

# 保水保肥材料对废弃离子型稀土矿区尾砂土壤理化性质及皇竹草生长的影响

贺燕子<sup>1,2</sup>, 田芷源<sup>1</sup>, 马瑞<sup>1,2</sup>, 朱绪超<sup>1</sup>, 梁音<sup>1</sup>

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室,中国科学院南京土壤研究所,南京 210008;2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:** 针对废弃稀土矿区氨氮减低后的土壤结构性差、肥力低下和种植植物生产力低的问题,土壤改良成为快速提升植被恢复的关键。通过田间试验,比较单施不同浓度保水剂(S1、S2、S3)和保水保肥材料(F1、F2、F3)对土壤理化性质、皇竹草生长以及作物耗水和水分利用效率(WUE)等相关指标影响,并运用主成分分析和模糊隶属度函数方法筛选出最佳改良材料。结果表明:(1)保水保肥材料通过改善废弃稀土矿区尾砂土壤理化性质,促进皇竹草生长,土壤理化性质与植物生长的关系表现为土壤 pH 和养分含量越高,皇竹草分蘖数、氮磷含量、产量和 WUE 等生长指标越高。(2)保水保肥材料与对照相比,使皇竹草增产 58.13%~182.63%,WUE 提升 53.81%~181.54%;单施保水剂效果有限,中高用量保水剂(S2、S3)使皇竹草增产 19.95%~77.52%,WUE 提升 19.54%~79.50%。(3)运用主成分分析法筛选出 22 个土壤改良指标,分别计算各指标模糊隶属度函数值,将平均函数值作为土壤改良效果评价,评价结果为保水保肥材料>单施保水剂(S1 除外)>空白对照。相比对照,单施保水剂(S1 除外)平均函数值仅提升 0.32~0.35 倍,保水保肥材料则提升 0.73~1.72 倍,并随用量增加而降低,因此 F1 为最佳土壤改良剂。研究结果表明复配的保水保肥材料在废弃稀土矿区尾砂土改良中具有良好的应用效果。

**关键词:** 废弃稀土矿区; 保水保肥材料; 土壤改良; 土壤理化性质; 皇竹草; 水分利用效率

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)02-0267-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.031

## Effects of Water and Fertilizer Preserving Materials on the Physical and Chemical Properties of Tailing Soil and the Growth of *Pennisetum sinense* Roxb in Abandoned Ion Rare Earth Mining Area

HE Yanzi<sup>1,2</sup>, TIAN Zhiyuan<sup>1</sup>, MA Rui<sup>1,2</sup>, ZHU Xuchao<sup>1</sup>, LIANG Yin<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** In view of the problems of poor soil structure, low fertility and low plant productivity after ammonia nitrogen reduction in abandoned rare earth mining areas, soil improvement becomes the key to rapidly improve vegetation restoration. Field experiments were carried out to compare the effects of single application of different concentrations superabsorbent polymers (SAPs; S1, S2 and S3) and water and fertilizer preserving materials (WFPMs; F1, F2, F3) on soil physicochemical properties, growth of *Pennisetum sinense* Roxb, evapotranspiration and water use efficiency (WUE). In order to select the best soil amendment, the principal component analysis and fuzzy membership function were employed to comprehensively evaluate the relevant indicators. The results showed that: (1) The WFPMs promoted the growth of *Pennisetum sinense* Roxb by improving the soil physicochemical properties of the tailings soil in the abandoned rare earth mining area. The relationship between soil physicochemical properties and plant growth showed that the higher the soil pH and nutrient content, the higher the growth indicators such as tiller number, nitrogen and phosphorus content, yield and WUE. (2) Compared with the control, the WFPMs increased the plant yield and WUE by 58.13%~182.63% and 53.81%~181.54%, respectively; The effect of SAPs was limited, and its medium and high

收稿日期:2022-08-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1805104)

第一作者:贺燕子(1992—),女,博士研究生,主要从事稀土矿区土壤修复研究。E-mail:heyanzi2020@issas.ac.cn

通信作者:梁音(1963—),男,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持生态恢复研究。E-mail: yliang@issas.ac.cn

dosage of water retaining agent (S2, S3) increased the plant yield and WUE by 19.95%~77.52% and 19.54%~79.50%, respectively. (3) The principal component analysis method was used to screen out 22 soil improvement indicators, and the fuzzy membership function values of each indicator were calculated respectively. The average function value was taken as the evaluation value of soil improvement effect, and the evaluation result was as follows: WFPMs > SAPs (except for S1) > CK. Compared with the control, the average function value of the SAPs (except for S1) only increased by 0.32~0.35 times, while that of the WFPMs increased by 0.73~1.72 times, and decreased with the increase of the application amount. Therefore, F1 was the best soil amendment treatment. The result showed that combing materials of WFPMs have a good application effect on the improvement of tailings soil in abandoned rare earth mining area.

**Keywords:** abandoned rare earth mining area; water and fertilizer preserving materials; soil restoration; soil physical and chemical properties; *Pennisetum sinense* Roxb; water use efficiency

