

程志刚,黄凯,张杏锋. 改良剂对铅锌尾矿砂改良效果及对杂交狼尾草生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):332-335.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.098

# 改良剂对铅锌尾矿砂改良效果 及对杂交狼尾草生长的影响

程志刚<sup>1,2</sup>, 黄凯<sup>1,2</sup>, 张杏锋<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学/广西矿冶与环境科学实验中心, 广西桂林 541004;

2. 桂林理工大学环境科学与工程学院/广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要:**使用有机肥、泥炭、土壤作为改良剂,与铅锌尾矿砂混合,研究改良剂对铅锌尾矿砂的改良效果及对杂交狼尾草生长、重金属累积的影响。结果显示:供试铅锌尾矿砂中除铜外,砷、锌、铅的含量较高,对周边环境具有极强的生态风险;改良剂与铅锌尾矿砂混合可提高铅锌尾矿砂的肥力,其中有机肥能显著提高铅锌尾矿砂中铵态氮、速效磷、速效钾和有机质的含量;重金属主要累积于杂交狼尾草的根部,有机肥改良剂对杂交狼尾草吸收砷能力的促进作用最佳,10%泥炭对杂交狼尾草地下部分富集锌的促进作用最优,改良剂能明显降低杂交狼尾草地上部分对铅的富集,5%泥炭对杂交狼尾草地上部分富集铜的促进作用最强。

**关键词:**重金属污染土壤;铅锌尾矿砂;杂交狼尾草;改良剂;牧草;植物稳定

**中图分类号:** X53    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002-1302(2016)01-0332-04

金属尾矿废弃地因具有物理化学上的不良特性而成为寸草不生的裸地,其主要成分为沙粒和粉粒,具有重金属含量高、养分贫瘠、植物覆盖率低等特点<sup>[1-2]</sup>。世界各国每年排出的尾矿砂量超过 50 亿 t<sup>[3]</sup>,而我国每年产出尾矿砂就约有 3 亿 t<sup>[4]</sup>。由于尾矿砂的水蚀风蚀现象严重,尾矿砂颗粒细小,随着雨水和扬尘扩散,从而污染周边土壤和水体,严重危害生态环境,威胁人体健康。有机肥在改善土壤理化性质方面有特殊的作用,可促进植物生长、提高土壤肥力、降低重金属有效性、提高治理后重金属污染土壤的可持续利用性<sup>[5-8]</sup>。

本试验选用重金属毒性很高的铅锌尾矿砂作为研究材料,将铅锌尾矿砂与有机肥、泥炭、土壤按一定比例混合,同时

配合种植杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*),为探寻“改良剂+牧草”对铅锌尾矿砂的联合修复效果提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试铅锌尾矿砂:采自广西河池市环江某铅锌矿尾矿库,风干后过 20、100 目筛备用。

供试改良剂:(1)有机肥,按照猪粪与草木灰质量比 4:1 配制而成,猪粪、草木灰均取自广西桂林市雁山镇当地农户。(2)泥炭,购于桂林市花鸟市场。(3)混合用土壤,采自桂林市某高校的校园内,风干后过 20、100 目筛备用。

供试铅锌尾矿砂和混合用土壤的主要重金属含量见表 1。

表 1 供试铅锌尾矿砂和混合用土壤的主要重金属含量

供试样品	pH 值	总砷含量 (mg/kg)	总锌含量 (mg/kg)	总铅含量 (mg/kg)	总铜含量 (mg/kg)
铅锌尾矿砂	7.02	255.44	9 445.67	1 296.02	61.93
混合用土壤	6.73	—	232.78	206.18	59.81

注:“—”表示无法检出。表 2、表 4 至表 8 同。

收稿日期:2014-09-03

基金项目:广西自然科学基金(编号:2013GXNSFBA019026、2013GXNSFEA053002);广西重点实验室基金(编号:桂科能 1201Z024)。

作者简介:程志刚(1989—),男,湖北黄石人,硕士,主要从事水污染控制研究。E-mail:czg\_21123@163.com。

通信作者:张杏锋,博士,讲师,研究方向为重金属污染治理。E-mail:zhangxf@glut.edu.cn。

[6]刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2001:93-111.

[7]罗小红,何靖,林毓. 沸水浴王水提取土壤样品 Pb、Cr、Cd、As 的探讨[J]. 广西农业科学,2007,38(5):547-549.

