



王艳,夏志强,吴璇,等.复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(1):255–266.

WANG Y,XIA Z Q,WU X,et al.Effect of composite soil amendments on soil physicochemical properties and enzyme activities of rare earth tailings[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(1):255–266.

复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的影响

王 艳,夏志强,吴 璇,倪晓华,汪 薇,郭圣茂*

(江西农业大学 林学院/亚热带森林资源培育江西省重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】稀土开采带来了严重的生态环境问题,如水土流失、养分枯竭、土壤结构破坏、植被恢复困难等。土壤改良是当前稀土尾矿生态修复的研究热点。探究凹凸棒土(A)、生物炭(B)、聚丙烯酰胺(C)和腐植酸(D)复配而成的土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的改良效益,以期对稀土尾矿土壤改良及生态修复提供理论指导。【方法】通过盆栽法,开展四因素四水平正交试验,以土壤理化性质及酶活性作为评价指标,利用综合评分法对土壤改良配方进行系统优化,并根据优化后的改良方案,进行植物生长试验,以望江南(*Cassia occidentalis*)的出苗率、株高、主根长以及地径作为评价指标,验证复合土壤改良剂的添加对植物生长的促进效果。【结果】复合土壤改良剂的添加显著改善了稀土尾矿土壤的理化性质。与未经改良的稀土尾矿土壤相比,添加复合土壤改良剂降低了土壤容重,并显著提高了土壤pH、硝态氮、有效磷、速效钾、全钾和有机质的含量,其增幅分别为10.05%~54.03%、36.40%~65.60%、488.53%~1415.31%、40.50%~164.75%、25.44%~38.48%、78.64%~396.21%。在酶活性方面,脲酶活性提高了45.65%~122.78%,但酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶和蔗糖酶活性有所下降,而蛋白酶活性无显著变化。通过排队评分法得到稀土尾矿土壤改良最优配方为A₂B₁C₄D₄(凹凸棒土10 g/kg:生物炭0 g/kg:聚丙烯酰胺3 g/kg:腐植酸3 g/kg)。进一步的植物生长试验表明,望江南在该配方改良的土壤中成长状况优良,与未经改良的稀土尾矿土壤相比,望江南的出苗率、株高、主根长及地径分别显著提高了149.97%、464.88%、364.16%、241.92%。【结论】凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸可作为稀土尾矿土壤改良的有效材料。本研究可为稀土尾矿土壤的修复及植被恢复提供理论支撑。

关键词:稀土尾矿;土壤改良剂;土壤理化性质;酶活性

中图分类号:X171.4 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)01-0255-12



Effect of composite soil amendments on soil physicochemical properties and enzyme activities of rare earth tailings

WANG Yan,XIA Zhiqiang,WU Xuan,NI Xiaohua,

WANG Wei,GUO Shengmao*

收稿日期:2024-09-03 修回日期:2024-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31560204)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(31560204)

作者简介:王艳,硕士生,orcid.org/0009-0008-3209-1708,wangyan200097@163.com;*通信作者:郭圣茂,副教授,主要从事困难立地植被恢复技术及机理、森林药材栽培及利用研究,orcid.org/0009-0006-5307-5585,shmguo@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(College of Forestry, Jiangxi Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] Rare earth mining has resulted in severe ecological and environmental problems, such as soil erosion, nutrient depletion, degradation of soil structure, and difficulties in vegetation restoration. Soil remediation is a research hotspot within the context of ecological restoration for rare earth tailings. This study investigated the efficacy of composite soil amendments comprising attapulgite (A), biochar (B), polyacrylamide (C), and humic acid (D) on enhancing the physicochemical properties as well as enzyme activity in rare earth tailings soil, thus providing theoretical guidance for the remediation and ecological rehabilitation of rare earth tailing. [Method] Through the pot method, a four-factor and four-level orthogonal experiment was conducted. With the soil physicochemical properties and enzyme activities as the evaluation indexes, the soil improvement formula was systematically optimized by the comprehensive scoring method. According to the optimized improvement scheme, the plant growth experiment was conducted, taking the emergence rate, plant height, main root length and ground diameter of *Cassia occidentalis* as the evaluation indexes to verify the promoting effect of the addition of the composite soil amendment on plant growth. [Result] The addition of composite soil conditioner significantly improved the physical and chemical properties of rare earth tailings soil. Compared with the untreated rare earth tailings soil, the addition of the composite soil improver reduced soil bulk density and significantly increased the contents of soil pH, nitrate nitrogen, available phosphorus, available potassium, total potassium and organic matter, with increases ranging from 10.05%–54.03%, 36.40%–65.60%, 488.53%–1415.31%, 40.50%–164.75%, 25.44%–38.48% and 78.64%–396.21%, respectively. In terms of enzyme activity, urease activity increased by 45.65%–122.78%, but acid phosphatase, β -glucosidase and sucrase activity decreased, while protease activity showed no significant change. Through the comprehensive queuing scoring method, the optimal formula for soil improvement of rare earth tailings was $A_2B_1C_4D_4$ (attapulgite 10 g/kg, biochar 0 g/kg, polyacrylamide 3 g/kg, humic acid 3 g/kg). Further plant validation experiments showed that *Cassia occidentalis* grew well in the soil improved by this formula. Compared with the unimproved rare earth tailings soil, the seedling emergence rate, plant height, main root length and ground diameter of *Cassia occidentalis* were significantly increased by 149.97%, 464.88%, 364.16% and 241.92%. [Conclusion] Attapulgite, biochar, polyacrylamide and humic acid can be used as effective materials for soil improvement of rare earth tailings. This study can provide a theoretical support for soil remediation and vegetation restoration of rare earth tailings.