我国南方地区广泛分布着离子型稀土矿床,以池浸、堆浸等方式开采稀土的过程破坏矿山表层土壤和植被,同时产生大量废弃尾砂地<sup>[1]</sup>。调查研究<sup>[2-4]</sup>显示,尾砂地土壤贫瘠、酸化严重,尾砂土中残留的硫酸铵浸提剂,在废矿数年内也流失殆尽,土壤中氮素严重缺乏,且氮、磷循环受到抑制,即使经过 10 年的自然演替,尾砂地土壤生态环境仍未得到明显改善,人工干预开展的植物恢复效果也不明显。在土壤中添加改良剂是进行土壤基质改良、提升植物恢复效果的重要方式。稀土矿区土壤改良剂主要以粪肥、农业废弃物等有机物料为主,对快速提升土壤养分含量和促进植被生长具有显著效果<sup>[5-7]</sup>。然而单独施用有机物料用量较大,且单一材料对土壤改良效果有限,因此亟须探索复合材料开展综合改良。针对当前稀土矿区尾砂土存在的养分缺乏、土壤酸化和漏水漏肥等复合问题,选择有机肥、保水剂、硅钙钾镁肥和尿素制成保水保肥材料,探索其在尾砂土基质改良中的应用。保水剂(SAPs)是一种含有高分子聚合物长链的亲水性物质,施入土壤后可以提升土壤保水保肥能力,同时具有减缓植物干旱胁迫和提高植物水分利用效率等作用<sup>[8]</sup>。硅钙钾镁肥是磷石膏、钾长石在高温下煅烧而成的碱性肥料,可以调节土壤酸碱度,在酸性红壤地区具有较为广泛的应用实践<sup>[9]</sup>。有机肥和尿素配施是近年来培肥地力和减量施肥的重要施肥方式,同时可以补充废弃多年矿区尾砂土中氮素的缺乏,以提供植物生长所需的养分<sup>[10]</sup>。

本文选择江西赣南地区当地一种生物产量大、经济价值高的皇竹草(*Pennisetum sinense* Roxb)开展牧草种植田间试验,研究不施肥、单施保水剂和施用保水保肥材料对土壤理化性质和皇竹草生长的影响,并开展土壤改良效果综合评价筛选出最佳材料配比,以期为稀土矿区土壤生态环境恢复应用提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于江西省定南县岭北离子型稀土矿区

(103°53'E, 30°59'N),该矿区已废弃近 20 年,采用硫酸铵浸提剂进行堆浸开采,区域内存在大量异地浸矿后的废弃尾砂土。该研究区属于南方丘陵区,年均气温 19.4~20.5℃,年均降水量 1 224~2 013 mm,属亚热带季风气候。该矿区尾砂地土壤容重为 1.28 g/cm<sup>3</sup>,采集 0—30 cm 深度尾砂土样进行理化分析,该尾砂土中砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 71.0%、22.0%和 7.0%,土壤质地为砂质壤土,土壤 pH 为 4.5,有机质、速效磷和速效钾含量分别为 4.0 g/kg、7.4 mg/kg、139.0 mg/kg,土壤中的氮素亦流失殆尽,硝态氮和铵态氮含量分别为 8.6、14.7 mg/kg。

## 2 材料与方法

### 2.1 供试材料

保水剂为山东华潍膨润土有限公司生产,通过接枝共聚工艺形成,含有腐植酸、膨润土和聚合物长链等亲水性物质,灰色,粒径为 0.18~2.00 mm,吸水倍数 382 倍;矿物肥料为金正大集团生产的硅钙钾镁肥,是磷石膏、钾长石在高温下煅烧而成的碱性肥料(pH 9.2, Ca 20.6%, Mg 2.2%, Si 9.2%, K<sub>2</sub>O 3.3%);尿素为市场上含氮量 46.67%的常规氮肥;有机肥为赣州锐源生物科技有限公司生产,含水量 16.0%,有机质 42.0%,总养分含量 6.7%。由以上材料复配而成的保水保肥材料 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 3.8%、2.0%、2.4%。

### 2.2 试验设计

本研究采用野外大田试验,共设计对照(CK)、单施保水剂(S1~S3)和混施保水保肥材料(F1~F3)等 7 个处理(表 1),其中保水剂设置 0.1、0.2、0.4 t/hm<sup>2</sup> 共 3 个水平,保水保肥材料设置 12.2、12.3、12.5 t/hm<sup>2</sup> 共 3 个水平。保水保肥材料由保水剂和复配肥料(有机肥、矿物肥和尿素)组成,参考文献数据及当地施肥量,确定本试验有机肥基施用量 10 t/hm<sup>2</sup>,尿素总追施量 0.6 t/hm<sup>2</sup>,矿物肥施用量为 1.5 t/hm<sup>2</sup><sup>[11-13]</sup>。每个处理 3 个重复,共 21 个试验小区,小

区布设采用完全随机区组设计,对照和单施保水剂为一组,保水保肥材料为一组。

2021 年 3 月 28 日对试验地深翻 30 cm 后进行土地平整,划分 5 m×3 m 小区,小区起垄种植 4 列 5 行皇竹草扦插苗,共 20 株。将改良材料作为基肥沟施(10 cm 深、30 cm 宽)后覆土,并浇水灌溉,每个小区灌溉量一致。皇竹草最佳生长期为 3 月至 10 月,期间于 6,8,10 月留茬 20 cm 刈割,尿素于刈割后追施。

表 1 田间试验设计 单位:t/hm <sup>2</sup>			
处理	编号	保水剂	复配肥料
对照	CK	0	0
	F1	0.1	基肥:有机肥 10 t/hm <sup>2</sup> ,矿物肥 1.5 t/hm <sup>2</sup> ;追施:尿素 0.6 t/hm <sup>2</sup>
	F2	0.2	
	F3	0.4	
保水保肥材料	S1	0.1	0
	S2	0.2	0
	S3	0.4	0

2.3 测定指标与方法

2.3.1 土壤理化性质 土壤理化性质于 10 月收割后测定。土壤容重:在种植垄上皇竹草根系附近处,随机选择 2 个测量点,采集 100 cm<sup>3</sup> 环刀土样,测定土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);土壤化学性质:五点法采集种植垄上的表层土,充分混合后去除杂质,于实验室内测定土壤 pH(土:水为 1:2.5)、有机质(SOM, g/kg)、全氮(TN, g/kg)、硝态氮(N—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mg/kg)、速效磷(AP, mg/kg)和速效钾(AK, mg/kg)含量,测定方法见文献[14];土壤水分:根层 0—40 cm 土壤含水量(SWC—10~SWC—40, %)利用烘干法测定,在皇竹草根系附近打钻取样,并随机选择 2 个样点作为重复测量点。

