原料,经特殊工艺所制成的多功能大分子可溶性钠盐,来源广泛且价格便宜^[18]。腐殖酸钠是具有较多羧基、酚羟基以及N-和S-结合点位的有机高分子聚合物,其不仅具有酸性阳离子交换性能,而且还有络合、螯合性质。腐殖酸钠对重金属离子的吸附不单是阳离子交换,而且还形成螯合关系,所以可吸附许多金属离子^[19],因此腐殖酸钠对污染土中的总铬和 Cr^{6+} 有一定的去除作用。添加6%腐殖酸钠+50%水泥后,土壤pH变化最大,由8.6上升为12.5。添加3%石灰+3.5%氯化镁+2.5%硫酸亚铁后,土壤pH变化不大。

添加土壤质量6%腐殖酸钠+1.5%石灰和3%石灰+4.2%氯化镁+1.8%氯化铝对铬污染土壤修复效果较差,浸出液中总铬浓度分别为474.8、465.0 mg/L, Cr^{6+} 浓度分别为449.3、439.3 mg/L;浸出液中总铬的还原稳定效率分别为13.2%和15.0%, Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为2.6%和47.3%。添加这几种还原稳定剂后,土壤pH分别为10.0、8.6。

综上所述可见,与其他7种复配还原稳定剂相比,添加6%硫酸亚铁+3%硫化钠和6%氯化亚铁+3%硫化钠后,浸出液中的总铬和 Cr^{6+} 修复效果较好,还原稳定效率均较高, Cr^{6+} 能够达到修复目标值,并且反应前后的土壤pH变化不大。因此,初步选定这2种复配还原稳定剂作为该污染场地最佳修复药剂,后面试验将提高这2种复配还原稳定剂的添加量

以提高浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率,使浸出液中这2种污染物均能够达到场地土壤修复目标值。

2.2 复配还原稳定剂的不同添加量对污染物修复效果的影响 硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠的添加量见图3,添加后均养护3 d,可以看出,添加土壤质量6%硫酸亚铁+4%硫化钠,浸出液中总铬浓度为6.50 mg/L, Cr^{6+} 浓度为0.1 mg/L,浸出液中总铬未达到修复目标值, Cr^{6+} 达到修复目标值;浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为98.8%和100%。继续添加土壤质量8%硫酸亚铁+4%硫化钠,浸出液中总铬浓度为2.20 mg/L, Cr^{6+} 浓度为0,浸出液中总铬仍未达到修复目标值, Cr^{6+} 达到修复目标值;浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为99.6%和100%。

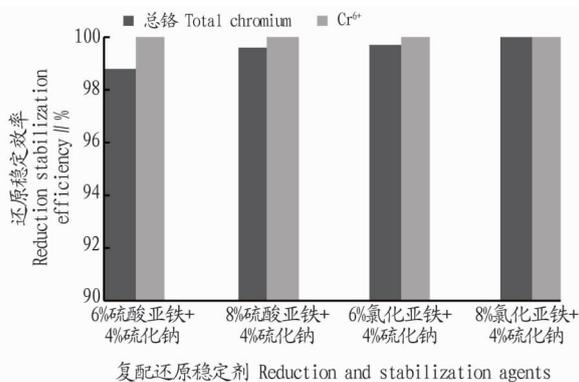


图3 复配还原稳定剂的不同添加量对污染物修复效果的影响
Fig. 3 Effect of different addition amounts of reduction and stabilization agents on the remediation effect of pollutants

添加土壤质量6%氯化亚铁+4%硫化钠,浸出液中总铬浓度为1.54 mg/L, Cr^{6+} 浓度为0,浸出液中的总铬未达到修复目标值, Cr^{6+} 达到修复目标值;浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为99.7%和100%。继续添加土壤质量8%氯化亚铁+4%硫化钠,浸出液中总铬浓度为0.40 mg/L, Cr^{6+} 浓度为0,总铬和 Cr^{6+} 均达到修复目标值;浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率均为100%。