Keywords: rare earth tailings; soil amendment; soil physicochemical properties; enzyme activity

【研究意义】稀土是一种不可再生的国家级战略资源,对航天、军事、机械制造、石油化工等的发展起着至关重要的作用。我国享有“稀土王国”的称号,不仅是世界上稀土储量最丰富的国家,同时也是稀土种类最丰富的国家^[1-2],其中江西省赣南地区是我国稀土矿的集中分布区。赣南稀土矿的开采虽然给我国带来了巨大经济价值,但也给矿山周围环境带来了很大的破坏^[3]。稀土矿开采使土壤中大部分的营养物质流失,粘粒含量减少,沙化严重,长期的浸矿使土壤整体偏酸,这些问题严重影响了尾矿地植被的恢复,造成了生态环境恶化、土地资源浪费^[4]。如果仅依靠自然演替,稀土尾矿的生态环境在相当长的一段时间里都不能得到明显的改善。因此,如何修复稀土尾矿土壤、恢复植被生长是当前稀土尾矿生态修复的研究重点^[5]。【前人研究进展】土壤改良剂是一种能够改良土壤理化性质,使其更适合植物生长的物料,在土壤的修复和治理方面已获得了广泛应用^[6]。凹凸棒土是一种具有链层状结构的含水富镁铝硅酸盐的黏土矿物,具有较强的离子交换能力和保水保肥能力^[7]。有研究^[8]表明,凹凸棒土添加能改善土壤团粒结构,增加土壤持水能力,可用于治理水土流失及板结严重的土壤。生物炭是一种富碳的有机物质,具有丰富的孔隙结构,比表面积大、吸附能力强^[9],对改良连作土壤^[10]、矿区土壤^[11]、退化土壤^[12]效果良好。聚丙烯酰胺是一种人工合成的线性高分子聚合物,具有凝絮、增粘、吸附等多种功能,在污水处理上较为

常用,因其具备良好的保水和持水性能,是提升地力的优良改良剂^[13]。腐植酸是一种大分子两性物,富含羧基、羟基、羰基、醌基和甲氧基等官能团,可提升土壤养分含量、调节 pH、改善土壤结构^[14]。

【本研究切入点】目前,关于凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺以及腐植酸对土壤的改良已有一定的研究,结果表明这些材料对改良土壤养分、提升作物产量具有良好的效果,但在稀土尾矿土壤修复的报道中这些材料运用较少。针对稀土尾矿存在的问题,提出切实有效的土壤改良方案对治理稀土尾矿的生态环境具有重要意义。【拟解决的关键问题】本研究将通过添加凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸,采用正交试验设计,结合盆栽试验,系统探讨其对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的综合改良效果,并筛选出最佳改良配方,为稀土尾矿土壤修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年12月至2024年8月在江西省南昌市江西农业大学林学院中药园(28°69' N,115°50' E)中进行,该地地势平坦,属于亚热带季风气候,日照充足,雨水充沛,年降雨量为1 600~1 700 mm,一年中夏冬季长,春秋季短,年平均气温为17~17.7℃,无霜期长。土壤取自江西省赣州市宁都县黄陂镇杨屋村某废弃稀土矿尾砂库(26°41' N,115°86' E),该地位于宁都县西北部,属于中亚热带季风湿润气候区,年降雨量在1 600 mm 以上,地形以山地、丘陵为主,尾砂库上植被覆盖率低,土壤侵蚀严重。