2.3.2 植物生长 小区外围皇竹草作为保护行,取中间 6 株作为测量植株观察生长状况。皇竹草每次刈割前(6,8,10 月),测量其分蘖数(FN, 支)和高度(GH, cm);8,10 月测量鲜草产量(FY, t/hm<sup>2</sup>);10 月收割后,测量茎叶比(RSL)和鲜干比(RFD)。

$FY = \text{单株皇竹草平均鲜重} \times \text{种植密度} \times 10$  (1) 式中:FY 为鲜草产量(t/hm<sup>2</sup>);种植密度为 1.33 株/m<sup>2</sup>。

2.3.3 植物养分组成 10 月收割后,在实验室内测定植株的全氮(TN—plant, g/kg)、全磷(TP—plant, g/kg)和全钾含量(TK—plant, g/kg),测定方法见文献[15]。

2.3.4 作物耗水量(evapotranspiration, ET)和水分利用效率(water use efficiency, WUE) 根据水量平衡方程[16]计算各阶段作物耗水量(mm)和总耗水量(mm),土层深度一般设置在植物根系土层,本文未在皇竹草种植前采集该层土壤水分,因根层和表层土壤水分关系的存在[17],利用较易获取的表层土壤水分估算根层土壤水分具有一定可行性,因此本文利

用表层 10 cm 土壤水分变化量来测算作物耗水量。其中,土壤含水量采用 TDR 水分仪(SHL—BXTR 型,江苏禹诺电子科技有限公司)测定,具体于植物生长季 5—11 月,每个小区种植垄上随机选择 4 个点进行重复测量,每月测定 2 次,测定时间 8:00—10:00,共 11 次数据。因水分监测期间未发生地表和地下径流,也未灌水,同时不考虑下层土壤水分向上作用,方程可简化为公式(2)[16]。其中降雨量数据通过试验地安装的自计式翻斗雨量筒(HOBO RG3—M,美国 Onset 公司)获取。

$$ET = P + \Delta W \tag{2}$$

式中:ET 为作物耗水量(mm);P 为降雨量(mm);ΔW 为阶段内土壤水分变化量(mm),通过 ΔSWC×土层深度(10 cm)×10 计算获得。

$$WUE = FY/ET \tag{3}$$

式中:WUE 为水分利用效率[t/(hm<sup>2</sup>·mm)]。

2.3.5 综合评价 对皇竹草不同生长期的分蘖数(P1~P3)、株高(P1~P3)、产量(P2、P3)、茎叶比(P3)、鲜干比(P3)、植物全氮(P3)、全磷(P3)和全钾(P3)、水分利用效率(P2、P3)、作物耗水量(P、P1~P3)等 19 个植物生长指标,10 月收割后的土壤容重、pH、有机质、全氮、硝态氮、速效磷、速效钾等 7 个土壤理化性质指标,0—40 cm 土层土壤含水量,共 30 个指标进行主成分分析,筛选出主成分累计方差贡献率≥85%且向量绝对值≥0.70 的指标;进一步对筛选出的指标进行模糊隶属度函数计算,求得平均函数值并进行排名,以进行综合评价[18]。

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{4}$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{5}$$

式中:R(X<sub>i</sub>)为模糊隶属函数值,数值越大土壤改良效果越好,反之越差。其中 X<sub>i</sub>、X<sub>min</sub>、X<sub>max</sub> 分别为指标值、指标最小值和最大值。当指标与土壤改良效果呈正相关关系时,用公式(4);反之则用公式(5)。

2.4 数据处理

应用 Excel 软件对试验数据进行整理分析;应用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和主成分分析,并利用 LSD 法对比处理间的显著性差异;应用 Origin 2021 软件绘图,同时应用相关性分析插件绘制指标间相关性热图。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质

施用土壤改良材料能改善土壤的理化性质。由表 2 可知,施用 6 种土壤改良材料均能提高土壤容重和速效钾含量,同时除 S2 和 F2 外,均能提升土壤有机质和全氮含量。其中,施用保水保肥材料对土壤速效养分的提升效果优于单施保水剂,硝态氮、速效磷和速效钾含量

