

雷小文,邱静芸,李建军,等. 蚯蚓粪及沼液处理对赣南稀土尾矿种植皇竹草及改良土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(11):191-196.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.11.033

# 蚯蚓粪及沼液处理对赣南稀土尾矿种植皇竹草及改良土壤的影响

雷小文<sup>1</sup>,邱静芸<sup>1</sup>,李建军<sup>1</sup>,陈荣强<sup>1</sup>,郭礼荣<sup>1</sup>,李建明<sup>2</sup>,欧阳克蕙<sup>3</sup>

(1. 赣州市畜牧研究所,江西赣州 341401; 2. 定南县鼎瑞肉牛养殖专业合作社,江西赣州 341909;

3. 江西农业大学动物科技学院,江西南昌 330045)

**摘要:**为探索利用不同来源蚯蚓粪及沼液构建的生态修复模式对稀土尾矿种植皇竹草及改良土壤效果的影响,采用田间随机区组试验设计,研究了在赣南稀土尾矿区采用复合肥+自来水(对照组)、牛粪养殖的蚯蚓粪+牛场沼液(试验Ⅰ组)、猪粪养殖的蚯蚓粪+猪场沼液(试验Ⅱ组)3种模式种植皇竹草后,稀土尾矿地土壤化学性质、重金属含量的变化,以及皇竹草定植生长及品质的差异。结果表明,Ⅰ组、Ⅱ组的土壤pH值和有机质含量高于对照组,部分差异达极显著水平,且Ⅰ组有机质含量较Ⅱ组极显著增加;Ⅰ组和Ⅱ组的有效磷含量显著或极显著高于对照组,且Ⅰ组明显高于Ⅱ组;Ⅰ组、Ⅱ组的速效钾含量均显著高于对照组。Ⅰ组、Ⅱ组的皇竹草存活率和鲜草产量均极显著高于对照组,且Ⅰ组极显著高于Ⅱ组;Ⅰ组、Ⅱ组的粗蛋白含量均比对照组显著提高,Ⅰ组的钙、磷含量显著高于对照组和Ⅱ组。Ⅰ组、Ⅱ组的土壤砷、铅含量均极显著低于对照组,皇竹草砷含量均显著低于对照组。可以看出,在稀土尾矿废弃地施用蚯蚓粪和灌溉沼液种植皇竹草,不仅可以提高皇竹草生长性能,还能同时改良稀土尾矿土壤,且牛粪源蚯蚓粪+牛沼液模式改良效果优于猪粪源蚯蚓粪+猪沼液。

**关键词:**皇竹草;稀土尾矿;土壤改良;蚯蚓粪;沼液;牛粪;猪粪

**中图分类号:** S156;X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)11-0191-06

离子型稀土矿是我国重要的战略资源,为世界工业发展发挥了重要作用并产生了巨大的经济效益。但由于历史原因,稀土开采过度遗留了大量稀土尾矿矿点,自然条件下,受雨水等侵蚀作用,加上前期化学浸提处理所用浸提液的强酸及重金属污

染残留,导致矿区水土流失,土壤有机质缺失并呈酸化、沙化<sup>[1-3]</sup>,不仅严重破坏生态环境,荒废土地资源,还占据着广阔的土地。随着我国南方地区草地畜牧业的逐步兴起,优质牧草资源缺乏,可利用土地面积不足,南方地区稀土尾矿治理并有效利用的问题迫切需要解决。

生态修复是稀土尾矿治理最根本的措施,也是实现稀土尾矿区域经济价值的主要途径。土壤作为植物生长的基质与植被的载体,对其进行改良是首要解决的问题。研究表明,功能性土壤修复剂的施用可明显改善稀土尾矿地区土壤理化特性<sup>[4]</sup>,如粪污养殖蚯蚓所得蚯蚓粪。利用蚯蚓粪改良土壤,

收稿日期:2020-09-07

基金项目:江西省现代牛羊产业技术体系项目(编号:JXARS-13)。

作者简介:雷小文(1983—),男,江西赣州人,硕士,高级畜牧兽医师,主要从事畜禽废弃物资源化利用及牧草开发研究。E-mail: 343224896@qq.com。

通信作者:欧阳克蕙,博士,教授,主要从事反刍动物营养研究。E-mail:ouyangkehui@sina.com。

[18] 史燕山,骆建霞,黄家珍,等. 盐胁迫对7种草本地被植物种子萌发的影响[J]. 天津农学院学报,2007,14(4):1-4.