1.2 试验材料

供试土壤采自江西省赣州市宁都县黄陂镇杨屋村稀土尾矿地区,采用多点混合取样法,在0~40 cm 土层取样,将土壤样取回后混合均匀并过2 mm 孔径细筛,去除土壤中的杂质和土块,随机取部分土样进行土壤理化性质的分析,剩余土样进行盆栽试验。测得供试土壤样的pH为5.30,铵态氮11.33 mg/kg,硝态氮4.74 mg/kg,全氮0.31 g/kg,全磷3.48 mg/g,全钾2.85 mg/g,速效钾12.87 mg/g,有效磷0.87 mg/kg,有机质2.34 g/kg。稀土尾矿土壤改良材料包括凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸,凹凸棒土粒度为200目,购自江苏省常州市鼎邦矿产品有限公司;生物炭是由秸秆、玉米、小麦、花生等农作物的废弃物料加工而成,粒度为200目,比表面积为1 000~1 300 m²/g,灰分含量为3%~10%,购自平顶山市绿之源活性炭有限公司;聚丙烯酰胺(阳离子)购自天津市大茂化学试剂厂;腐植酸灰分含量10%,水分8%,含铁量0.3%,购自天津市致远化学试剂有限公司。供试改良剂的基本性质详见表1。

表1 供试改良剂基本性质
Tab.1 Basic properties of the test improvers

改良剂 Improvers	pH	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	有效磷/ (mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷/ (mg·g ⁻¹) Total phosphorus	有机质/ (g·kg ⁻¹) Organic matter
凹凸棒土 Attapulgit	8.25	7.69	1.62	6.72	0.83	3.58	3.57
生物炭 Biochar	7.66	216.54	10.29	1 026.61	2.61	9.83	1 093.92
聚丙烯酰胺 Polyacrylamide	6.31	21.43	72.61	19.33	12.47	2.62	192.86
腐植酸 Humic acid	4.62	5.89	32.55	9.13	6.48	2.50	569.75

1.3 土壤改良试验

根据稀土尾矿土壤存在的问题以及已发表的文献,本试验选用了凹凸棒土(A)、生物炭(B)、聚丙烯酰胺(C)和腐植酸(D)作为稀土尾矿土壤的改良材料。采用正交试验设计(L₁₆(4⁴)),4种材料均设置4个水平,共16个处理,具体试验安排见表2。土壤改良剂的添加量参照前人相关研究设置^[15-17],其中凹凸棒土设置0,10,20,30 g/kg 4个水平;生物炭设置0,2,4,6 g/kg 4个水平;聚丙烯酰胺和腐植酸设置水平一

致,均设置 0,1,2,3 g/kg 4 个水平。以不添加改良剂的 T_1 为对照(CK),每个处理 4 次重复,共 64 盆,土壤装于口径 26.5 cm、底径 20 cm、高度 21 cm 的塑料盆中,每盆土装 5 kg 土样(以风干土换算)。于试验的第 90 天收集尾矿土样,将其风干、彻底均质化后过筛,待进一步分析。

表 2 正交试验安排表

Tab.2 Orthogonal test schedule

处理 Treatment	因素 Factor				改良剂用量/(g·kg ⁻¹) Improver dosage			
	A	B	C	D	凹凸棒土 Attapulgit	生物炭 Biochar	聚丙烯酰胺 Polyacrylamide	腐植酸 Humic acid
T_1	1	1	1	1	0	0	0	0
T_2	1	2	2	2	0	2	1	1
T_3	1	3	3	3	0	4	2	2
T_4	1	4	4	4	0	6	3	3
T_5	2	1	2	3	10	0	1	2
T_6	2	2	1	4	10	2	0	3
T_7	2	3	4	1	10	4	3	0
T_8	2	4	3	2	10	6	2	1
T_9	3	1	3	4	20	0	2	3
T_{10}	3	2	4	3	20	2	3	2
T_{11}	3	3	1	1	20	4	0	0
T_{12}	3	4	2	2	20	6	1	1
T_{13}	4	1	4	2	30	0	3	1
T_{14}	4	2	3	1	30	2	2	0
T_{15}	4	3	2	4	30	4	1	3
T_{16}	4	4	1	3	30	6	0	2

