



文章栏目：重金属污染土壤修复新技术与新思路专题

DOI 10.12030/j.cjee.202202010 中图分类号 X53 文献标识码 A

廖长君, 刘杰, 曹斐妹, 等. 调理剂-植物栽培协同降低矿区农田土壤中重金属有效态含量[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4067-4073.  
[LIAO Changjun, LIU Jie, CAO Feishu, et al. Reducing the available contents of various heavy metals by synergetic method of amendments and plantation of crops[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4067-4073.]

# 调理剂-植物栽培协同降低矿区农田土壤中重金属有效态含量

廖长君<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 曹斐妹<sup>1,2</sup>, 黎秋君<sup>1</sup>, 苏建<sup>1</sup>, 卢友志<sup>3,✉</sup>, 易筱筠<sup>4</sup>

1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 南宁 530007; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 3. 桂林理工大学南宁分校, 南宁 530001; 4. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006

**摘要** 定量评估重金属有效态含量是明确农田土壤修复过程中重金属生态环境风险的重要步骤。针对硫化物矿区重金属污染土壤开展添加蚕沙-铁粉及蚕沙-伊蒙土-铁粉调理剂条件下油葵、孔雀草、香茅草和桑树 4 种经济作物的盆栽试验, 并测定经济作物与调理剂共同作用下土壤中 pH、有机质及镉、铅、锌、铜有效态的含量。结果显示作物栽培与调理剂共同作用下, 土壤 pH 值在两季中均有增加, 土壤有机质在第一季中增加。第一季种植 4 种经济作物添加蚕沙-铁粉可显著降低土壤中多种重金属有效态含量, 各重金属的最高钝化效率分别为 Cd 30.3%、As 49.5%、Pb 33.6%、Zn 52.1%、Cu 45.7%, 优于蚕沙-伊蒙土-铁粉的调理效果。第二季种植时调理剂的钝化效率普遍降低。两季综合来看, 蚕沙-铁粉联合香茅草时有效态镉、砷、铅、锌、铜的降低幅度最大。因此, 添加蚕沙-铁粉调理剂的四种作物单季种植时能同时降低镉、砷、铅、锌、铜有效态的含量, 香茅草两季种植时能同时降低以上 5 种重金属有效态含量, 具有潜在应用价值。

**关键词** 重金属有效态; 调理剂; 植物栽培; 蚕沙

在矿区开采和冶炼过程中, 大量重金属伴随矿渣、冶炼废水和废气通过雨水淋溶、污水灌溉、大气降尘等方式进入土壤, 造成矿区农田污染<sup>[1]</sup>。矿区农田重金属污染土壤修复可从两方面开展工作。一是从土壤的角度选用合适的调理剂对原生土壤进行调理; 二是从作物的角度筛选合适的经济作物种植。无机试剂能与合适价态的重金属离子发生氧化、还原、沉淀等反应, 从而改变重金属的迁移量。天然有机肥能够增加土壤肥力, 改善土壤微生态环境, 同时有机肥中的有机物能够与重金属发生络合, 降低土壤中重金属向植物的转移量<sup>[2]</sup>。因此, 无机-有机混合调理剂是一类重要的调理试剂。不同的植物对不同重金属的吸收量具有较大差异。重金属具有多种形态, 其中有效态迁移性最强, 最容易被植物吸收富集, 是评价可迁移重金属数量的重要指标<sup>[3]</sup>。筛选适合不同重金属污染土壤种植的作物也是土壤修复的重要内容。油葵、孔雀草和香茅草是华南地区主要的油料作物。桑树是普遍种植的经济作物, 具有较强的重金属耐受性。

单纯对污染农田进行修复已不能满足污染农田地区居民对土壤经济价值的追求。边修复边生产是满足当地居民、政府和环保企业、等各方需求的主要发展方式。蚕沙是新鲜桑叶被蚕食后排出的代谢产物, 主要成分是黄酮类化合物, 一定程度上可改变土壤细菌群落的结构和优势种群, 并作为天然有机肥使用<sup>[4,5]</sup>。田间实验表明施加蚕沙能够增加土壤中的有机碳, 降低温室气体排放<sup>[6]</sup>。含铁物质反应活性高、表面具有多羟基位点, 可广泛用于重金属的调理<sup>[7-8]</sup>。