[19] 田晓艳,刘延吉,张蕾,等. 盐胁迫对景天三七保护酶系统、MDA、Pro及可溶性糖的影响[J]. 草原与草坪,2009(6):11-14.

[20] 肖强,郑海雷,陈瑶,等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(4):373-376.

[21] 李旭东,张春平,傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节

动态及其影响因素[J]. 草业学报,2012,21(4):307-312.

[22] 郭慧娟,胡涛,傅金民,等. 苏打碱胁迫对多年生黑麦草的生理影响[J]. 草业学报,2012,21(1):118-125.

[23] 孟林,尚春艳,毛培春,等. 偃麦草属植物种质材料苗期耐盐性综合评价[J]. 草业学报,2009,18(4):67-74.

[24] 徐炳成,山仑,黄瑾,等. 柳枝稷和白羊草苗期水分利用与根冠比的比较[J]. 草业学报,2003,12(4):73-77.

[25] 刘延吉,张珊珊,田晓艳,等. 盐胁迫对NHC牧草叶片保护酶系统、MDA含量及膜透性的影响[J]. 草原与草坪,2008(2):30-34.

不仅可实现粪污资源化利用,其富含的大量有机质、腐殖酸、蚓激酶等成分还可作为提高稀土尾矿土壤肥力的关键来源,加速土壤改良进程<sup>[5-8]</sup>。

种植牧草也是土壤修复的措施之一,郭晓敏等研究发现,在稀土尾矿区种植牧草可提高土壤生物量,营造林下小生境,改善土壤酸性,提高土壤有机质含量<sup>[9]</sup>。皇竹草(*Pennisetum hybridum*)作为适口性好、粗蛋白含量较高的优质高产牧草品种,具有适应性广、抗逆性强、根系发达等优良特性,能够防止水土流失,牢固保留土壤养分<sup>[10-12]</sup>,在稀土尾矿种植不仅能发挥其对尾砂矿植被恢复和生态重建的作用,还能为南方肉牛生产提供牧草资源。而目前国内外关于探究利用蚯蚓粪和皇竹草共同改良稀土尾矿土壤的修复模式罕有报道。

因此,针对我国南方稀土尾矿亟待有效治理与生态修复的现状,以及当前我国南方丘陵山区大力发展草食畜的环境,本试验旨在稀土尾矿地区利用牛、猪粪处理产生的蚯蚓粪和沼液种植皇竹草,探索构建基于赣南稀土尾矿区域的“养殖废弃物—蚯蚓—牧草—肉牛”生态循环模式,为解决稀土尾矿的生态修复问题、合理利用畜牧产业废弃物和草食

畜优质牧草供给提供新参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验场地位于江西省赣州市定南县某稀土矿废弃尾矿场(24.79°N,115.03°E),该地属中亚热带季风湿润气候区,境内气候温和,多年最高气温 38℃,年平均气温 19℃,冬季河流无冰冻现象,无霜期 293 d,多年平均日照时数为 1 777.1 h,太阳总辐射量 4 543.9 MJ/m<sup>2</sup>。试验稀土尾矿面积 300 m<sup>2</sup>,土地贫瘠,为典型亚热带稀土废矿区。

1.2 试验材料

皇竹草种茎由沭阳树元园艺有限公司提供;蚯蚓粪由赣州东山嘉禾现代农业有限公司提供,分别为牛粪养殖蚯蚓粪和猪粪养殖蚯蚓粪;猪沼液由赣州锐源生物科技有限公司提供;牛沼液由定南鼎瑞肉牛养殖专业合作社提供;复合肥为湖北诺维尔化肥有限公司提供。对照组灌溉用水为民用自来水。各肥料、沼液 pH 值及养分含量详见表 1,重金属含量详见表 2。