综上所述可知,随着硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠2种复配还原稳定剂添加量的提高,浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的浸出浓度均明显降低,还原稳定效率均明显增加,其中8%氯化亚铁+4%硫化钠还原稳定处理效果最好,添加后浸出液中的总铬和 Cr^{6+} 不仅能够达到修复目标值,而且浓度基本为0。研究表明,亚铁类试剂处理铬污染土能显著降低土壤中 Cr^{6+} 浓度,可能是除 Cr^{6+} 能被亚铁盐还原为 Cr^{3+} 外,同时土壤中 Fe^{3+} 和 OH^- 形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体,吸附土壤中的 CrO_2^{4-} ,因此 Cr^{6+} 浸出浓度在化学还原和胶体吸附双重作用下明显变小了^[11]。硫酸亚铁、氯化亚铁反应的有效官能团相同^[12],但是对比二者对 Cr^{6+} 的去除率可以发现,在同等质量情况下,氯化亚铁对 Cr^{6+} 去除效果最好。对于添加剂硫化钠,其与 Cr^{6+} 反应生成 SO_4^{2-} 和 Cr^{3+} ,前人研究表明,硫化钠添加量从1%到3%时, Cr^{6+} 去除率逐渐增加,而添加量为5%时, Cr^{6+} 去除率反而减小^[12]。这是因为 Na_2S 中 S^{2-} 具有强还原性,在与 Cr^{6+} 进行反应时生成了 SO_2 和 Cr^{3+} ,在 Na_2S 量少时主要体现

S^{2-} 的强还原性;当添加量为 3% 时达到饱和, Cr^{6+} 在土壤中含
量小于检出限;当 Na_2S 过量时, Na_2S 发生水解, 使溶液呈碱
性。土壤中的 Cr^{3+} 和 Cr^{6+} 的转化受 pH 影响很大, 在碱性环
境下, 大量的 Cr^{3+} 向 Cr^{6+} 转化, 从而使 Cr^{6+} 的去除率降低。

2.3 复配还原稳定剂的养护时间对污染物修复效果的影响
为考察复配还原稳定剂的养护时间对污染土中总铬和
 Cr^{6+} 修复效果的影响, 对图 3 中不同添加百分比的复配还原
稳定剂样品继续养护至 30 d, 样品测试结果见图 4, 由测试结
果可知, 添加土壤质量 6% 硫酸亚铁+4% 硫化钠, 浸出液中总
铬浓度为 4.1 mg/L, Cr^{6+} 浓度为 0, 浸出液中总铬仍未达到修
复目标值, Cr^{6+} 达到修复目标值; 浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还
原稳定效率分别为 99.2% 和 100%。添加土壤质量 8% 硫酸亚
铁+4% 硫化钠, 浸出液中总铬浓度为 2.0 mg/L, Cr^{6+} 浓度为 0,
浸出液中总铬仍然未达到修复目标值, Cr^{6+} 达到修复目标值; 浸
出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为 99.6% 和 100%。

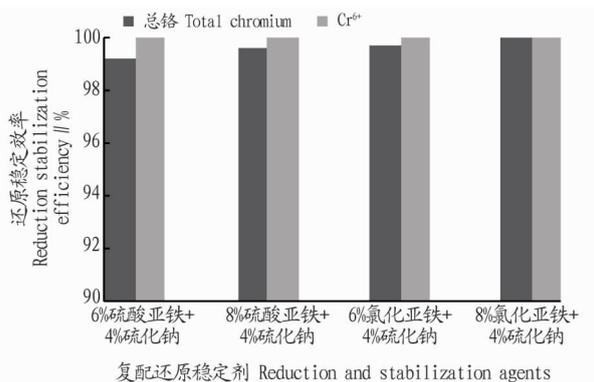


图 4 复配还原稳定剂的养护时间对污染物修复效果的影响

Fig. 4 Effect of curing time of reduction and stabilization agents on the remediation effect of pollutants