分别提升 86.55%~596.37%,10.48%~368.17% 和 7.45%~71.43%,以 F1 处理效果最佳。

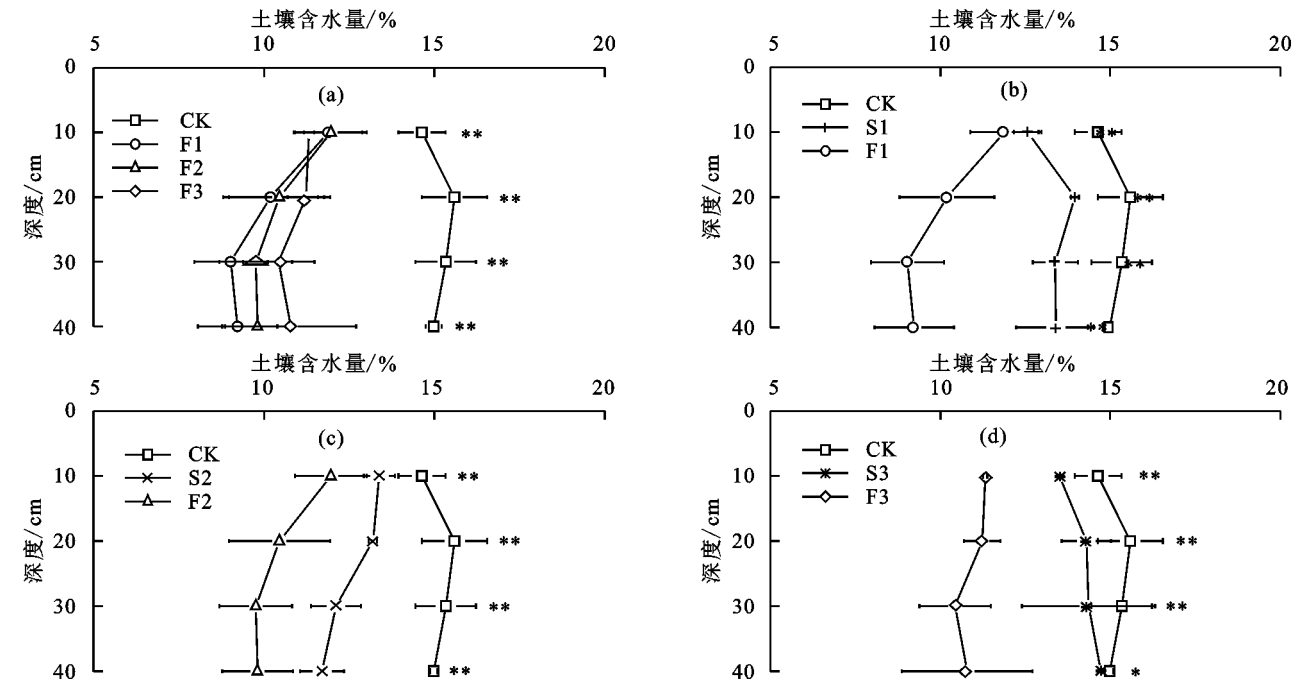
表 2 皇竹草地土壤理化性质

试验材料	处理	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	pH	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
保水保肥材料	对照(CK)	1.18±0.01Ab	5.54±0.05ABb	4.17±0.43Aab	0.16±0.00BCbcd	1.75±0.53Aa	2.44±2.07Aa	210.00±28.28Aa
	F1	1.20±0.02Aab	5.68±0.02Aa	4.46±0.47Aab	0.17±0.01ABCabc	5.95±6.10Aa	5.48±2.34Aa	380.00±91.92Aa
	F2	1.25±0.02Aa	5.58±0.05ABab	3.54±1.06Ab	0.15±0.01BCcd	2.98±3.13Aa	3.27±3.25Aa	307.50±307.59Aa
	F3	1.22±0.02Aab	5.52±0.04Bb	4.93±0.47Aab	0.20±0.02ABab	3.02±0.27Aa	2.41±0.85Aa	288.33±83.12Aa
单施保水剂	S1	1.19±0.04Aab	5.58±0.06ABab	4.53±0.46Aab	0.17±0.01ABCbcd	0.86±0.59Aa	1.17±0.42Aa	221.67±56.20Aa
	S2	1.23±0.03Aab	5.50±0.03Bb	3.52±0.56Ab	0.12±0.02Cd	0.73±0.37Aa	2.96±2.63Aa	260.00±28.28Aa
	S3	1.24±0.03Aab	5.53±0.05Bb	5.19±0.25Aa	0.22±0.03Aa	1.62±0.95Aa	1.76±1.03Aa	268.33±106.11Aa

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示不同施肥处理在  $p<0.05$  水平上差异显著;小写字母表示不同施肥处理在  $p<0.1$  水平上差异显著。下同。

施用土壤改良材料,由于促进皇竹草生长反而降低土壤含水量。从图 1 可以看出,CK 处理下土壤含水量随土层深度增加变化不大;施加保水保肥材料后土壤含水量显著降低,且在 0—30 cm 内随土层深度增加土壤水分逐渐降低,其中 F1 处理下土壤水分减少幅度最大,

F3 处理下最小(图 1a);单施保水剂后,各土层土壤含水量高于施用保水保肥材料,而低于 CK 处理,其中 S1、S3 和 CK 的深层土壤水分分布相似,随土层深度增加土壤水分变化不大,S2、F1、F2 和 F3 的深层土壤水分则随土层深度增加逐渐降低(图 1b~图 1d)。



注: \* 表示试验处理间在  $p<0.01$  水平上差异显著; \* \* 表示试验处理间在  $p<0.05$  水平上差异显著。

图 1 皇竹草地 0—40 cm 土层水分状况

3.2 皇竹草生长

为了更好地揭示皇竹草不同生长阶段对施加土壤改良材料的响应特征,对皇竹草 3 个生长期内的降雨情况进行分析(表 3)。皇竹草一茬和二茬生长期

段试验地降雨频繁,降雨量占比 90% 以上,分别处于主汛期和多雨期,三茬期则干旱少雨,皇竹草面临着严重的干旱胁迫。

表 3 皇竹草不同生长阶段降雨量分布

生长时间(月—日)	生长阶段	降雨阶段	总天数	降雨天数	降雨量/mm	降雨量占比/%
04—01 至 06—15	一茬期(P1)	主汛期	76	40	573.2	64.50
06—15 至 08—15	二茬期(P2)	多雨期	61	31	259.0	29.15
08—15 至 10—22	三茬期(P3)	干旱期	68	18	56.4	6.35
总计(P)			205	89	888.6	100.00



施用土壤改良材料促进皇竹草的生长。由表 4 可知,施用 5 种土壤改良材料(F1~F3,S2,S3)后,皇竹草的株高和鲜草产量增加,而分蘖数无显著变化。不同降雨条