表 1 蚯蚓粪、沼液、复合肥和自来水 pH 值及主要化学成分

肥料	pH 值	水分含量 (%)	有机质含量 (以干基计)(%)	总氮含量 (以干基计)(%)	总磷含量(以干基计, 以 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 计)(%)	总钾含量(以干基计, 以 K <sub>2</sub> O 计)(%)
蚯蚓粪(牛粪养殖)	7.39	49.96	41.1	1.83	3.2	2.23
蚯蚓粪(猪粪养殖)	8.06	62.99	47.1	1.63	3.4	2
牛沼液	7.22		0.76	0.65	0.096	0.076
猪沼液	7.02		1.21	0.88	0.15	0.19
复合肥	7.06			13	7.13	6.54
自来水	7.83			4.6×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-6</sup>	1.8×10 <sup>-5</sup>

表 2 蚯蚓粪、沼液、复合肥和自来水重金属成分及含量

肥料	砷含量 (mg/kg)	铜含量 (mg/kg)	镉含量 (mg/kg)	铅含量 (mg/kg)
蚯蚓粪(牛粪养殖)	0.46	88.87	1.09	0.13
蚯蚓粪(猪粪养殖)	0.47	95.33	1.13	0.35
牛沼液	0.002	0.14	0.000 6	0.024
猪沼液	0.33	0.06	0.000 2	0.011
复合肥	0.14	0.11	0.3	0.16
自来水	0.000 05	0.000 44	0.000 5	0.000 09

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 采用田间随机区组试验设计。试验分为 3 组,每组 6 个小区(8 m×5.5 m)。对照组施 0.42 kg/m<sup>2</sup> N-P-K 三元复合肥(氮含量

13%,磷含量大于 7%,钾含量大于 6%),自来水浇灌;试验 I 组,以牛粪为原料养殖蚯蚓后的衍生物蚯蚓粪作为基肥(20 kg/m<sup>2</sup>),并用牛场污水产沼气后的沼液浇灌;试验 II 组,以猪粪为原料养殖蚯蚓后的衍生物蚯蚓粪作为基肥(20 kg/m<sup>2</sup>),并用猪场污水产沼气后的沼液浇灌。

1.3.2 试验方法 2019 年 3 月上旬,在试验小区内挖沟 35 cm 后用蚯蚓粪(对照组用原土)填充至 30 cm 后,按照株距 40 cm、行距 50 cm 插种皇竹草种苗,然后用尾矿土壤覆盖至与地面相平;种草和每次刈割后,试验组 I 组和 II 组分别用沼液灌溉,对照组用自来水灌溉并追施三元复合肥,浇透土壤为止。

## 1.4 样品采集与测定试验方法

1.4.1 皇竹草生长情况测定 5 月底牧草植株株高为 80~100 cm 时开始刈割测定,以后每 40 d 刈割 1 次,至 11 月中旬结束,留茬高度 5~10 cm。

1.4.2 稀土尾矿土壤 pH 值、主要化学成分、重金属含量测定 种草前以及第 5 次刈割后(2019 年 11 月中旬),蛇形采样法采集土壤样品,取样深度 0~20 cm。土样按四分法混合均匀后取 1 kg 带回实验室,风干后将每 2 个小区的样品混合,每组共制备 3 个重复样。土壤样品送到江西省分析测试中心进行相关指标的检测:pH 值(NY/T 1121.2—2006《土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定》)、有机质含量(NY/T 1121.6—2006《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定》)、全氮含量(NY/T 53—1987《土壤全氮测定法(半微量开氏法)》)、全磷含量(LY/T 1232—2015《森林土壤磷的测定》)、有效磷含量(LY/T 1232—2015《森林土壤磷的测定》)、速效钾含量(LY/T 1234—2015《森林土壤钾的测定》)、砷含量(GB/T 22105.2—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》)、铜含量(GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》)、锌含量(GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》)、镉含量(GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》)、铅含量(GB/T 22105.3—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 3 部分:土壤中总铅的测定》)。