[8]张飞. 土壤中重金属测定方法探讨[J]. 上海环境科学,2010, 29(2):74-77.

[9]苏淑婷,李天宝,易碧华,等. 微波消解-ICP-AES法测定土壤中铅、砷、铬、镉和汞[J]. 福建分析测试,2013,22(5):45-48.

[10]温宏利,马生凤,马新荣,等. 王水溶样-电感耦合等离子体发

射光谱法同时测定铁铜铅锌硫化物矿石中 8 个元素[J]. 岩矿测试,2011,30(5):566-571.

[11]龙加洪,谭菊,吴银菊,等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. 中国环境监测,2013,29(1):123-126.

[12]杨艳芳,刘凤枝,蔡彦明. 土壤样品的王水回流消解重金属测定方法的研究[J]. 农业环境与发展,2005(4):44-45.

[13]陈山. 土壤重金属测定的前处理的方法的改进[J]. 北方环境,2011,23(12):155-156.

[14]蒋辉云,郭霞,汤根平. 应用三种不同处理方法消解土壤的研究[J]. 四川环境,2013,32(4):15-18.

供试植物:杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*),北京鑫农丰牌,购自北京中特联农牧发展有限公司。

### 1.2 试验方法

本试验共设8个处理(表2),按质量比加入铅锌尾矿砂、有机肥、泥炭和混合用土壤进行混合,每个处理重复3次,共24盆:(1)对照(CK):只加入铅锌尾矿砂;(2)铅锌尾矿砂+有机肥+泥炭(A处理):按质量比将25%有机肥与75%铅锌尾矿砂混合(总质量2 000 g/盆),再加入5%泥炭;(3)铅锌尾矿砂+少量泥炭(B<sub>1</sub>处理):泥炭施加量为铅锌尾矿砂质量的5%;(4)铅锌尾矿砂+大量泥炭(B<sub>2</sub>处理):泥炭施加量为铅锌尾矿砂质量的10%;(5)铅锌尾矿砂+大量泥炭+少量混合用土壤(C<sub>1</sub>处理):按质量比将25%混合用土壤与75%铅锌尾矿砂混合后,再加入10%泥炭;(6)铅锌尾矿砂+大量泥炭+中量混合用土壤(C<sub>2</sub>处理):按质量比将50%混合用土壤与50%铅锌尾矿砂混合后,再加入10%泥炭;(7)铅锌尾矿砂+大量泥炭+大量混合用土壤(C<sub>3</sub>处理):按75%混合用土壤与25%铅锌尾矿砂混合后,再加入10%泥炭;(8)混合用土壤(KB处理):只加入混合用土壤。

表2 改良剂与铅锌尾矿砂用量

处理	铅锌尾矿砂 (g/盆)	有机肥 (g/盆)	泥炭 (g/盆)	混合用土壤 (g/盆)
CK	2 000	—	—	—
A	1 500	500	100	—
B <sub>1</sub>	2 000	—	100	—
B <sub>2</sub>	2 000	—	200	—
C <sub>1</sub>	1 500	—	200	500
C <sub>2</sub>	1 000	—	200	1 000
C <sub>3</sub>	500	—	200	1 500
KB	—	—	—	2 000

施加改良剂并平衡1周后,每盆中移栽2株长势均匀的杂交狼尾草苗,每天定时浇水,使各处理含水量保持在田间持水量的75%左右。每周调整1次试验盆的位置,确保每盆的光照度、温度基本一致。杂交狼尾草生长3个月收获,将植物分地上部、地下部分别割取后,用卷尺测量株高,先用自来

水冲洗干净,然后用超纯水清洗,再用吸水纸吸干后用电子秤称地上部分、地下部分鲜质量,称完分别装入信封中,放入烘箱于105℃下杀青0.5 h后于60℃烘干至恒质量,再用电子秤称地上部分、地下部分干质量。烘干后用粉碎机粉碎并装入塑料封口袋中,放入干燥的储物箱中保存。将各个处理改良剂、铅锌尾矿砂混合样品带回实验室自然风干、研磨,分别过20、100目尼龙筛,装入塑料封口袋中放入干燥的储物箱中保存待测。