收稿日期: 2022-02-07; 录用日期: 2022-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1808500); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196037)

第一作者: 廖长君(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 19176042408@163.com; ✉通信作者: 卢友志(1988—), 男, 硕士, 讲师, luyzmail@163.com

本研究基于前期重金属污染农田的调理剂筛选结果,采用蚕沙-铁基复合调理剂进行异位调理,并开展4种经济作物的两季盆栽实验,探究调理剂与植物栽培对污染土壤中多种重金属有效态的影响,以期为多金属污染矿区农田土壤进行经济作物种植提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料

油葵和孔雀草的种子均采购于南宁蔬菜种子公司。香茅草和桑树苗购于南宁市西乡塘区苹果枣苗木经营部。蚕沙购于河池市桂恒旺科技有限责任公司。还原铁粉、伊蒙土购于南宁雄润化学试剂有限公司。供试土壤采自广西某硫化矿区重金属污染农田,pH为6.4,为弱酸性土壤。该土壤中主要污染物为镉、砷、铅、锌、铜,其质量分数分别为74、1848、2014、272、254 mg·kg<sup>-1</sup>,相应的有效态分别为4.8、21.2、170.1、24.8、48.4 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质为22.2 mg·kg<sup>-1</sup>。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018),供试土壤镉、砷、铅、锌、铜分别是风险筛选值的245倍、20倍、2倍、9倍、4倍,其中镉、砷均超过风险管控值。

### 1.2 盆栽实验方法

盆栽实验常温进行,分为对照组和实验组,对照组为不添加调理剂+植物,实验组为添加调理剂+植物。盆栽植物为油葵(*Helianthus annuus* Linn.)、孔雀草(*Tagetes patula* L.)、香茅草(*Cymbopogon citratus*)、桑树(*Morus alba* L.)4种植物,每种植物均设置3个处理。1)CK(空白对照);2)S<sub>1</sub>Fe<sub>2</sub>(蚕沙:还原铁粉=1:2);3)S<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Fe<sub>2</sub>(蚕沙:伊蒙土:还原铁粉=1:1:2)。总共12个处理,每个处理设置重复3次。具体如表1所示。

表1 实验处理  
Table 1 Treatments in experiment

| 对照组                               | 添加还原铁粉实验组                           | 添加伊蒙土和还原铁粉实验组                                      |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
| CK                                | S <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub>      | S <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub>      |
| 桑树 <i>Morus alba</i> L.           | S <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +桑树  | S <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +桑树  |
| 油葵 <i>Helianthus annuus</i> Linn. | S <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +油葵  | S <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +油葵  |
| 孔雀草 <i>Tagetes patula</i> L.      | S <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +孔雀草 | S <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +孔雀草 |
| 香茅草 <i>Cymbopogon citratus</i> .  | S <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +香茅草 | S <sub>1</sub> Y <sub>1</sub> Fe <sub>2</sub> +香茅草 |

盆栽在23 cm×14 cm塑料花盆中进行,共含供试土壤1800 g,按质量分数3%添加调理剂。在花盆中加入基肥(N:P:K=17:8:26),将调理剂与土壤混匀后加入盆中,加入去离子水保持土壤含水量为田间最大持水量的60%~70%<sup>[9]</sup>。平衡20 d后,分别将油葵、孔雀草种子均匀洒入塑料花盆中并覆盖少量土,再将1株香茅草和桑树移栽入盆中,喷洒适量去离子水。待油葵、孔雀草出苗7 d后根据幼苗长势定苗至3株,生长期保持含水量为田间最大持水量的60%~70%。60 d后,采集土壤样品进行重金属有效态含量的测定。之后,播种第2批油葵、孔雀草,并移栽1株香茅草,油葵和孔雀草出苗7 d后分别定苗至6株和4株。60 d后,采集第二季土样。将土样风干混匀,过20目筛,测定土壤的pH、有机质及有效态重金属含量。

### 1.3 测定项目和amp;方法

土壤中有效态镉和锌采用二乙三胺五乙酸提取—电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 804—2016)测定;有效态砷采用盐酸提取—原子荧光法测定;有效态铜按照二乙三胺五乙酸—原子吸收分光光度法(NY/T 890—2004)测定;有效态铅按照二乙三胺五乙酸提取—原子吸收分光光度法(GB/T 23739—2009)测定。土壤pH按照电位法(NY/T 1377—2007)测定。有机质按照重铬酸钾—硫酸定量法(NY/T 9834—1988)测定。