件下皇竹草生长对土壤改良材料的响应方式不同,主汛期单施保水剂时皇竹草株高增加更多,多雨期和干旱期施用保水保肥材料时皇竹草的株高和鲜草产量更高。

表 4 保水保肥材料对皇竹草生长的影响

试验材料	处理	分蘖数/支			株高/cm			鲜草产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	
		FN-P1	FN-P2	FN-P3	GH-P1	GH-P2	GH-P3	FY-P2	FY-P3
保水保肥材料	对照(CK)	10.00±1.88Aa	16.92±1.53Aa	23.67±0.47Aa	159.17±15.32ABab	197.34±17.2ABbc	237.83±24.04Aa	11.61±6.83ABab	11.25±7.68Aa
	F1	11.00±0.47Aa	19.17±2.35Aa	32.83±3.54Aa	161.78±11.61ABab	257.83±13.19Aab	215.95±36.91Aa	32.81±3.73Aa	22.82±6.24Aa
	F2	11.28±1.85Aa	16.33±1.59Aa	26.72±2.92Aa	164.06±9.75ABab	263.50±12.85Aa	221.42±15.68Aa	30.44±2.69ABa	19.15±6.10Aa
	F3	11.84±4.01Aa	19.92±2.24Aa	29.33±3.28Aa	139.08±22.98Bb	261.06±20.57Aa	229.17±14.14Aa	31.15±7.65ABa	17.79±4.72Aa
	S1	8.44±1.50Aa	15.25±3.18Aa	26.84±4.01Aa	162.42±4.36ABab	154.75±6.96Bc	191.67±62.93Aa	6.78±4.77Bb	7.75±8.81Aa
单施保水剂	S2	11.42±2.95Aa	15.75±6.96Aa	25.25±3.42Aa	180.75±9.79Aa	212.25±50.56ABabc	228.17±46.20Aa	20.61±20.51ABab	19.64±6.39Aa
	S3	9.39±1.84Aa	14.50±3.07Aa	25.00±2.59Aa	178.45±7.56ABa	218.92±15.68ABab	200.94±16.56Aa	13.93±8.06ABab	14.18±3.18Aa

注：P1、P2、P3 分别为主汛期、多雨期和干旱期。

施用土壤改良材料进一步提高皇竹草的养分含量。从表 5 可以看出,干旱期施用保水保肥材料时,皇竹草的氮磷等养分含量更高,茎叶比略有降低,但高于单施

保水剂处理。综合来看,保水保肥材料对皇竹草生长的促进效果更显著,其中 F1 处理下皇竹草生长最好,多雨期和干旱期分别增产 182.63%和 102.87%。

表 5 保水保肥材料对皇竹草茎叶比、鲜干比和植物养分组成的影响

试验材料	处理	茎叶比 RSL	鲜干比 RFD	植物养分组成		
				总氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )
保水保肥材料	对照(CK)	3.14±0.57Aa	2.62±0.03Bb	12.89±1.72Aa	0.99±0.24Aa	37.24±1.79ABa
	F1	2.65±0.11Aa	2.85±0.13ABb	16.04±2.39Aa	1.46±0.09Aa	32.48±1.73BCbc
	F2	2.75±0.18Aa	3.77±0.87ABab	15.19±2.81Aa	1.70±0.18Aa	37.91±1.12Aa
	F3	2.28±0.13Aa	4.20±0.35ABab	17.61±2.54Aa	1.49±0.25Aa	29.56±1.93Cc
	S1	2.30±0.35Aa	4.63±0.48Aa	13.25±1.84Aa	1.30±0.00Aa	34.41±1.08ABCab
单施保水剂	S2	2.41±0.18Aa	2.67±0.40Bb	14.85±1.10Aa	1.42±0.55Aa	36.71±0.06ABab
	S3	2.66±0.54Aa	3.14±1.07ABab	12.24±1.20Aa	1.40±0.36Aa	35.75±2.32ABab

3.3 作物耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)

施用土壤改良材料提高皇竹草的水分利用效率。由表 6 可知,相比 CK,各施肥处理主汛期耗水量降低 0.02%~0.55%,干旱期升高 0.58%~4.83%;而在多雨期,F1~F3、S3 耗水量提升 0.38%~0.77%,而 S1、S2 降

低 0.06%~0.30%;总耗水量 S2、F1~F3 升高 0.02%~0.38%,S1、S3 降低 0.08%~0.13%,不同处理间的植株耗水量均无显著性差异。在多雨期和干旱期,各施肥处理(S1 除外)皇竹草的 WUE 相比 CK 均有提高,分别提高为 19.54%~181.54%和 26.54%~102.07%。

表 6 皇竹草耗水量和水分利用效率

试验材料	处理	作物耗水量/mm				水分利用效率/(t·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	
		总耗水量	主汛期 P1	多雨期 P2	干旱期 P3	多雨期 P2	干旱期 P3
保水保肥材料	对照(CK)	698.89±2.82Aa	379.54±2.41Aa	256.93±1.12Aa	62.42±1.29Aa	0.05±0.03ABab	0.18±0.12Aa
	F1	699.02±0.70Aa	377.47±1.46Aa	258.59±2.13Aa	62.96±1.74Aa	0.13±0.02Aa	0.36±0.10Aa
	F2	699.68±1.84Aa	379.48±1.04Aa	257.69±0.69Aa	62.50±0.95Aa	0.12±0.01ABa	0.31±0.10Aa
	F3	701.53±1.24Aa	378.38±0.79Aa	258.89±0.70Aa	64.27±2.03Aa	0.12±0.03ABa	0.28±0.06Aa
	S1	698.36±2.09Aa	377.70±3.26Aa	256.76±1.00Aa	63.90±1.46Aa	0.03±0.02Bb	0.12±0.13Aa
单施保水剂	S2	699.33±0.87Aa	378.55±2.55Aa	256.14±2.09Aa	64.65±3.10Aa	0.08±0.08ABab	0.30±0.09Aa
	S3	697.98±4.71Aa	377.58±1.76Aa	257.91±1.16Aa	62.49±3.04Aa	0.05±0.03ABab	0.23±0.05Aa