### 1.3 样品分析

土壤pH值用酸度计测定,固液比1:2.5;有机质含量采用水合热重铬酸钾氧化比色法测定;铵态氮含量用纳氏试剂比色法测定;速效磷含量用碳酸氢钠-铝锑抗比色法测定;速效钾用乙酸铵提取,用原子吸收分光光度计测定含量<sup>[9]</sup>。铅锌尾矿砂及其与改良剂组合的砷、锌、铅、铜全量及植物砷、锌、铅、铜含量测定采用硝酸-双氧水湿式消解法。测试过程加入国家标准土壤样品GBW07407(GSS-7)砖红壤、国家标准植物样品GBW10015(GSB-6)菠菜进行质量控制。

重金属砷、锌、铅、铜的含量用ICP-OES(PE-Optima 7000DV,美国)测定,所用容器均用10% HNO<sub>3</sub>浸泡1 d后使用,避免重金属的各种可能性的交叉污染。

### 1.4 数据处理

植物重金属转运系数计算公式为:

$$\text{植物重金属转运系数} = \frac{\text{植物地上部分重金属含量}}{\text{植物地下部分重金属含量}}$$

所有数据使用统计软件SPSS 19.0、Excel 2007进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理的pH值及肥力情况

由表3可知,铅锌尾矿砂和混合用土壤的pH值分别为7.02、6.73,属于中性;铅锌尾矿砂与不同改良剂混合后,B<sub>2</sub>处理pH值有所上升,比对照增加了0.19;C<sub>3</sub>处理pH值与对照相同;其余处理的pH值都有所降低,但降低幅度不大,pH值在6.59~6.99之间,均属于中性。

表3 不同处理的pH值及肥力情况

处理	pH值	铵态氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (%)
CK	7.02 ± 0.03b	0.94 ± 0.01e	0.98 ± 0.02bc	19.91 ± 0.76bc	3.15 ± 0.04d
A	6.90 ± 0.03d	1.48 ± 0.04b	22.51 ± 0.24a	849.88 ± 38.99a	6.42 ± 0.07a
B <sub>1</sub>	6.99 ± 0.02c	0.65 ± 0.02f	0.61 ± 0.06de	42.66 ± 0.86bc	3.77 ± 0.04b
B <sub>2</sub>	7.21 ± 0.02a	0.59 ± 0.02g	0.55 ± 0.04e	39.20 ± 0.76bc	3.16 ± 0.01d
C <sub>1</sub>	6.59 ± 0.01g	0.93 ± 0.01e	1.09 ± 0.08b	16.86 ± 0.29c	3.26 ± 0.04d
C <sub>2</sub>	6.64 ± 0.01f	1.31 ± 0.04c	0.99 ± 0.04bc	16.66 ± 0.29c	3.72 ± 0.07bc
C <sub>3</sub>	7.02 ± 0.02b	1.25 ± 0.01d	0.73 ± 0.08de	21.73 ± 0.57bc	3.65 ± 0.04c
KB	6.73 ± 0.02e	1.87 ± 0.03a	0.81 ± 0.05cd	49.97 ± 1.00b	1.70 ± 0.05e

注:表中数据均为“平均值±标准误差”(n=3);同列数据后标有不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。表4至表8同。

由于各个处理中改良剂所含的铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量不同,所以各个处理之间铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量的差异明显。铅锌尾矿砂的铵态氮含量为0.94 mg/kg,混合用土壤的铵态氮含量为1.87 mg/kg,A处理的铵态氮含量比对照提高了57.45%,B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>处理铵态氮含量

有所降低,铅锌尾矿砂与土壤混合后,除C<sub>1</sub>处理外铵态氮含量均有所增加。A处理的速效磷含量增加显著,与对照相比增加了21.53 mg/kg,B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>处理的速效磷含量与对照相比有所降低。A处理速效钾含量增加显著,比对照提高了829.97 mg/kg,其余处理之间差异不显著。铅锌尾矿砂与有

机肥混合能有效提高其有机质的含量,结果表明,A处理的有机质含量比对照增加了1.04倍;其余处理与对照相比也达到了增加的效果,但增加幅度较低;除A处理外,其余各个处理之间差异不明显。

由此可知,铅锌尾矿砂与有机肥混合后,能在一定程度上提高铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量,增强了肥力,改善了植物生长环境,为铅锌尾矿砂的治理奠定了一定的基础。

## 2.2 不同处理对杂交狼尾草生长的影响

表4结果表明,杂交狼尾草无法在铅锌尾矿砂(CK)中存活下来,其余处理均能使杂交狼尾草存活;由于各个处理的肥力和所含重金属含量之间存在差异,导致各个处理中的杂交狼尾草生长情况也各不相同。从杂交狼尾草的叶片数来看,