添加土壤质量 6% 氯化亚铁+4% 硫化钠, 浸出液中总铬
浓度为 1.80 mg/L, Cr^{6+} 浓度为 0, 总铬浓度不仅未达到修
复目标值, 反而较养护 3 d 浓度上升了 0.26 mg/L, Cr^{6+} 达到修
复目标值; 浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率分别为
99.7% 和 100%。添加土壤质量 8% 氯化亚铁+4% 硫化钠, 浸
出液中总铬、 Cr^{6+} 浓度均为 0, 总铬和 Cr^{6+} 均达到修复目标值;
浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率均达到 100%。

综上所述可见, 随着养护时间的增加, 不同添加量的复
配还原稳定剂对土壤浸出液中总铬和 Cr^{6+} 的还原稳定效率
略有增加, 但增幅不大。添加 8% 氯化亚铁+4% 硫化钠的修
复效果最好, 浸出液中的总铬和 Cr^{6+} 不仅能够达到修复目标
值, 而且浓度均为 0, 还原稳定效率均达到 100%, 总体来看,
养护时间的增加对土壤中的总铬和 Cr^{6+} 修复效果影响不
显著。

2.4 复配还原稳定剂的添加量和养护时间对土壤 pH 的影响

2.4.1 复配还原稳定剂的添加量对土壤 pH 的影响。从图 5
可以看出, 随着硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠添加量
的增加, 土壤 pH 普遍呈先上升后下降的趋势, 但与未加药剂
样品相比, pH 并未大幅增加, 变化幅度在 0.8 以内。这可能

是因为土壤中 Fe^{2+} 的水解过程产生的 H^+ 和硫化物的还原反
应产生的 OH^- 彼此相互抵消, 导致最终反应体系的 pH 变化
不大^[20-23]。而达到土壤修复目标的最佳复配还原稳定剂
(8% 氯化亚铁+4% 硫化钠) 添加后的土壤样品 pH 与未加药
剂样品 pH 最为接近, 因此该添加量对土壤 pH 影响最小。

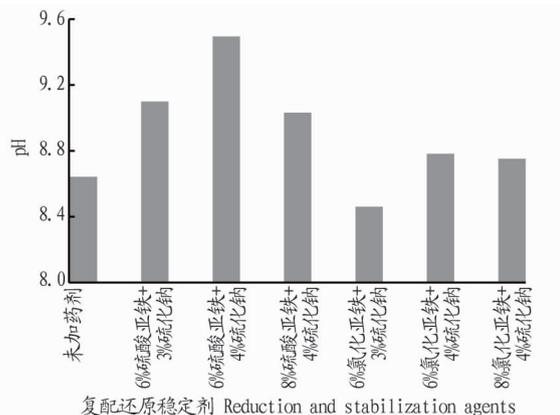


图 5 复配还原稳定剂添加量对土壤 pH 的影响

Fig. 5 Effect of additive amount of compound reduction and stabilization agents on soil pH

2.4.2 复配还原稳定剂养护时间对土壤 pH 的影响。从图 6
可以看出, 对于土壤中添加不同量的复配还原稳定剂(硫酸
亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠), 养护 3 d 和养护 30 d, 土
壤 pH 变化幅度都在 0.5 之内, 说明复配还原稳定剂(硫酸亚
铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠)的养护时间对土壤 pH 影响
不大。

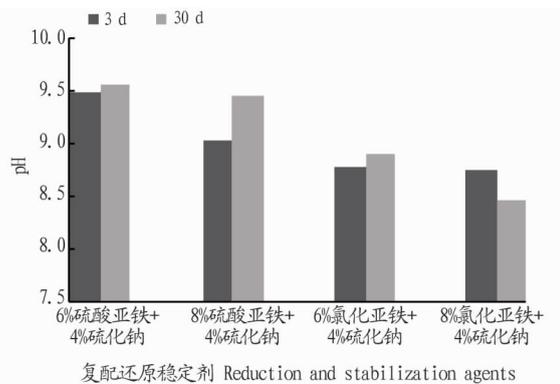


图 6 复配还原稳定剂养护时间对土壤 pH 的影响

Fig. 6 Effect of curing time of compound reduction and stabilization agents on soil pH