1.4 植物生长验证试验

为验证土壤改良后对植物生长的促进作用,根据优化后的改良配方,选取望江南的出苗率、株高、主根长和地径作为评价指标,设计了植物盆栽试验。在播种望江南种子之前,先用 1% 次氯酸钠溶液消毒 10 min,随后用超纯水清洗 3~5 次,以备后续使用。本次试验所用花盆尺寸及土壤重量与 1.3 节土壤改良试验保持一致,播种前确保土壤充分吸水,达到湿度饱和状态后静置 24 h。每盆播种 10 粒种子,每个处理 15 次重复,出苗后每隔 2 d 浇水一次,如遇下雨则不浇。播种 15 d 后记录发芽情况(以植株长出两片真叶作为判断标准),待苗长到 5 cm 时每盆留苗 3 株,生长 120 d 后,从每盆中选取 1 株生长状况较好的植株,进行整株取样,超纯水清洗干净后,用直尺测量株高和主根长,游标卡尺测量地径。

1.5 测定方法

土壤样品采集与分析方法均参照《土壤农化分析》^[18]。其中土壤容重采用环刀法;土壤 pH 使用电极法(水土比为 2.5:1)测定;土壤铵态氮和硝态氮采用氯化钾浸提-分光光度计法进行测定;全氮、全磷、全钾采用浓硫酸消煮法进行测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰分光光度计法进行测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-紫外分光光度计法进行测定;有机质采用重铬酸钾法进行测定。土壤酸性磷酸酶采用对硝基苯磷酸二钠比色法进行测定; β -葡萄糖苷酶采用硝基酚比色法进行测定;脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法进行测定;蛋白酶采用茚三酮比色法进行测定;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法进行测定^[19]。

1.6 评分方法

采用综合评分法中的排队评分法,将不同土壤改良配方所测得的理化性质及酶活性等 15 个指标全部做为评价对象,综合考虑各项指标优劣,排序给出评分值,并将其作为单指标进行数据分析。例如,某一指标中改良效果最好的处理试验结果为 $x_{\max}$,排名第一,打 10 分,记为 $y_{\max}$;改良效果最差的处理试验结果为 $x_{\min}$,排名第十六,打 1 分,记为 $y_{\min}$ 。那么该指标中某处理的试验结果为 x_i ,则得分 y_i 的计算公式为:

$\frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{y_{\max} - y_i}{x_{\max} - x_i}$ 。同理可按此方法算出其他处理各指标值的得分,然后将每个试验号所有指标的得分相加即得综合评分,再对综合评分进行极差分析,即可获得对土壤改良效果最好的组合^[20]。

1.7 数据处理

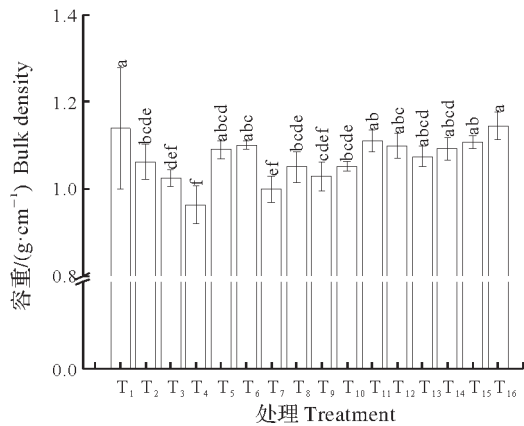
采用 Excel 2016 进行数据整理和极差分析,SPSS 24 进行方差分析和显著性检验(ANOVA 法, $P < 0.05$),Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质的改良效应