表4 不同处理对杂交狼尾草生长的影响

处理	叶片数 (张/株)	株高 (cm)	根干质量 (g/株)	地上部干质量 (g/株)	总干质量 (g/株)
CK	—	—	—	—	—
A	12.33 ± 0.62a	96.87 ± 3.26a	1.00 ± 0.08a	11.07 ± 3.06a	12.07 ± 3.14a
B <sub>1</sub>	9.67 ± 0.24b	26.85 ± 0.56d	0.10 ± 0.00e	0.40 ± 0.08b	0.50 ± 0.08b
B <sub>2</sub>	8.17 ± 0.62b	32.27 ± 5.08cd	0.40 ± 0.08c	0.70 ± 0.16b	1.10 ± 0.24b
C <sub>1</sub>	8.17 ± 0.85b	37.40 ± 6.44cd	0.30 ± 0.08cd	0.57 ± 0.12b	0.87 ± 0.17b
C <sub>2</sub>	8.17 ± 0.62b	34.00 ± 2.29cd	0.30 ± 0.00cd	0.60 ± 0.29b	0.90 ± 0.29b
C <sub>3</sub>	10.00 ± 1.22b	54.50 ± 7.23b	0.60 ± 0.08b	2.20 ± 1.00b	2.80 ± 1.08b
KB	8.50 ± 1.08b	41.00 ± 8.65c	0.20 ± 0.00de	0.80 ± 0.24b	1.00 ± 0.24b

总的来说,铅锌尾矿砂与不同改良剂混合后能在一定程度上使杂交狼尾草存活,铅锌尾矿砂与有机肥混合处理的杂交狼尾草生长状况相对较好,A处理的杂交狼尾草叶片数、株高、生物量都显著高于其他处理,可见有机肥改良剂能明显提高土壤中有效氮磷钾的含量,促进杂交狼尾草生长。但汪榕研究发现,腐殖酸改良剂对土壤中有效态氮磷钾的含量影响不明显,能明显提高土壤中交换性钙、镁含量,促进水稻、油菜的生长<sup>[10]</sup>。

## 2.3 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积重金属的影响

2.3.1 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积砷的影响 由表5可知,A处理杂交狼尾草地下部分对砷的累积量最高,达到1.01 mg/kg,与其他处理有显著差异。A处理杂交狼尾草地上部分砷的含量为0.38 mg/kg,各个处理之间差异不明显。B<sub>2</sub>处理杂交狼尾草对砷的转运系数最高,达到0.57,但各个处理之间差异不明显。综上所述,有机肥改良剂能明显促进杂交狼尾草对砷的积累,但土壤、泥炭对杂交狼尾草吸收砷的影响不明显。试验结论与赵明等研究结果一致;但赵明等研究发现,有机肥改良剂能显著降低桑树、皇明草、商陆、甘蔗地上部砷含量<sup>[11-12]</sup>。

2.3.2 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积锌的影响 铅锌尾矿砂与不同改良剂混合对杂交狼尾草吸收和累积锌的影响情况见表6。可以看出,B<sub>2</sub>处理杂交狼尾草地下部分锌含量最高,为1 732.48 mg/kg;B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>处理次之,A、C<sub>2</sub>处理间不存在显著性差异。杂交狼尾草地上部分锌含量和锌转运系数最高的为A处理,分别为716.56 mg/kg、0.48,B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>处理次之;随着泥炭添加量的增大,杂交狼尾草地下部分锌含量呈增加趋势,杂交狼尾草地上部锌含量没有明显变化;杂交狼尾草地下部分锌含量随着土壤添加量的增大而呈降低趋势,但转运

A处理的杂交狼尾草叶片数比其他处理都高,达到12.33张/株,A处理的杂交狼尾草叶片数与其他处理均存在显著差异,但其余处理之间的差异并不显著。A处理的杂交狼尾草平均株高均高于其他处理,达到96.87 cm;C<sub>3</sub>处理次之,达到54.50 cm;B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>处理之间并不存在显著差异。A处理对杂交狼尾草根干质量的影响最为明显,显著高于其他处理,达到1.00 g/株;C<sub>3</sub>处理次之,B<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>处理之间不存在显著差异。A处理的杂交狼尾草地上部分干质量最高,达到11.07 g/株,但其余各个处理之间差异并不明显。A处理的杂交狼尾草总干质量最高,达到12.07 g/株,但是其余各个处理之间差异并不明显。