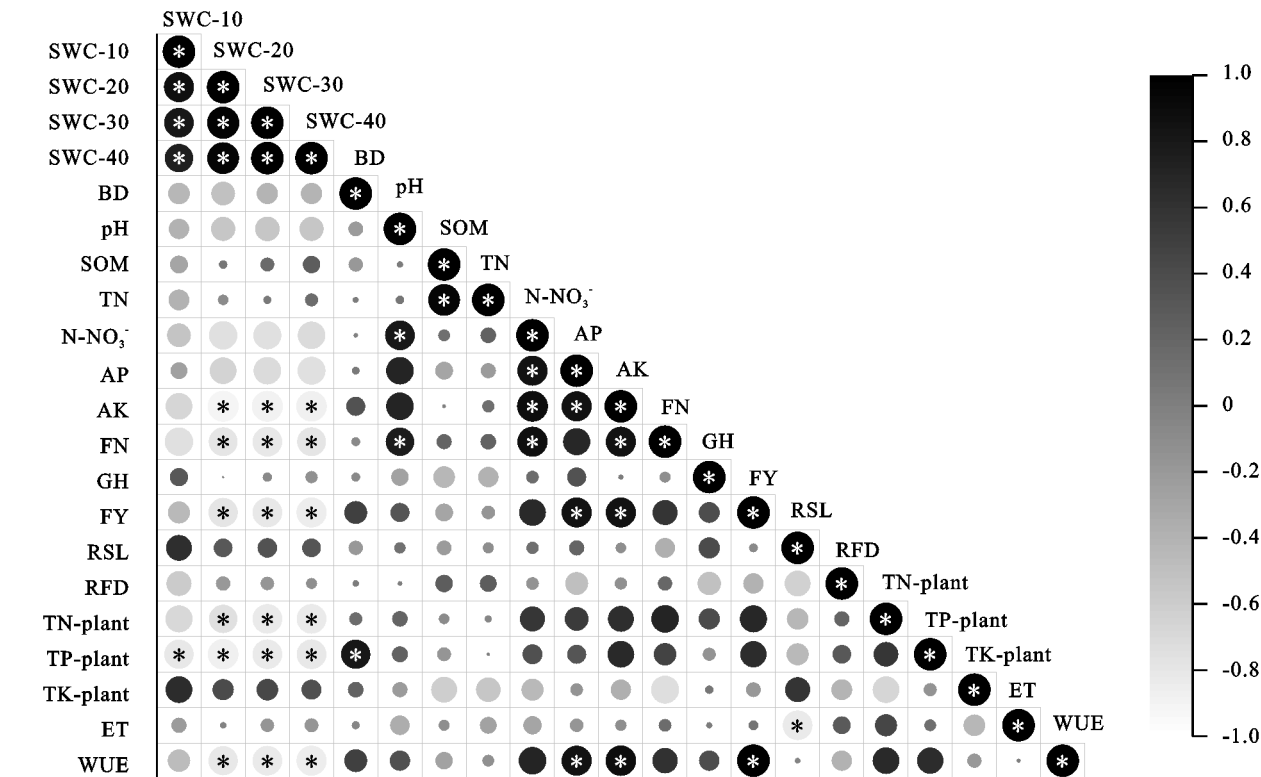
3.4 土壤改良指标相关性分析及效果综合评价

从图 2 可以看出,土壤理化性质、植物生长(除 RSL、RFD 和 TK-plant 外)和水分利用效率等指标间具有正相关关系,土壤水分、RSL 和作物耗水等指标间

具有正相关关系,两组指标间则具有负相关关系。显著性分析结果表明,SWC-20、SWC-30 和 SWC-40 等土壤水分指标与 FN、FY、TN-plant、TP-plant 和 WUE 等植物生长指标显著负相关,BD 与 TP-plant、pH 和

N—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与FN、AP和AK与FY和WUE呈显著正相关。土壤理化性质与植物生长的关系表现在根层土壤

水分越少,容重、pH和养分含量越高,皇竹草分蘖数、氮磷含量、产量和WUE等生长指标越高。



注:相关性分析采用同期数据;\*表示 $p\leqslant0.05$ 水平上显著相关。

图 2 土壤改良指标相关性分析

对土壤改良相关指标进行主成分分析(表 7)可知,前 3 个主成分累计贡献率 $\geqslant85\%$ <sup>[19]</sup>,其信息损失率 12.92%,可以解释绝大部分的土壤改良效果。指标的向量绝对值越大,对相应主成分的贡献也越大,筛选各主成分中向量绝对值 $\geqslant0.70$ 的指标,第 1 主成分主要表征土壤养分和作物耗水特性,其中速效磷和多雨期、干旱期作物耗水量的指标贡献最大;第 2 主成分主要表征植

物生长状况、土壤水分和水分利用效率,其中主汛期皇竹草分蘖数的指标贡献最大;第 3 主成分主要为多雨期分蘖数、植物全磷、作物总耗水量和主汛期耗水量,其中主汛期作物耗水量的指标贡献最大。对筛选出的 22 个指标进行模糊隶属度函数计算,求得平均函数值并进行排名(表 8),保水保肥材料改良效果优于单施保水剂和对照,其中 F1 为最佳配比。