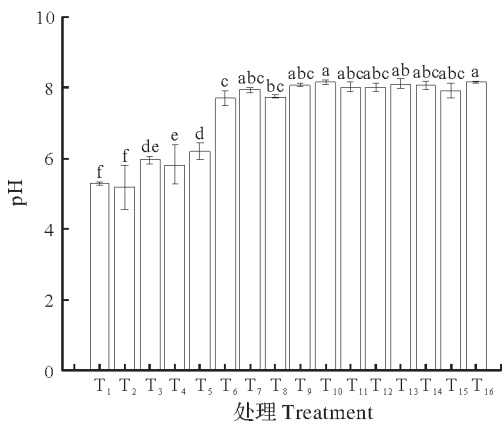
容重可以反应土壤的紧实状况。如图 1 所示,经过改良后,土壤容重在 $0.96 \sim 1.14 \text{ g/cm}^3$ 。与对照 T_1 相比, $T_2 \sim T_4$ 、 $T_7 \sim T_{10}$ 处理均显著降低了土壤容重。方差分析表明,凹凸棒土(A)和聚丙烯酰胺(C)对土壤容重改良的影响显著($P < 0.05$)。四因素对土壤容重改良作用由大到小依次为 C、A、D 和 B,最优组合水平为 $A_1B_3C_4D_4$ 。

植物一般在中性、弱酸性或弱碱性的土壤中生长良好,即 pH 为 $6.5 \sim 7.5$,pH 偏高或偏低均不利于植物的生长。由图 2 可知,经过改良后,土壤 pH 先上升后逐渐变平缓。除 T_2 处理与对照 T_1 无显著差异外,其余各处理下土壤的 pH 均显著增加了 $10.05\% \sim 54.03\%$ ($P < 0.05$)。方差分析表明,凹凸棒土(A)、生物炭(B)和聚丙烯酰胺(C)对土壤 pH 改良的影响显著($P < 0.05$)。四因素对土壤 pH 改良作用由大到小依次为 A、C、B 和 D,最优组合是 $A_3B_3C_4D_4$ 。



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicated significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 1 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤容重的影响
Fig.1 Effect of composite soil amendment on soil bulk density of rare earth tailings



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicated significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 2 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤 pH 的影响
Fig.2 Effect of composite soil conditioner on soil pH of rare earth tailings

土壤中的有效态和速效态养分是植物吸收营养的主要来源。从图 3 可以看出,经过改良后,各处理中土壤有效养分和速效养分差异显著。其中与对照 T_1 相比,土壤铵态氮含量仅在 T_7 处理中显著提高了 33.66% ($P < 0.05$),而在 T_5 、 T_6 、 T_9 、 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{14} 、 T_{15} 、 T_{16} 这 8 个处理中显著降低了 $11.70\% \sim 61.04\%$ ($P < 0.05$);改良后,土壤硝态氮含量逐渐升高,与对照 T_1 相比,土壤硝态氮含量在 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{14} 、 T_{15} 这 4 个处理中显著增加了 $36.40\% \sim 65.60\%$,而在 T_5 和 T_7 处理中土壤硝态氮的含量分别显著减少了 29.54% 、 35.91% ;改良后土壤中的有效磷含量在 T_2 、 T_5 、 T_8 、 T_{10} 、 T_{12} 、 T_{15} 、 T_{16} 这 7 个处理中均显著增加;改良后,速效钾含量总体呈上升趋势,除 $T_2 \sim T_4$ 处理,其余各处理均显著提高了土壤中速效钾的含量。方差分析结果表明,4 种改良剂对稀土尾矿土壤铵态氮和硝态氮改良的影响均显著($P < 0.05$),其中对土壤铵态氮改良作用由大到小依次为 C、A、B 和 D,最优水平组合是 $A_1B_1C_4D_2$,而对硝态氮改良作用由大到小依次为 A、C、D 和 B,最优组合是 $A_3B_4C_3D_1$;凹凸棒土(A)、聚丙烯酰胺(C)和腐植酸(D)对土壤有效磷改良的影响显著,由大到小依次为 C、A、D 和 B,最优水平组合是 $A_2B_4C_2D_3$;凹凸棒土(A)对土壤速效钾改良的影响显著,由大到小依次为 A、C、B 和 D,最优水平组合是 $A_4B_1C_2D_1$ 。