表5 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积砷的影响

处理	地下部分累积量 (mg/kg)	地上部分累积量 (mg/kg)	转运系数
CK	—	—	—
A	1.01 ± 0.04a	0.38 ± 0.02a	0.37b
B <sub>1</sub>	0.65 ± 0.04bc	0.31 ± 0.02ab	0.47ab
B <sub>2</sub>	0.47 ± 0.02c	0.27 ± 0.02bc	0.57a
C <sub>1</sub>	0.68 ± 0.08b	0.23 ± 0.03c	0.34b
C <sub>2</sub>	0.52 ± 0.06bc	0.24 ± 0.07bc	0.47ab
C <sub>3</sub>	0.48 ± 0.08c	0.23 ± 0.02c	0.47ab
KB	0.28 ± 0.16d	0.00 ± 0.00d	0.00c

表6 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积锌的影响

处理	地下部分累积量 (mg/kg)	地上部分累积量 (mg/kg)	转运系数
CK	—	—	—
A	1 493.37 ± 17.07c	716.56 ± 16.99a	0.48a
B <sub>1</sub>	1 660.37 ± 19.44b	643.23 ± 7.02b	0.39b
B <sub>2</sub>	1 732.48 ± 29.58a	636.83 ± 23.50b	0.37b
C <sub>1</sub>	1 658.50 ± 24.08b	352.04 ± 26.87c	0.21d
C <sub>2</sub>	1 462.18 ± 7.51c	165.10 ± 9.79d	0.11e
C <sub>3</sub>	541.60 ± 14.88d	141.72 ± 11.19d	0.26c
KB	85.13 ± 14.20e	30.64 ± 4.35e	0.36b

系数随土壤添加量的增大而在部分处理间呈增大趋势。有机肥改良剂能明显提高杂交狼尾草对砷的吸收,并且促进砷从地下部向地上部转运。

2.3.3 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积铅的影响 由表7可见,各个处理的杂交狼尾草对铅的转运系数普遍很低,说明杂交狼尾草地下部分铅含量远远高于其地上部分,铅主要

富集于杂交狼尾草根部分;随着泥炭用量的增加,杂交狼尾草各部分对铅的吸收量也随之下降,转运系数降低;土壤添加量则与杂交狼尾草地下部分铅含量成反比,但对杂交狼尾草地上部分铅含量、转运系数没有影响。与其他处理相比,在有机肥改良剂处理下的杂交狼尾草地上部、地下部铅含量有显著差异。段德超等也研究发现,铅主要积累于非超富集植物的地下部<sup>[13]</sup>。

表7 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积铅的影响

处理	地下部分累积量 (mg/kg)	地上部分累积量 (mg/kg)	转运系数
CK	—	—	—
A	50.92 ± 3.02c	1.39 ± 0.21c	0.027b
B <sub>1</sub>	66.17 ± 0.47ab	3.59 ± 0.10a	0.054a
B <sub>2</sub>	64.25 ± 6.44ab	1.73 ± 0.04b	0.027b
C <sub>1</sub>	67.57 ± 1.78a	0.59 ± 0.11d	0.009c
C <sub>2</sub>	60.37 ± 0.52b	0.70 ± 0.13d	0.012c
C <sub>3</sub>	31.13 ± 1.37d	0.48 ± 0.02d	0.016c
KB	0.60 ± 0.11e	0.00 ± 0.00e	0.000d

2.3.4 不同处理对杂交狼尾草吸收、累积铜的影响 由表8可见,C<sub>2</sub>处理杂交狼尾草地下部分铜含量最高,达36.58 mg/kg;B<sub>1</sub>处理杂交狼尾草地上部分铜含量和铜转运系数最高,分别达到9.83 mg/kg、0.52。泥炭添加量与杂交狼尾草地下部分铜累积量成正比关系,与杂交狼尾草地上部分铜累积量、转运系数成反比。但刘庆研究发现,泥炭改良剂对铅锌废矿渣培养下的黄连木、构树对铜的富集没有明显影响<sup>[14]</sup>。杂交狼尾草地下部分铜累积量与土壤添加量的关系表现为先增加后降低,地上部分铜累积量、转运系数与土壤添加量的关系不明显。