1.4.3 皇竹草主要成分、重金属指标测定 在第 5 次刈割后,采集皇竹草地上部新鲜茎叶,制备成风干样后,将每 2 个小区的样品混合,每组共制备 3 个重复样,分别测定其营养成分和重金属含量:粗蛋白质含量采用凯氏定氮法测定,粗纤维含量采用酸碱洗涤法测定,粗灰分含量采用灼烧法测定,粗脂肪含量采用索氏脂肪浸提法(GB/T 6433—2006《饲料中粗脂肪的测定》)测定,钙含量采用 EDTA 滴定法(GB/T 13885—2017《饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法》)测定,磷含量采用钼黄比色法(GB/T 6437—2018《饲料中总磷的测定 分光光度法》)测定,砷含量按照 GB/T 13079—2006《饲料中总砷的测定》测定,铅含量按照 GB/T 22105.3—2008《土壤质量 总汞、总

砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总铅的测定》测定,镉含量按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》测定,铜含量按照 GB/T 13885—2017《饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法》测定,锌含量按照 GB/T 13885—2017《饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法》测定。

## 1.5 数据处理

数据采用 Excel 初步整理,用 SPSS 20.0 软件 One-way ANOVA 过程进行方差分析,LSI 法进行多重比较。结果以“平均值±标准误”的形式表示, $P<0.05$  表示差异显著, $P<0.01$  表示差异极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 稀土尾矿土壤改良效果相关指标测定结果

2.1.1 稀土尾矿土壤化学性质变化情况 由表 3 可知,与种草前相比,对照组土壤全氮含量显著提升 100.00% ( $P<0.05$ ),pH 值、有机质含量、全磷含量、速效钾含量差异不显著。I 组土壤 pH 值较对照组极显著提高 28.87% ( $P<0.01$ ),较 II 组土壤 pH 值极显著提高 22.82%; I 组和 II 组土壤有机质含量分别比对照组极显著增加 26.32 倍、6.15 倍, I 组较 II 组极显著增加 2.82 倍; I 组土壤全氮、全磷、有效磷、速效钾的含量分别比对照组显著或极显著提升 25.50 倍、15.08 倍、20.00 倍、3.65 倍; II 组土壤有效磷、速效钾含量比对照组分别显著提升 8.00 倍、2.49 倍, I 组的全氮、全磷、有效磷含量较 II 组增加 2.79 倍、2.33 倍、1.33 倍。

2.1.2 稀土尾矿土壤重金属含量变化情况 由表 4 可知,与种草前相比,对照组镉含量极显著降低 47.37%,砷、铅含量差异不显著。I 组砷、铅含量分别比对照组极显著降低 69.80%、41.64%,镉含量极显著增加 80.00%; II 组砷、铅含量相比对照组分别极显著降低 81.18%、30.30%。各组铜含量差异不显著。

### 2.2 皇竹草在稀土尾矿存活率及生长情况

2.2.1 皇竹草的存活率及产量 由表 5 可知, I 组、II 组皇竹草存活率分别是对照组的 2.30、2.22 倍,差异达极显著水平,且 I 组皇竹草存活率极显著高于 II 组; I 组、II 组皇竹草总鲜草产量分别较对照组极显著提高 79.84%、72.41%,且 I 组极显著高于 II 组。

表 3 稀土尾矿废弃地土壤化学性质变化

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (%)	全磷含量 (g/kg)	有效磷含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
种草前	4.19 ± 0.09A	3.35 ± 0.28A	0.01 ± 0.02Aa	0.10 ± 0.01A	0.01 ± 0.00Aa	31.21 ± 0.57a
对照组	4.26 ± 0.11A	3.39 ± 0.20A	0.02 ± 0.01Ab	0.12 ± 0.01A	0.01 ± 0.00Aa	39.34 ± 0.71a
I 组	5.49 ± 0.09B	92.63 ± 10.02C	0.53 ± 0.05Cd	1.93 ± 0.18B	0.21 ± 0.03Bb	182.82 ± 30.44b
II 组	4.47 ± 0.04A	24.23 ± 6.66B	0.14 ± 0.04Bc	0.58 ± 0.18A	0.09 ± 0.04ABc	137.25 ± 36.90b