3 结论

(1) 采用 6% 腐殖酸钠+50% 水泥、6% 腐殖酸钠+1.5% 石
灰、6% 硫酸亚铁+3% 石灰、10% 硫酸亚铁+5% 石灰、6% 硫酸
亚铁+3% 硫化钠、6% 氯化亚铁+3% 硫化钠、3% 石灰+4.2% 氯
化镁+1.8% 氯化铝、3% 石灰+3.5% 氯化镁+2.5% 硫酸亚铁、
6% 硫酸亚铁+3% 复合碱 9 种复配修复药剂分别对铬污染土
壤进行处理, 添加后养护 3 d, 综合对比浸出液中污染物浓
度、还原稳定效率和反应前后土壤 pH 变化, 得出 6% 硫酸亚
铁+3% 硫化钠和 6% 氯化亚铁+3% 硫化钠修复效果较好。

(2) 添加土壤质量 8% 氯化亚铁+4% 硫化钠, 养护 3 d, 可

使污染土浸出液中的总铬和 Cr^{6+} 达到修复目标值, 养护 30 d, 还原稳定效率达到 100%, 因此 8% 氯化亚铁+4% 硫化钠为该铬污染场地的最佳复配还原稳定剂。

(3) 添加不同百分比的硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠, 对场地污染土壤 pH 影响不大; 添加不同百分比的硫酸亚铁+硫化钠和氯化亚铁+硫化钠, 养护 3 d 和养护 30 d, 对场地污染土壤 pH 影响不大。

参考文献

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 272.
- [2] 丁翼. 铬化合物生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-6.
- [3] 甄常亮, 那贤昭, 齐渊洪, 等. 电炉渣铬浸出行为及资源化利用风险分析[J]. 环境工程, 2012, 30(4): 93-95.
- [4] 刘帅霞, 陈亮, 高玉梅. 两段式还原工艺处理铬渣的生产性研究[J]. 环境工程, 2012, 30(3): 93-95.
- [5] 环境保护部, 发展改革委, 工业和信息化部, 等. “十二五”危险废物污染防治规划[EB/OL]. (2012-10-23) [2017-09-23]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201210/t20121023_240228.htm.
- [6] 梁金利, 蔡焕兴, 段雪梅, 等. 还原法修复六价铬污染土壤的研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(3): 80-83.
- [7] MEEGODA J N, KAMOLPORNIWIT J, VACCARI D A, et al. Remediation of chromium-contaminated soils: Bench-scale investigation[J]. Practice periodical of hazardous toxic and radioactive waste management, 1999, 3(3): 124-131.
- [8] 韩怀芬, 蒲凤莲, 裘娟萍. 生物法修复铬污染土壤的研究[J]. 能源环境保护, 2003, 17(2): 7-9.
- [9] 张瑞华, 孙红文. 电动力和铁 PRB 技术联合修复铬(VI)污染土壤[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1131-1136.
- [10] 刘国, 余雯雯, 陈春梅, 等. 铬污染土壤的固化稳定化及药剂还原的修复研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 68-72.

- [11] 徐小希. 水泥基复合材料对铬污染土壤的固化/稳定化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [12] 张家宁, 佟雪娇, 乔萌, 等. 不同还原剂对铬污染土壤中六价铬的修复效果研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(10): 16-20, 75.
- [13] 李亚玲, 高煊方, 向真黎, 等. 硫系物对铬污染土壤的还原稳定化处理[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(9): 1142-1144, 1162.
- [14] 杨武, 郭琳, 陈明, 等. 某铬盐厂 Cr(VI) 污染土壤还原稳定化效果研究[J]. 环境保护科学, 2018, 44(4): 114-120.
- [15] LOMBI E, ZHAO F J, WIESHAMMER G, et al. *In situ* fixation of metals in soils using bauxite residue: Biological effects[J]. Environmental pollution, 2002, 118(3): 445-452.
- [16] 尹贞, 廖书林, 马强, 等. 几种稳定化药剂修复铬污染土壤的研究[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 166-169.
- [17] 吴其胜, 李玉寿, 李玉华. 复合碱组分对矿渣粉煤灰碱胶凝材料性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2001, 14(2): 22-24.
- [18] 费志军, 何锦林, 王柱红. 腐殖酸钠对贵州农业土壤中镉形态的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 396-401.
- [19] 李国清, 罗生全. 海藻酸钠-腐殖酸钠吸附法处理重金属废水的研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2007, 12(3): 226-231.
- [20] 王旌, 罗启仕, 张长波, 等. 铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4036-4041.
- [21] DI PALMA L, GUEYE M T, PETRUCCI E. Hexavalent chromium reduction in contaminated soil: A comparison between ferrous sulphate and nanoscale zero-valent iron[J]. Journal of hazardous materials, 2015, 281: 70-76.
- [22] CHRYSOCHOOU M, FERREIRA D R, JOHNSTON C P. Calcium polysulfide treatment of Cr(VI)-contaminated soil[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 179(1/2/3): 650-657.
- [23] VELASCO A, RAMÍREZ M, HERNÁNDEZ S, et al. Pilot scale treatment of chromite ore processing residue using sodium sulfide in single reduction and coupled reduction/stabilization processes[J]. Journal of hazardous materials, 2012, 207/208: 97-102.