表8 不同处理对杂交狼尾草吸收和累积铜的影响

处理	地下部分累积量 (mg/kg)	地上部分累积量 (mg/kg)	转运系数
CK	—	—	—
A	18.70 ± 0.98c	7.22 ± 0.10bc	0.39b
B <sub>1</sub>	18.78 ± 0.88c	9.83 ± 0.28a	0.52a
B <sub>2</sub>	29.65 ± 1.81b	8.00 ± 0.59b	0.27c
C <sub>1</sub>	31.27 ± 0.88b	6.47 ± 0.15cd	0.21c
C <sub>2</sub>	36.58 ± 1.94a	7.53 ± 1.02bc	0.21c
C <sub>3</sub>	20.32 ± 1.74c	5.37 ± 0.27d	0.26c
KB	14.10 ± 1.39d	6.34 ± 0.95cd	0.45ab

### 3 讨论与结论

试验共设置8个处理,除CK处理外,杂交狼尾草均能在其余处理中存活。试验结果显示,供试铅锌尾矿砂中除铜外,砷、锌、铅的含量较高,分别是GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级土壤标准规定值的8.51、37.78、4.32倍,对周边环境具有极强的生态风险。

不同改良剂与铅锌尾矿砂混合后,铅锌尾矿砂的pH值,铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量都受到影响。各个处理的pH值范围在6.59~7.21之间,变化不大,均属于中性。其中有机肥与铅锌尾矿砂混合(A处理)后的铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量均有所增加,且差异显著,分别比对照

上升了0.54 mg/kg、21.53 mg/kg、829.97 mg/kg、3.27百分点,为杂交狼尾草生长提供了有利条件,也为开展铅锌尾矿砂的治理奠定了基础。

除对照处理外,其余处理均能使杂交狼尾草生长,其中A处理的杂交狼尾草长势最佳。A处理的杂交狼尾草叶片数、株高、生物量均明显高于其他处理,其余处理之间杂交狼尾草生长状况差异不大。

泥炭、土壤的添加量对杂交狼尾草吸收和累积砷的能力影响差异不大,有机肥的添加能明显提高杂交狼尾草富集砷的能力。杂交狼尾草地下部分砷含量随泥炭添加量的增大呈增加趋势;土壤改良剂的添加促进砷在杂交狼尾草体内的转运;随着土壤添加量的增大,杂交狼尾草地下部分砷含量呈降低趋势。随着泥炭用量的增加,杂交狼尾草各部分对铅的吸收也随之下降,转运系数降低;土壤添加量则与杂交狼尾草地下部分铅含量成反比关系,但对杂交狼尾草地上部分铅含量、转运系数没有影响。泥炭添加量与杂交狼尾草地下部分铜累积量成正比关系,与杂交狼尾草地上部分铜累积量、转运系数成反比;杂交狼尾草地下部分铜累积量与土壤添加量的关系表现为随着土壤添加量的增加先增加后降低。

### 参考文献:

- [1]王新,周启星. 土壤重金属污染生态过程、效应及修复[J]. 生态科学,2004,23(3):278-281.
- [2]夏汉平,蔡锡安. 采矿地的生态恢复技术[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1471-1477.
- [3]王亚平,鲍征宇,王苏明. 矿山固体废物的环境效应研究进展及大冶铜绿山尾矿的环境效应[J]. 矿物岩石地球化学通报,1998(2):30-34.
- [4]鲍负,常前发. 尾矿利用是实现矿业可持续发展的重要途径[J]. 矿业快报,2000(7):3-5.
- [5]陈宏,陈玉成,杨学春. 石灰对土壤中Hg Cd Pb的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):549-552.
- [6]陈晓婷,王果,张亭旗,等. 石灰与泥炭配施对重金属污染土壤上小白菜生长和营养元素吸收的影响[J]. 农业环境保护,2002,21(5):453-455.
- [7]华璐,陈世宝,白玲玉,等. 有机肥对镉污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护,1998,17(2):55-59,62.
- [8]张亚丽,沈其荣,谢学俭,等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1997-2000.
- [9]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005:146-226.
- [10]汪榕. 酸性土壤改良剂在水稻—油菜轮作上的应用效果[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [11]赵明,蔡葵,孙永红,等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(6):1072-1078.
- [12]梅娟. 铅锌尾矿砂污染农田的修复治理与利用研究[D]. 太原:山西大学,2013.
- [13]段德超,于明革,施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(1):287-296.
- [14]刘庆. 抗铅锌植物筛选与铅锌污染土壤生态治理方法研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2012.