### 1.4 数据处理

用Excel2010进行基础计算,SPSS软件进行同作物的不同处理间单因素方差分析,最后用origin8.5软件作柱状图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同处理中土壤 pH 值的变化

在重金属污染土壤中施加复合调理剂后，两季作物生长后土壤的 pH 变化如图 1 所示。第一季施加  $S_1Fe_2$  后，土壤 pH 提高了 0.68~1.08，施加  $S_1Y_1Fe_2$  后土壤 pH 提高了 0.26~0.78。第二季施加  $S_1Fe_2$  后，土壤 pH 提高了 0.61~1.03，施加  $S_1Y_1Fe_2$  后土壤 pH 提高了 0.36~0.76。2 种调理材料对土壤 pH 值的影响差异不显著。植物根系分泌的低分子有机酸使 pH 降低，且降低程度因作物品种不同而不同<sup>[10]</sup>。第一季种植孔雀草后土壤 pH 降低最显著，比原土 pH 值低 0.57。而香茅草和桑树两季种植后的土壤 pH 都是略低于原土 pH。两季相比，pH 增幅有一定差别。 $S_1Fe_2$ -孔雀草组合，两季的 pH 分别增加 1.08 和 1.03，增幅最大。 $S_1Fe_2$ -桑树组合，两季的 pH 分别增加 0.69 和 0.61，增幅最小。蚕沙 pH 为 9.6，呈碱性，可与土壤中的  $H^+$  发生中和反应，提高 pH。此外，伊蒙土中的  $SiO_4^{2-}$  可释放与土壤中的  $OH^-$  发生交换而增加 pH<sup>[11]</sup>。

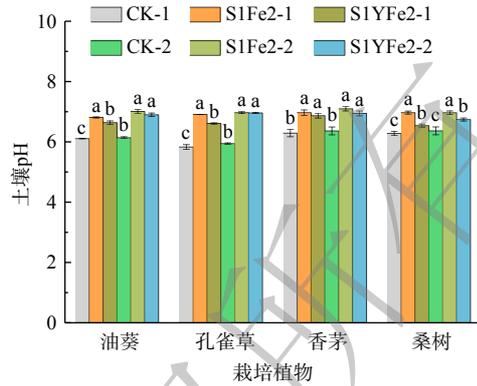
### 2.2 不同处理中土壤有机质含量的变化

如图 2 所示，种植第一季作物后实验组土壤有机质相对空白组的变化为 +0.43%~+6.05%，第二季为 -1.11%~8.15%。第一季种植油葵后，添加  $S_1Fe_2$  有机质的含量增加最大为 6.05%。第二季种植孔雀草后，施加两种调理剂有机质含量的增加量最大分别是 8.15% 和 5.13%。第二季种植桑树后，施加两种调理剂有机质含量分别降低 -0.56% 和 -1.11%。添加  $S_1Fe_2$  对有机质含量的增加幅度略高于  $S_1Y_1Fe_2$ ，蚕沙属于碱性有机材料，伊蒙土及铁粉为中性无机材料，蚕沙与其复配后，随着蚕沙占比量的增加，土壤有机质增加。蚕沙富含蛋白、脂肪等有机物，不仅供给植物生长需要的养分，同时能够提高土壤的有机质含量、改善微生物的生长环境、促进微生物的生长、提高土壤的保水保肥等综合能力<sup>[12]</sup>。