表 7 主成分分析结果

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	向量绝对值 $\geqslant0.70$ 的指标
第 1 主成分	11.22	37.39	37.39	9 个指标:GH—P3、pH、TN、N—NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、AP、AK、TK—plant、ET—P2*、ET—P3*
第 2 主成分	10.13	33.77	71.16	10 个指标:FN—P1、FN—P2、GH—P2、FY—P2、FY—P3、RFD、SWC—10*、SWC—30*、WUE—P2、WUE—P3
第 3 主成分	4.78	15.92	87.08	4 个指标:FN—P2、TP—plant、ET—P*、ET—P1*
第 4 主成分	3.88	12.92	100.00	1 个指标:TN—plant

注:\*表示指标与土壤改良效果呈负相关关系。

表 8 基于主成分分析和模糊隶属函数的综合评价结果

试验材料	处理	平均隶属函数值	排序
保水保肥材料	对照(CK)	0.34	6
	F1	0.78	1
	F2	0.66	2
	F3	0.60	3
	S1	0.32	7
单施保水剂	S2	0.46	4
	S3	0.45	5

## 4 讨论

田间试验表明,废弃离子型稀土矿区应用保水保肥材料后,通过改良土壤结构、调节土壤酸碱度、提升土壤肥力和调整根层土壤水分分布等方式改善尾砂土土壤理化性质,进而促进试验地皇竹草快速生长。应用保水剂或保水保肥材料可提升土壤容重(BD)0.92%~5.80%,这与保水剂、有机肥等土壤改良剂能降低土壤容重的结果<sup>[20]</sup>不一致,可能与垄沟不同部位对土壤改良剂的响应不同有关。垄作种植

方式下种植垄 BD 高于施肥沟,同时垄沟在水盐运移方式、植被覆盖等方面也不同<sup>[21]</sup>,因此土壤改良剂对垄沟不同部位土壤结构的影响机制还有待进一步研究。仅种植皇竹草(CK)使尾砂土土壤 pH 从 4.50 提升至 5.54,应用保水保肥材料(F1,F2)进一步提升土壤 pH 0.81%~2.53%,单施保水剂(S2,S3)则会降低土壤 pH,同时土壤 pH 随保水剂用量增加而逐渐下降<sup>[22]</sup>,由于保水保肥材料中碱性肥料硅钙钾镁肥起到调节土壤 pH 的作用,因此有效减缓 pH 下降。保水保肥材料对土壤速效养分的提升效果更佳,使土壤硝态氮(N—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、速效磷(AP)和速效钾(AK)相比对照提升 70.55%~240.81%,34.26%~124.98%和 37.30%~80.95%,而对土壤有机质(SOM)和总氮(TN)的提升效果与单施保水剂差异不大,相比对照分别提升 6.98%~24.52%,6.02%~38.22%(F2,S2 除外)。提升尾砂土养分含量是废弃稀土矿区土壤修复的关键<sup>[4]</sup>,保水保肥材料中的有机肥、尿素等养分的添加是土壤速效养分提升的主要原因。保水保肥材料的应用使皇竹草根层土壤水分降低明显,且 0—40 cm 土层水分随土层深度增加逐渐下降,单施保水剂根层土壤水分也低于 CK,但水分分布与 CK 相似(S2 除外)。10—40 cm 土层水分随土层深度增加无变化,由于皇竹草根层主要分布在 40 cm 内,依据根层土壤含水量与皇竹草生长指标间的负相关关系(图 2),推测土壤水分分布的变化是根系吸水促进植物生长所致。保水保肥材料通过改善土壤理化性质,提升皇竹草的株高、鲜干比和氮磷养分等,使皇竹草产量提升 58.13%~182.63%;虽增加作物耗水(ET),但皇竹草 WUE 提升 53.81%~181.54%,保水保肥材料的施用更能实现节水增效,提升废弃稀土矿山植物修复成效;而单施保水剂可以减少 ET,中高用量下(S2,S3)产量和 WUE 提升 19.95%~77.52%和 19.54%~79.50%,因此对皇竹草生长的促进效果有限。

本文中复配形成的保水保肥材料对废弃稀土矿区土壤改良效果显著,综合评价结果(表 8)显示,保水保肥材料的平均函数值相比 CK 提高 0.73~1.27 倍,而单施保水剂(S1 除外)则提高 0.32~0.35 倍。当前,保水剂在干旱半干旱等缺水区域或保水能力较差的砂土中具有良好的应用效果<sup>[8]</sup>。本试验地处于亚热带季风区域,降雨充沛但年内降雨分布不均,特别是夏秋季持续高温下容易发生旱灾。试验年份 8—10 月为干旱期,单施保水剂(S1 除外)对皇竹草产量的提升效果与多雨期一致,这是因为保水剂具有减缓植物干旱胁迫和提高植物水分利用效率等作

用<sup>[8]</sup>,尾砂土中添加中高量保水剂(S2,S3)最佳。保水剂受到土壤和肥料中离子浓度的影响<sup>[23-24]</sup>,近年来保水剂配施相关研究<sup>[25-26]</sup>表明,有机肥、尿素等配施保水剂时,虽降低保水剂的吸胀倍数,但在减少养分流失、延长肥效和减量施肥等方面效果显著。本文在此基础上还配施硅钙钾镁肥,用以改善稀土矿区土壤酸化问题并调节保水剂对土壤 pH 的影响,同时硅钙钾镁肥配施有机肥后还能进一步提升有机肥肥效,提升作物产量<sup>[27-28]</sup>。总体来看,保水保肥材料随其中保水剂用量增加,土壤改良效果降低,因此低量保水剂配施肥料(F1)的土壤改良效果更好。

## 5 结论

(1)保水保肥材料通过改善废弃离子型稀土矿区尾砂土土壤理化性质促进皇竹草生长,相比对照,使皇竹草增产 58.13%~182.63%,WUE 提升 53.81%~181.54%;单施保水剂促进效果有限,中高用量保水剂(S2,S3)使皇竹草增产 19.95%~77.52%,WUE 提升 19.54%~79.50%。