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ )。下表同。

表 4 稀土尾矿废弃地土壤重金属成分变化

处理	砷含量 (mg/kg)	铜含量 (mg/kg)	镉含量 (mg/kg)	铅含量 (mg/kg)
种草前	29.64 ± 0.98A	41.40 ± 1.98A	0.19 ± 0.03B	78.12 ± 1.53A
对照组	27.58 ± 1.73A	39.13 ± 2.46A	0.10 ± 0.02A	76.37 ± 2.61A
I 组	8.33 ± 0.15B	24.50 ± 1.76B	0.18 ± 0.00B	44.57 ± 0.57C
II 组	5.19 ± 0.33B	37.30 ± 9.04A	0.07 ± 0.02A	53.23 ± 1.37B

表 5 皇竹草存活率及产量

处理	存活率 (%)	总鲜草产量 (t/hm <sup>2</sup> )
对照组	40.94 ± 0.81A	83.78 ± 1.20A
I 组	94.01 ± 0.40C	150.67 ± 1.70C
II 组	90.92 ± 0.16B	144.45 ± 1.57B

2.2.2 皇竹草主要营养成分及重金属含量 由表 6 可知,与对照组相比,试验 I 组和 II 组皇竹草粗蛋白含量分别显著增加 9.67% 和 12.31%; I 组皇竹草的粗蛋白、粗脂肪含量略低于 II 组,粗纤维、粗灰分高于 II 组,但差异均不显著; I 组皇竹草的钙、磷含量分别比 II 组显著提高 0.85 倍、1.00 倍,表明施用牛粪处理产物能够提高皇竹草的钙、磷含量。

表 6 皇竹草主要营养成分及含量

处理	粗蛋白含量 (%)	粗纤维含量 (%)	粗灰分含量 (%)	粗脂肪含量 (%)	钙含量 (%)	磷含量 (%)
对照组	7.55 ± 0.60a	33.35 ± 1.07	10.43 ± 0.44	3.16 ± 0.034	0.19 ± 0.021a	0.10 ± 0.007a
I 组	8.28 ± 0.51b	35.30 ± 1.14	8.22 ± 0.35	1.40 ± 0.098	0.24 ± 0.054b	0.22 ± 0.009b
II 组	8.48 ± 0.48b	33.80 ± 1.85	7.16 ± 0.25	1.50 ± 0.023	0.13 ± 0.042a	0.11 ± 0.007a

由表 7 可知,与对照组相比,试验组重金属含量有所降低(铜含量除外),其中试验 I 组和 II 组的砷含量较对照组分别显著降低 14.89%、70.21%。

表 7 皇竹草重金属含量

处理	砷含量 (mg/kg)	铜含量 (mg/kg)	镉含量 (mg/kg)	铅含量 (mg/kg)
对照组	0.47 ± 0.054a	4.32 ± 0.44	0.085 ± 0.006	0.55 ± 0.030
I 组	0.40 ± 0.016b	4.41 ± 0.09	0.069 ± 0.002	0.52 ± 0.019
II 组	0.14 ± 0.008c	4.59 ± 0.12	0.043 ± 0.002	0.51 ± 0.021