### 2.3 不同处理中土壤重金属有效态含量的变化

#### 2.3.1 有效态镉的变化

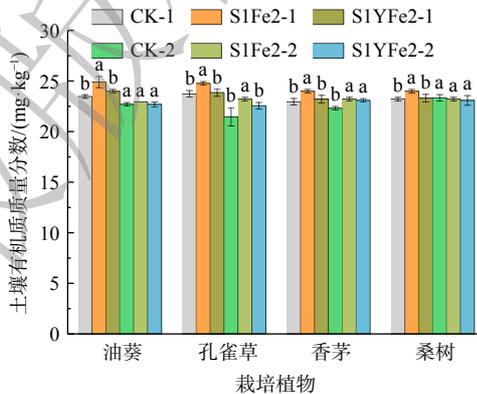
两季植物种植后土壤的有效态镉变化如图 3。在种植第一季植物后，添加  $S_1Fe_2$  处理与空白相比能显著降低土壤中有有效态 Cd 的含量，降低 5.7%~30.3%。种植孔雀草与香茅草的处理中有效态 Cd 降低最显著，分别降低 30.3% 和 29.3%，种植油葵的土壤中有有效态 Cd 仅降低 5.7%。添加  $S_1Y_1Fe_2$  处理后，除油葵外，种植孔雀草、香茅草和桑树的土壤中有有效态 Cd 分别降低 19.3%、19.1% 和 19.3%。 $S_1Fe_2$  的调理



注：小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著， $P < 0.05$ ；CK-1 表示空白组第一季。

图 1 处理对土壤 pH 的影响

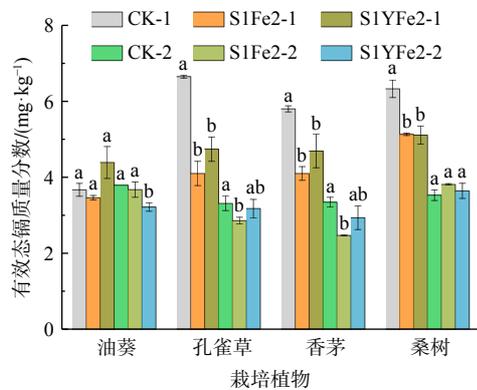
Fig. 1 Effect of treatment on the soil pH



注：小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著， $P < 0.05$ ；CK-1 表示空白组第一季。

图 2 处理对土壤有机质含量的影响

Fig. 2 Effect of treatment on the organic contents in soil



注：小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著， $P < 0.05$ ；CK-1 表示空白组第一季。

图 3 处理对有效态镉的影响

Fig. 3 Effect of treatment on the effective Cd

效果略优于  $S_1Y_1Fe_2$ 。种植第二季植物后,除种植桑树的处理无调理效果外,其余有效态镉均有降低。与空白相比,施加  $S_1Fe_2$  处理效果最佳的为香茅草,其次为孔雀草,有效态镉含量分别降低 26.0% 和 13.6%,种植油葵降低不显著。施加  $S_1Y_1Fe_2$  调理效果最显著的为油葵,有效态镉降低 15.0%,其他 3 种植物与空白无显著差异。综合来看  $S_1Fe_2$  联合香茅草的种植模式对有效态镉的降低效果最佳。蚕沙含有络合镉的多种有机物结构,而铁粉具有较强的还原性能够使高价态的重金属离子发生形态转化,从而降低有效态镉<sup>[13]</sup>。

### 2.3.2 有效态砷的变化

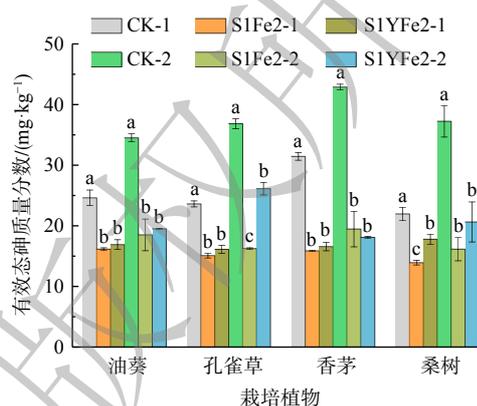
两季植物种植后土壤有效态砷变化如图 4。种植第一季作物后两种调理材料均能显著降低土壤中有有效态 As 含量。添加  $S_1Fe_2$  种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态 As 分别降低了 34.4%、36.1%、49.5% 和 36.6%,添加  $S_1Y_1Fe_2$  后对应的百分比分别是 31.3%、31.8%、47.3% 和 19.0%。4 种作物处理中,种植桑树的处理中添加  $S_1Fe_2$  对土壤 As 的调理效果优于  $S_1Y_1Fe_2$ ,其余处理调理效果差异不显著。第二季添加  $S_1Fe_2$  后油葵、孔雀草、香茅草和桑树的有效态 As 分别降低 46.4%、55.9%、54.6% 和 56.6%,添加  $S_1Y_1Fe_2$  后有效态 As 分别降低 43.4%、29.1%、57.8% 和 44.6%。孔雀草添加  $S_1Fe_2$  对有效态砷的调理效果显著优于  $S_1Y_1Fe_2$ 。第二季作物种植后有效态的降低率比第一季更高,可能是铁粉的反应存在一定的缓释型,随着反应时间的延长,铁粉逐渐被氧化形成铁氧化物,铁粉氧化过程中与土壤中砷发生氧化还原反应,且砷在铁氧化表面发生专性吸附,从而降低土壤砷的有效性<sup>[14-15]</sup>。