(上接第 42 页)



图 3 组合 4 后代叶片疣点

Fig. 3 The offspring with more obvious wart points in leaves of combination 4

3 结论与讨论

该研究对原产地实生寿类与日本园艺品种白银进行杂交, 通过提出育种目标、选择父母本、设计杂交组合方式、摸索适宜的授粉时期以及播种条件选择等, 对十二卷杂交进行研究。总体而言, 杂交种子萌发率不高, 但单果种子质量较高, 不同组合之间种子质量存在很大差异。十二卷花朵最佳

授粉时间是花朵开放 48 h 后。杂交组合 1(大久保白银×实生一号)结实率为 58%, 单果种子数量最高为 15 粒, 萌发幼苗比较健壮; 杂交组合 2(实生一号×实生二号)最终收获种子数量是 4 个组合中最多的, 说明 2 组试验父母本杂交授粉亲和度最高; 杂交组合 2、组合 3(实生三号×实生一号)的发芽率较高, 分别为 60% 和 56%; 杂交组合 4(实生四号×大久保白银)幼苗叶片疣点明显优于其他 3 个组合。

该试验也存在不足之处, 如杂交组合不够丰富, 获得可筛选的杂交后代数量有限; 杂交育种时间漫长, 尚未能筛选出稳定的高观赏性状品种。但可以通过叶片数目、株径大小、成活率、窗体疣点大小、真叶性状进行初步筛选。

参考文献

- [1] 许继勇, 麦瑜玲, 郑添群, 等. “高地”截形瓦苇的组织培养与快速繁殖技术研究[J]. 天津农业科学, 2006, 12(2): 8-10.
- [2] 刘树森. 浅谈寿类园艺品种的审美[J]. 花木盆景(花卉园艺), 2021(3): 34-37.
- [3] 张景新, 刘艳军, 杨静慧, 等. 激素对冰灯玉露不定芽和不定根分化的影响[J]. 天津农林科技, 2016(4): 4-6.
- [4] 任倩倩, 张京伟, 张英杰, 等. 十二卷属多肉植物的组培快繁研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(7): 12-14.
- [5] 杨锐. 鸾尾杂交育种研究[J]. 黑龙江农业科学, 2020(12): 73-76.
- [6] 孙涛. 你也能播种繁殖生石花[J]. 中国花卉盆景, 2008(8): 26-27.
- [7] 黄清俊, 丁雨龙, 杨祥敏. 植物组织培养简报摘编[J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(6): 642.
- [8] 卜顺法, 方连明, 唐玉强, 等. 多肉类十二卷属花卉盆栽技术[J]. 上海农业科技, 2020(5): 96-97, 116.
- [9] 严霖, 黄显雅, 毛彦彦, 等. 南宁十二卷属多肉植物的引种试验与栽培管理技术规程[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(5): 133-136, 143.
- [10] 南方农业编辑部. 十二卷植物(二)播种繁殖[J]. 南方农业, 2012, 6(6): 90.