3 讨论与结论

3.1 稀土尾矿土壤理化性质变化

稀土尾矿地表裸露,土壤酸化且肥力下降,修

复形势严峻。土壤作为植物群落环境的主要因子,是稀土尾矿区植被恢复和生态重建的关键之一<sup>[13-14]</sup>。本试验为了探索“粪污—蚯蚓—牧草—肉牛”的生态修复模式,选择在酸胁迫、干旱胁迫及重金属胁迫下正常生长的皇竹草作为生态修复的牧草<sup>[15-17]</sup>,种植结果显示,本试验种草后较种草前土壤 pH 值和有机质含量增加,但差异不显著;试验 I 组和 II 组土壤有机质含量比对照组增加 26.32 倍、6.15 倍,pH 值提升 1.29 倍、1.05 倍,全氮、全磷、有效磷、速效钾均显著或极显著增加。原因可能是 I 组和 II 组施用蚯蚓粪<sup>[18]</sup>和沼液<sup>[19]</sup>能够增加土壤肥力,改变微生物群落结构<sup>[20]</sup>,并通过微生物代谢和皇竹草发达的根系将这些固定在土壤中<sup>[21]</sup>,

为在稀土尾矿区域利用牛、猪粪污构建的“粪污—蚯蚓—牧草—肉牛”模式修复稀土尾矿土壤提供理论支撑。

本研究 I 组土壤有机质、全氮、全磷含量均极显著高于 II 组,有效磷含量显著高于 II 组,而沼液有机质、总氮、总磷、总钾含量均低于 II 组,这可能是由于牛粪养殖蚯蚓周期较猪粪短,导致 I 组蚯蚓粪中微生物和酶活性高于 II 组,也可能是 I 组土壤环境较 II 组更接近中性,有利于微生物及酶活转化土壤中的养分。基于本试验牛粪模式改良土壤效果优于猪粪模式,同时牛粪可直接由肉牛场提供,形成资源循环利用,“牛粪—蚯蚓—皇竹草—肉牛”的模式优势明显。

### 3.2 稀土尾矿种植皇竹草生长情况及品质

皇竹草属多年生禾本科草本植物,其根系发达,成簇生长,适应土壤类型广泛,从沙质到黏质,从酸性到碱性均可栽培<sup>[22]</sup>。本研究在稀土尾矿种植皇竹草发现,对照组皇竹草存活率为 40.94%,试验 I 组和 II 组皇竹草存活率分别提高 1.30 倍、1.22 倍,总鲜草产量分别较对照组提高 79.84%、72.41%,表明“粪污—蚯蚓—皇竹草”种植模式具有可行性。这可能得益于蚯蚓粪和沼液丰富营养成分提高了土壤养分和微生物、酶等活性物质,同时质地松软的蚯蚓粪能够增加土壤通透性<sup>[19,23]</sup>,促进了皇竹草对土壤中养分的充分吸收和利用<sup>[24]</sup>,保证了皇竹草生长,进而又促进土壤肥力保持,形成良性土壤修复循环模式

粗蛋白是家畜必不可少的营养物质,是牧草营养价值的关键指标之一。本试验 I 组与 II 组皇竹草粗蛋白含量均值分别为 8.28%、8.48%,显著高于对照组,表明施用蚯蚓粪和沼液能够有效提高皇竹草营养价值。与种植在非稀土尾矿地区的研究结果相比:本研究试验组皇竹草粗蛋白含量高于李春雷的测定值(5.67%)<sup>[25]</sup>和李茂等的测定值(6.85%)<sup>[26]</sup>,这表明在稀土尾矿种植的皇竹草品质未受较大影响。本研究中, I 组种植皇竹草钙、磷含量显著高于对照组和 II 组,钙含量分别是对照组和 II 组的 1.26 倍和 1.85 倍,磷含量分别是对照组和 II 组的 2.2 倍和 2 倍,这可能是由于土壤中钙、磷含量不同所致<sup>[27]</sup>。这表明,“牛粪—蚯蚓—皇竹草—肉牛”的种养结合模式较“猪粪—蚯蚓—皇竹草—肉牛”的种养结合模式下皇竹草饲用价值更高,具体饲喂效果有待进一步试验探究。