### 2.3.3 有效态铅的变化

两季植物种植后土壤有效态铅变化如图 5。种植第一季作物后,与空白相比,添加  $S_1Fe_2$  种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树后有效态铅分别降低 7.6%、33.6%、23.5% 和 31.3%;添加  $S_1Y_1Fe_2$  除油葵的增加外,孔雀草、香茅草和桑树的有效态铅分别降低 19.6%、8.0% 和 29.8%, $S_1Fe_2$  调理效果优于  $S_1Y_1Fe_2$ 。种植第二季作物后除香茅草的处理添加  $S_1Fe_2$  和  $S_1Y_1Fe_2$  使有效态铅分别降低 27.8% 和 26.3% 外,其余 3 种作物添加两种调理材料均增加了有效态铅含量。 $S_1Fe_2$  组实验的调理效果更好。这说明从重金属的有效态来看伊蒙土的协同作用不强,其原因可能是伊蒙土属于蒙脱石和伊利石的过渡性产物,属于片层状硅酸盐,层间有可交换的阳离子,而交换释放的钠离子、镁离子等可能对植物生长有利,故对重金属离子交换吸附数量有限,对不同重金属的吸附量也存在差异<sup>[16]</sup>。

### 2.3.4 有效态锌的变化

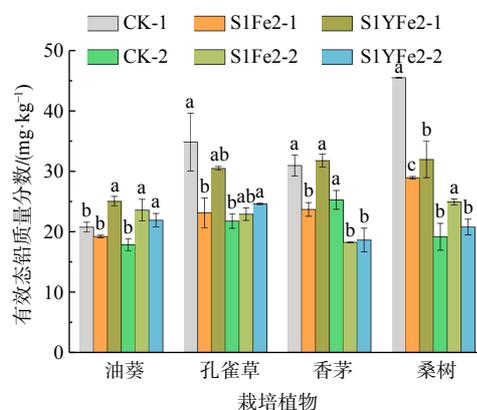
两季植物种植后土壤有效态锌变化见图 6。种植第一季作物两种调理材料均能显著降低土壤中有有效态锌含量,添加  $S_1Fe_2$  后油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态锌分别降低 31.8%、50.5%、50.5% 和 52.1%;添加  $S_1Y_1Fe_2$  后对应有效态锌分别降低 6.5%、40.2%、40.6% 和 44.3%。 $S_1Fe_2$  对有效态 Zn 的调理效率显著



注:小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著,  $P < 0.05$ ; CK-1 表示空白组第一季。

图 4 处理对有效态砷的影响

Fig. 4 Effect of treatment on the effective As



注:小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著,  $P < 0.05$ ; CK-1 表示空白组第一季。

图 5 处理对有效态铅的影响

Fig. 5 Effect of treatment on the effective Pb

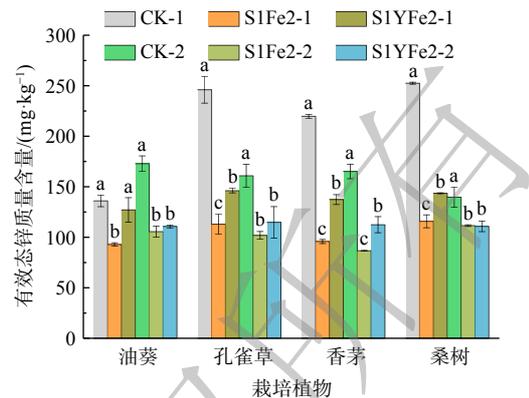
优于  $S_1Y_1Fe_2$ 。种植第二季作物后，添加调理材料后有效态锌含量有所下降，添加  $S_1Fe_2$  种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态锌分别降低 38.9%、36.7%、47.5% 和 20.2%；添加  $S_1Y_1Fe_2$  种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态锌分别降低 35.9%、28.7%、31.9% 和 20.7%。上述结果可能原因有：一是蚕沙提高土壤 pH 后，增加了土壤表面的可变负电荷，促进了胶体对锌的吸附；二是氢离子的减少使得有机质与锌结合得更加牢固，从而降低了有效态<sup>[17]</sup>。