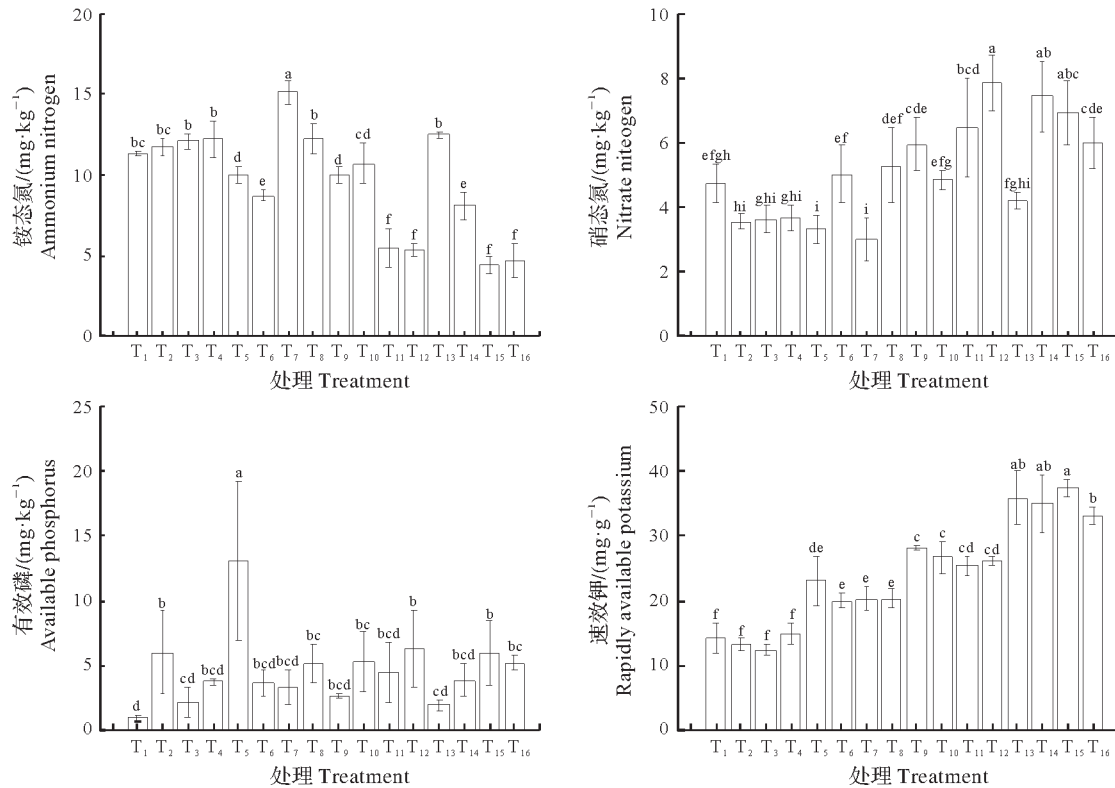


图3 复合土壤改良剂对土壤速效养分的影响

Fig.3 Effect of composite soil conditioner on soil available nutrients

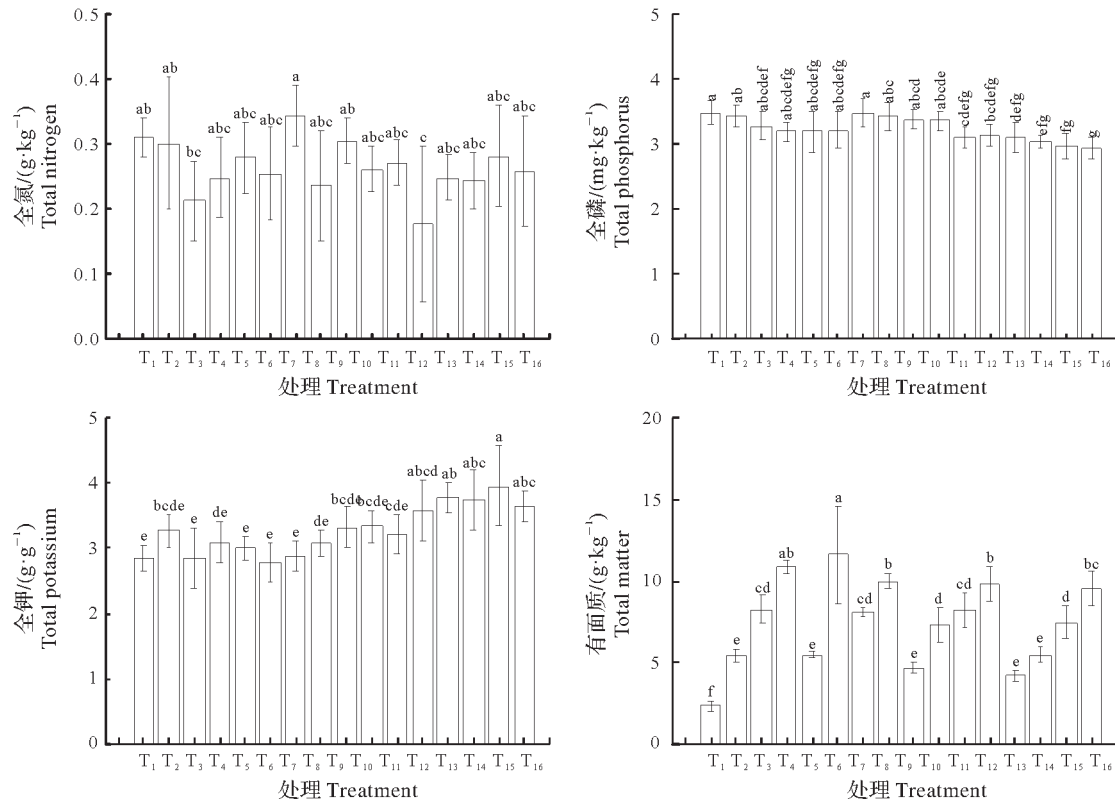


图4 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤全氮、全磷、全钾及有机质的影响

Fig.4 Effects of composite soil conditioner on total nitrogen, total phosphorus, total potassium and organic matter in rare earth tailings soil

土壤中的全氮、全磷、全钾和有机质含量能反映出土壤中养分的总储量和供应能力,是评价土壤改良效果的重要指标。从图4可看出,经过改良后,土壤中全氮含量无显著变化,全磷含量略有降低。与对

照 T_1 相比,土壤中的全磷含量在 $T_{11} \sim T_{16}$ 这 6 个处理中显著降低了 9.75%~15.37%;全钾含量呈上升趋势,与对照相比,土壤全钾含量在 $T_{12} \sim T_{16}$ 这 5 个处理中显著增加了 25.44%~38.48%;改良后,土壤中有机质含量均显著增加。