(2)通过主成分分析和模糊隶属度函数法综合评价改良效果,保水保肥材料平均函数值相比对照提升 0.73~1.72 倍,随保水剂浓度增加而逐渐降低;单施保水剂平均函数值(S2,S3)相比对照提升 0.32~0.35 倍,随保水剂浓度增加而逐渐增加。综合评价,F1 为最佳土壤改良剂处理。

(3)保水保肥材料在解决废弃稀土矿区尾砂土存在的养分缺乏、土壤酸化和漏水漏肥等复合问题上发挥着良好效果,接下来应加强该材料在土壤水分保持、养分利用效率和水土流失防治等方面的机理研究。

### 参考文献:

- [1] 周丹,罗才贵,苏佳,等.离子型稀土矿区土壤生态恢复[J].金属矿山,2014(10):103-109.
- [2] 王友生.稀土开采对红壤生态系统的影响及其废弃地植被恢复机理研究[D].福州:福建农林大学,2016.
- [3] 张琳,刘胜洪,刘文,等.稀土矿场修复过程中植物多样性变化与土壤改良的相关性[J].江苏农业科学,2018,46(1):239-243.
- [4] 刘文深,刘畅,王志威,等.离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究[J].土壤学报,2015,52(4):879-887.
- [5] Wei Z W, Hao Z K, Li X H, et al. The effects of phytoremediation on soil bacterial communities in an abandoned mine site of rare earth elements[J].Science of the Total Environment,2019,670:950-960.
- [6] 张艳.废弃稀土矿区尾砂土壤改良及其植物修复试验研究[D].江西 赣州:江西理工大学,2014.

- [7] Zhou L Y, Li Z L, Liu W, et al. Restoration of rare earth mine areas: Organic amendments and phytoremediation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 17151-17160.
- [8] Saha A, Sekharan S, Manna U. Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: e104736.
- [9] 冀建华, 李絮花, 刘秀梅, 等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 583-592.
- [10] 梁路, 张卫杰, 徐博涵, 等. 有机无机肥配施影响土壤肥力与土壤环境的研究进展[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(3): 1-11.
- [11] 赵晓登, 陈腾达, 李玉帅, 等. 皇竹草在畜牧业的应用研究进展[J]. *饲料研究*, 2020, 43(9): 157-159.
- [12] 郎永祥, 陈伟, 付薇, 等. 皇竹草+高羊茅不同套种模式效益研究[J]. *畜牧与饲料科学*, 2017, 38(8): 26-28.
- [13] 马存金, 任士伟, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥用量对烟草根系发育及烟叶质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(31): 7-12.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 20-87.
- [15] 中华人民共和国农业部. 植物中氮、磷、钾的测定 NY/T 2017—2011[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [16] 李奔, 王彦珍, 陈召月, 等. 不同灌水条件下分层施肥对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 326-332.
- [17] 刘苏峡, 邢博, 袁国富, 等. 中国根层与表层土壤水分关系分析[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 1-17.
- [18] 彭维新, 杨源通, 冯嘉仪, 等. 污泥及强化措施对稀土矿区废弃地土壤的改良[J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41(5): 65-72.
- [19] 徐澜, 秦秀娟, 安伟, 等. 基于主成分分析的南引小麦品种综合评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(3): 32-41.
- [20] 张欣宇, 王呈玉, 李锦秀, 等. 不同施肥处理对黑钙土理化性质及产量的影响[J/OL]. *吉林农业大学学报*. DOI: 10.13327/j.jjlau.2021.1728.
- [21] 关法春, 苗彦军, Tianfang B F, 等. 起垄措施对重度盐碱化草地土壤水盐和植被状况的影响[J]. *草地学报*, 2010, 18(6): 763-767.
- [22] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配合施加对铁尾矿基质下植物生长的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 44-50.
- [23] 李杨, 王百田. 肥料对不同粒径保水剂吸水性能的影响[J]. *北方园艺*, 2015(3): 143-146.
- [24] Abdallah A M. The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(3): 275-285.
- [25] 蒋美佳, 刘晓林, 冯钰梅, 等. 有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 99-104.
- [26] 王政, 王柱石, 张然, 等. 保水剂与肥料配施对土壤水分和酶活及烤烟生长的影响[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(9): 83-91.
- [27] 吴文利, 康亚龙, 曾少敏, 等. 生物有机肥配施硅钾钙改良剂对酸性红壤梨园土壤肥力及产量的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2021, 44(2): 305-314.
- [28] 赵跃, 黄楠, 刘继培. 生物有机肥配施硅钙钾镁肥对西瓜产量、品质及土壤养分的影响[J]. *农学学报*, 2022, 12(9): 37-41.

(上接第 266 页)

- [22] 温都如娜, 方华军, 于贵瑞, 等. 模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的初期影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2185-2195.
- [23] Xiao D, Huang Y, Feng S Z, et al. Soil organic carbon mineralization with fresh organic substrate and inorganic carbon additions in a red soil is controlled by fungal diversity along a pH gradient[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 79-89.
- [24] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [25] 郭鸿蓉, 吴福忠, 倪祥银, 等. 中亚热带次生林和人工林凋落枝水溶性碳氮磷动态特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5175-5183.
- [26] 吕茂奎, 谢锦升, 江森华, 等. 米槎常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2201-2208.
- [27] 林伟盛, 杨智杰, 郭剑芬, 等. 米槎天然林转变成杉木人工林后土壤可溶性有机碳的变化[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(1): 41-47.
- [28] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 37-42.
- [29] Wang Q K, Wang S L. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(3): 210-216.
- [30] 潘艳斌, 朱巧红, 彭新华. 有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 209-214.