### 2.3.5 有效态铜的变化

两季植物种植后土壤有效态铜变化见图 7。种植第一季作物后与空白相比，添加  $S_1Fe_2$  后种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态铜分别降低 14.1%、45.7%、42.0% 和 41.8%；添加  $S_1Y_1Fe_2$  后除种植油葵有效态铜增加外，孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态铜分别降低 36.3%、29.9% 和 35.4%，且  $S_1Fe_2$  的调理效果显著优于  $S_1Y_1Fe_2$ 。种植第二季作物后添加调理材料能一定程度上降低土壤中有效态铜含量。除种植油葵外，其余 3 种植物处理中有效态铜的调理效率降低。添加  $S_1Fe_2$  后种植油葵、孔雀草、香茅草和桑树的处理中有效态铜分别降低 17.3%、16.7%、26.9% 和 8.1%，添加  $S_1Y_1Fe_2$  后对应的有效态铜分别降低了 20.7%、8.1%、17.5% 和 13.4%。2 种调理剂和 4 中植物不同组合条件下，有效态铜均有所下降。这表明碱性的蚕沙作用下，土壤中的负电荷胶体数量增加，与胶体络合的铜数量增加，被植物吸收的铜减少<sup>[18]</sup>。

### 2.3.6 修复方法的对比

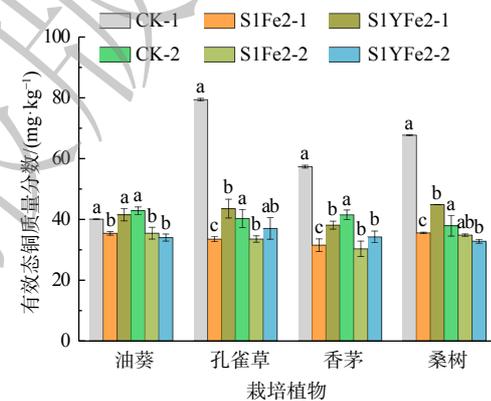
对近几年报道的典型重金属污染土壤的修复方法进行汇总如表 2。现有修复方法呈现以下特点：调理剂与植物栽培协同修复单一重金属污染土壤，比如文献 [17-23]；2 种以上重金属污染的单季协同修复，比如文献 [24-28]；作物品种以水稻、小麦等传统作物为主；结论集中在植物达到食品安全国家标准、植物重金属含量的降幅和土壤中重金属有效态的降幅 3 个方面。事实上，农田污染的重金属是多种共存的，重金属污染土壤的治理也以同时降低多种重金属含量为目标，因此，多种金属同时治理在场地实施方面更具参考价值。在作物的选择上，重金属污染地区的农民更热衷于经济作物的种植以摆脱污染造成的经济困扰。作物安全的长期性是污染区农民考虑的重要因素，同一作物连续两季种植时的钝化效果需要评估。此外，受市场经济调控的影响，长期种植单一的经济作物也不符合实际，需要根据市场行情进行灵活调整，故经济作物的筛选很有必要。作物达标是修复目的，但影响因素很多。降低土壤中重金属的有效态含量是首要条件。本研究以西南某硫化矿矿区旱地土壤为对象，开展镉、砷、铅、锌、铜污染土壤的多种经济作物盆栽小试，发现添加蚕沙-铁粉调理剂时 4 种经济作物能同时降低 5 种重金属的有效态，香茅草连续两季种植能同时降低 5 种重金属有效态，可为相关场地修复的实施提供参考。



注：小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著， $P < 0.05$ ；CK-1表示空白组第一季。

图 6 处理对有效态锌的影响

Fig. 6 Effect of treatment on the effective Zn



注：小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著， $P < 0.05$ ；CK-1表示空白组第一季。