方差分析结果表明,凹凸棒土(A)对土壤全钾和有机质的改良影响显著($P < 0.05$),生物炭(B)和腐植酸(D)对土壤有机质的改良效果显著($P < 0.05$),聚丙烯酰胺(C)对土壤全磷和全钾改良影响显著($P < 0.05$)。四因素对土壤全磷改良作用由大到小依次为 C、A、B 和 D,最优改良剂组合是 $A_1B_1C_3D_1$;对土壤全钾的影响顺序由大到小依次为 A、C、D 和 B,改良最优组合是 $A_4B_4C_2D_2$;对土壤有机质影响作用由大到小依次为 B、D、A 和 C,提升土壤有机质的最优改良组合是 $A_2B_4C_4D_4$ 。

2.2 复合土壤改良剂的添加对稀土尾矿土壤酶活性的影响

酶在土壤的各种物质循环中起着关键作用,在一定程度上能反应出土壤的养分状况。如图 5 所示,改良后,与对照 T_1 相比各处理中土壤的酸性磷酸酶活性显著降低了 11.97%~51.70%; β -葡萄糖苷酶活性显著降低了 18.48%~51.39%;脲酶活性在 $T_3 \sim T_5$ 、 $T_7 \sim T_{10}$ 、 T_{13} 、 T_{14} 这 9 个处理中比对照显著升高了 45.65%~122.78%;改良后,蔗糖酶活性大致呈下降趋势,蛋白酶活性的变化不明显。方差分析结果表明,凹凸棒土(A)对土壤酸性磷酸酶、脲酶、蛋白酶和蔗糖酶改良的影响显著($P < 0.05$),生物炭(B)对土壤酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和蔗糖酶改良的影响显著($P < 0.05$),聚丙烯酰胺(C)对土壤酸性磷酸酶、脲酶和