### 3.3 稀土尾矿土壤和皇竹草重金属含量

研究表明,土壤重金属镉(10 mg/kg)对植物高度和地上生物量具有明显的抑制作用<sup>[28-29]</sup>。稀土尾矿重金属含量在不同程度上超过国家背景值,植物生长受限,制约生态修复进程<sup>[30]</sup>,其重金属治理问题不容忽视。皇竹草地上生物量大,具有良好的土壤重金属提取潜力,王熙娜等以重金属锌、铜、铅和镉污染的鸡粪和污泥为肥料处理皇竹草发现,皇竹草生长状况良好且土壤重金属提取率高达 17.14%<sup>[31]</sup>。林晓燕等研究指出,在新鲜污泥上种植皇竹草后,污泥重金属含量降低,皇竹草重金属含量均符合国家饲料卫生标准<sup>[32]</sup>。蚯蚓粪也具有良好土壤重金属修复潜力,富含腐殖酸、微生物,能够有效吸附重金属,降低重金属生物活性,降低土壤中重金属离子的淋溶迁移性<sup>[24]</sup>。本研究中,试验组皇竹草长势良好,这可能是蚯蚓粪降低了土壤重金属活性,同时为皇竹草生长提供了足够肥力。本试验土壤重金属含量均符合国家农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》),砷含量 40 mg/kg,铜含量 50 mg/kg,锌含量 200 mg/kg,镉含量 0.3 mg/kg,铅含量 70 mg/kg),且试验组皇竹草的各项重金属指标均符合国家饲料卫生标准[GB 13078—2017,铅含量(饲草、粗饲料及其加工产品)≤30 mg/kg,镉含量(植物性饲料原料)≤1 mg/kg,砷含量(干草及其加工产品)≤4 mg/kg],与前人研究一致。试验 I 组的皇竹草砷含量高于 II 组,这可能是由于 2 组蚯蚓粪微生物成分差异影响了皇竹草对重金属的提取<sup>[31]</sup>,其原理有待更深入的研究。

综上,基于稀土尾矿区域构建的“粪污—蚯蚓—皇竹草—肉牛”生态模式能够保证皇竹草正常生长,降低土壤重金属含量,同时,皇竹草重金属含量符合国家标准。

本试验中,种植皇竹草模式对稀土尾矿废弃地土壤的生态恢复有较好的作用,都能够显著改善土壤酸化状况,提高土壤养分含量,降低土壤重金属含量。与复合肥相比,蚯蚓粪+沼液的有机肥模式更有利于促进皇竹草的定植生长和改良土壤,且牛粪源蚯蚓粪+牛沼液模式改良效果优于猪粪源蚯蚓粪+猪沼液;这表明在稀土尾矿上构建“牛粪污—蚯蚓—皇竹草—肉牛”的生态循环模式具有可行性。