图 7 处理对有效态铜的影响

Fig. 7 Effect of treatment on the effective Cu

表2 修复方法的对比  
Table 2 Comparison of amendment methods

| 序号 | 污染种类      | 调理剂         | 作物品种                    | 时长 | 主要结论  | 参考文献 |
|----|-----------|-------------|-------------------------|----|---|------|
| 1  | 镉         | 凹凸棒粘土       | 水稻、小麦                   | 三季 | 水稻达标; 小麦降低  | [19] |
| 2  | 镉         | 钙镁磷肥        | 水稻                      | 单季 | 降低53.3%~75.6%   | [20] |
| 3  | 镉         | 生物炭         | 棉花                      | 单季 | 最大降低57.3%   | [21] |
| 4  | 镉         | 石灰、腐殖酸      | 水稻                      | 单季 | 达标  | [22] |
| 5  | 镉         | 硅钙镁肥、腐殖酸    | 小麦                      | 单季 | 最大下降81.77%  | [23] |
| 6  | 铜         | 生物炭         | 甜菜                      | 单季 | 有效态最大降低24.8%  | [24] |
| 7  | 铜         | 生石灰         | 油菜、水稻                   | 三季 | 有效态最大降低38.9%  | [18] |
| 8  | 镉、锌       | ND          | 玉米                      | 单季 | 雅玉98为低积累品种  | [25] |
| 9  | 镉、铅       | 石灰、海泡石、铁锰矿粉 | 小白菜                     | 单季 | 降低有效态、降低镉铅含量  | [26] |
| 10 | 铅、锌、铜     | ND          | 芦苇、芒萁、笔管草、乌蕨、乌毛蕨、藿香蓟和毛蕨 | 单季 | 芒萁对Cd、Pb、Cu具有较强吸收能力                                       | [27] |
| 11 | 镉、砷、锌     | 蚕沙、铁粉       | ND                      | 单季 | 有效态分别降低42.5%、75.0%、48.6%                                  | [28] |
| 12 | 铅、砷、镉、锌、铜 | 海泡石、鸡粪      | 油菜                      | 单季 | 达标  | [29] |
| 13 | 镉、砷、铅、锌、铜 | 蚕沙、铁粉       | 油葵、孔雀草、香茅草、桑树           | 两季 | 单季有效态分别降低30.3%、49.5%、33.6%、52.1%、45.7%; 香茅草两季同时降低5种重金属有效态 | 本文   |

### 3 结论

1) 2种调理剂和4种经济作物共同作用下, 两季种植过程中土壤的pH均增大。土壤的有机质在第一季均增加。

2) 添加蚕沙-铁粉调理剂油葵、孔雀草、香茅草和桑树单季种植时能同时降低镉、砷、铅、锌、铜有效态的含量, 香茅草两季种植时能同时降低以上5种重金属有效态含量, 具有潜在应用价值。2种调理剂对不同重金属有效态的调理能力不同, 调理剂对重金属有效态的调理能力不一定具有双季延续性。因此, 具有广泛普适性和延续性的调理剂仍有待研究。

### 参考文献

- [1] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2104-2114.
- [2] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181.
- [3] 杨洁, 瞿攀, 王金生, 等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2): 217-223.
- [4] 张悦, 邓爱平, 翁倩倩, 等. 蚕沙化学成分体外降解研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 2130-2137.
- [5] 王谢, 邓虎军, 唐甜, 等. 蚕沙对土壤细菌群落结构的影响[J]. 蚕业科学, 2019, 45(6): 870-875.
- [6] 刘顺翔, 吴昊, 胡钧铭, 等. 绿肥、蚕沙有机肥配施化肥对免耕稻田土壤碳库平衡的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(11): 2690-2696.
- [7] XU Y Z, FANG Z Q, TSANG E P. In situ immobilization of cadmium in soil by stabilized biochar-supported iron phosphate nanoparticles[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(19): 19164-19172.
- [8] QIN L Y, HE L, Yang W J, et al. Preparation of a novel iron-based biochar composite for removal of hexavalent chromium in water[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(9): 9214-9226.
- [9] 徐蒙蒙. 多金属重度污染农田风险管控技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [10] 黄玉婷, 吴亚, 刘大林, 等. 铝胁迫对草本植物生理的影响机制[J]. 草业科学, 2018, 35(6): 1517-1527.
- [11] 龚玲婷, 石林, 蔡如梦. 矿物质调理剂对土壤养分含量及植物营养吸

- 收的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 916-922.
- [12] 李苹, 付弘婷, 张发宝, 等. 蚕沙有机肥对作物产量、品质及土壤性质的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1195-1199.
- [13] 黎秋君. 铅锌复合污染土壤的钝化修复与土壤酶活性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [14] 孙林, 王寅, 司友斌. 三种铁氧化物对As(Ⅲ)和As(V)的吸附研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 198-206.
- [15] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. 水稻土中砷的环境化学行为及铁对砷形态影响研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(5): 854-862.
- [16] 姜腾达. 粘土矿物对水中Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>的吸附及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [17] 张茜, 徐明岗, 张文菊, 等. 磷酸盐和石灰对污染红壤与黄泥土中重金属铜锌的钝化作用[J]. 生态环境, 2008(3): 1037-1041.
- [18] 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 等. 油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5168-5175.
- [19] 任静华, 廖启林, 范健, 等. 凹凸棒粘土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2161-2168.
- [20] 李造煌, 杨文强, 邹佳玲, 等. 钙镁磷肥对土壤Cd生物有效性和糙米Cd含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2322-2330.
- [21] 王金刚, 田甜, 王海江, 等. 生物质炭对棉花生长发育及地上部各器官中镉富集的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(5): 687-699.
- [22] 袁林, 赖星, 杨刚, 等. 钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 90-97.
- [23] 杨金康, 朱利楠, 杨秋云, 等. 硅钙镁肥和改性腐殖酸对土壤镉形态和小麦镉积累的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 808-816.
- [24] 张国胜, 闫梦, 程红艳, 等. 菌糠生物炭对污灌区土壤Cu形态及甜菜生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(12): 60-68.
- [25] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(01): 16-23.
- [26] 汪毅, 王华静, 郑沈, 等. 3种钝化剂及其组合对小白菜镉铅含量的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 151-158.
- [27] 赵雅曼, 陈顺钰, 李宗勋, 等. 铅锌矿集区7种草本植物对重金属的富集效果[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(3): 232-240.
- [28] 涂春艳, 蒋林伶, 张超兰, 等. 蚕沙有机肥—铁基复配材料对镉铜锌复合污染土壤的修复效应[J]. 南方农业学报, 2019, 50(11): 2436-2442.
- [29] 沈章军, 侯万青, 徐德聪, 等. 不同钝化剂对重金属在土壤-油菜中迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2779-2788.

(责任编辑: 靳炜)

## Reducing the available contents of various heavy metals by synergetic method of amendments and plantation of crops

LIAO Changjun<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, CAO Feishu<sup>1,2</sup>, LI Qiujun<sup>1</sup>, SU Jian<sup>1</sup>, LU Youzhi<sup>3,\*</sup>, YI Xiaojun<sup>4</sup>

1. Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co.Ltd, Nanning 530007, China; 2. School of Environment Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Guilin University of Technology at Nanning, Nanning 530001, China; 4. South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

\*Corresponding author, E-mail: luyzmail@163.com

**Abstract** The quantitative assessment of available contents of various heavy metals is important to identify the ecological risk of heavy metals in remediation process. In this study, pot experiments with four economic crops (sunflower, malachite grass, citronella, and mulberry), respectively, were carried out in heavy metal contaminated soil from sulfide minerals mine in the presence of silkworm-iron powder or silkworm- (illite-smectite interstratified clay minerals)-iron powder. The pH, organic contents, and the available contents of Cd, As, Pb, Zn, and Cu in soil were analyzed under the combination of the selected crops and conditioners. Experimental results showed that pH in soil increased with the treatments of two amendments in two seasons, while organic contents only increased in the first season. The available contents of various heavy metals in soil were significantly reduced when the four crops were planted in the first season with the treatment of silkworm-iron powder, with passivation efficiencies of 30.3% (Cd), 49.5% (As), 33.6% (Pb), 52.1% (Zn), and 45.7% (Cu), respectively, which were better than the treatment of illite-smectite interstratified clay minerals. In general, the passivation efficiencies declined in the second season. The largest decrease of available Cd, As, Pb, Zn, and Cu occurred when the combination of silkworm-iron powder and citronella was applied. The available Cd, As, Pb, Zn, and Cu were all reduced under the synergetic treatment of silkworm-iron powder with each of the four selected crops in the first season, and with citronella in two seasons, indicating high potential in application.

**Keywords** available contents of heavy metals; conditioner; plant cultivation; silkworm excrement