## 参考文献:

- [1] 彭 燕,何国金,张兆明,等. 赣南稀土矿开发区生态环境遥感动态监测与评估[J]. 生态学报,2016,36(6):1676–1685.
- [2] 周彩云,程晓迪,张 崧,等. 龙南县离子型稀土矿区复垦土壤的质量研究[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会第十九次会议暨“农田土壤污染与修复研讨会”第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集. 济南:中国土壤学会土壤环境专业委员会,2017:152.
- [3] Si W T, He X Y, Li A L, et al. Application of an integrated biomarker response index to assess ground water contamination in the vicinity of a rare earth mine tailings site[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(17):17345–17356.
- [4] 尹 芳,刘士清,杨智明,等. 畜禽粪污综合利用对土壤肥力和持续农业的影响分析[J]. 中国沼气,2019,37(3):75–79.
- [5] Li H, Liu Y, Lu H W, et al. On the effects influencing the growth of the two rice varieties due to Cd contaminated soil passivation in Hunan[J]. Journal of Safety & Environment, 2016, 16(6):298–302.
- [6] 单 颖,赵凤亮,林 艳,等. 蚯蚓粪对土壤环境质量和作物生长影响的研究现状与展望[J]. 热带农业科学,2017,37(6):14–20.
- [7] 徐仲楠,王 冲,朱 遑,等. 蚯蚓粪与土壤复配比例对基质微生物性状及韭菜生长和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3):173–178.
- [8] 钟云平,雷小文,李建军,等. 利用蚯蚓粪种植桂牧 1 号象草对稀土尾矿土壤的改良作用[J]. 江西科学,2016,34,154(2):37–40.
- [9] 郭晓敏,周桂香,张文元,等. 赣南桉树种植对稀土矿植被恢复的效果研究[C]//2015 海峡两岸水土保持学术研讨会论文集(下). 中国水土保持学会,台湾中华水土保持学会,2015:52–56.
- [10] 陈钟佃. 杂交狼尾草青贮饲喂肉猪效果研究[J]. 草业学报, 2015, 24(5):134–140.
- [11] 杨仁德. 贵州“皇竹草–石漠化治理–食用菌”生态农业发展模式初探[J]. 南方农业,2016,10(25):39–42.
- [12] Feng C, Zhang S, Li L, et al. Feasibility of four wastes to remove heavy metals from contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 212(15):258–265.
- [13] 陈海滨,陈志彪,陈志强,等. 不同治理年限的离子型稀土矿区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2017,37(1):258–266.
- [14] Chen X, Liu Y Z, Li J Q, et al. Response of a rare earth tailing soil bacterial community structure to vegetation restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 13(36):3943–3950.
- [15] 谢 华,余孟好,廖晓勇,等. 利用皇竹草修复酸化和重金属铅复合污染土壤的方法:CN103406349A[P]. 2013–11–27.
- [16] 谢 华,吴 昊,廖晓勇,等. 利用皇竹草修复酸化和重金属镉复合污染土壤的方法:CN103406350A[P]. 2013–11–27.
- [17] 莫熙礼,赵同贵,武华文,等. 喀斯特石漠化地区 4 种牧草抗旱性评价[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):290–292.
- [18] 杭 琼,胡 伟,时佩佩,等. 利用蚯蚓粪改良果园底层土壤的效果[J]. 江苏农业科学,2015,43(8):351–353.
- [19] Zi C W, Yong H L, Jing S, et al. Analysis of water environment risk on biogas slurry disposal in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5):213–220.
- [20] Ma C J, Jia C S, Li H S. Influence of *Pennisetum hybridum* plantation on the edaphon in different site conditions[C]//2014 2nd International Conference on Social Science and Health (ICSSH 2014). Information Engineering Research Institute, 2014:222–226.
- [21] 陈 熙,刘以珍,李金前,等. 稀土尾矿土壤细菌群落结构对植被修复的响应[J]. 生态学报,2016,36(13):3943–3950.
- [22] Hakan Geren Y T K. Effect of different plant densities on the yield and some silage quality characteristics of giant king grass (*Pennisetum hybridum*) under mediterranean climatic conditions[J]. Turkish Journal of Field Crops, 2015, 20(1):85–91.
- [23] 范蓓蓓. 浓缩沼液的配方有机液肥开发研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [24] 陈小锦. 基于蚯蚓消解牛粪后的蚯蚓粪改良红壤的效果研究[D]. 扬州:扬州大学,2016.
- [25] 李春雷. 奶牛常用粗饲料营养价值评定[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [26] 李 茂,字学娟,侯冠彧,等. 体外产气法评价 5 种热带禾本科牧草营养价值[J]. 草地学报,2013,21(5):1028–1032.
- [27] Newman Y C, Adesogan A T, Vendramini J, et al. Defining forage quality[J]. Agronomy, 2014, SS–AGR–322:1–5.
- [28] 易自成,贺俊波,程 华,等. 镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(2):276–282.
- [29] 周 振,张 彪,杨海涛,等. 曼陀罗对土壤镉污染的响应及镉累积特征[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):269–272.
- [30] 代 静,司万童,赵雪波,等. 稀土尾矿库复合污染对周边土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(20):299–303.
- [31] 王熙娜,易自成,张瑶芬,等. 皇竹草(*Pennisetum hybridum*)对施用重金属污染的鸡粪和污泥的响应及其污染修复效应[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(5):477–484.
- [32] 林晓燕,王 慧,王 浩,等. 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品[J]. 生态学报,2015,35(12):4234–4240.