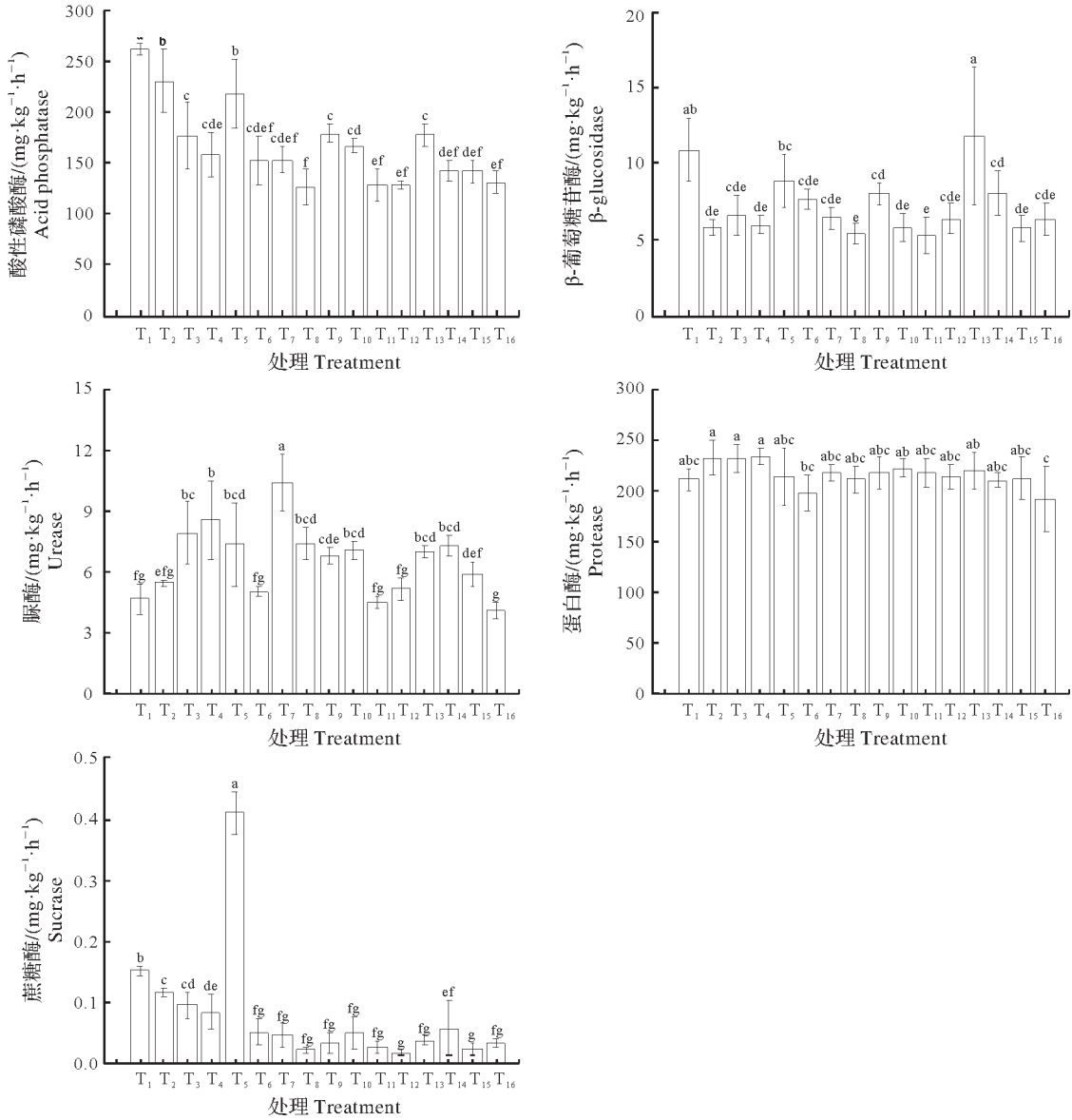


图 5 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤酶活性的影响

Fig.5 Effect of composite soil conditioner on enzyme activity in rare earth tailings soil

蔗糖酶改良的影响显著($P<0.05$),腐植酸(D)对土壤蔗糖酶改良的影响显著($P<0.05$)。四因素对土壤酸性磷酸酶改良作用由大到小依次为B、A、C和D,最优改良组合是 $A_1B_1C_2D_3$;对土壤 β -葡萄糖苷酶影响作用由大到小依次为B、D、C和A,最优改良组合是 $A_2B_1C_4D_1$;对土壤脲酶的影响程度由大到小依次为C、A、B和D,最优水平组合是 $A_2B_3C_4D_1$;对土壤蛋白酶活性的改良影响由大到小依次为C、A、D和B,最优改良组合为 $A_1B_4C_4D_2$;对土壤蔗糖酶的影响顺序由大到小依次为B、A、C和D,最优改良组合为 $A_1B_1C_2D_3$ 。

2.3 复合土壤改良剂综合效应分析

采用综合评分法中的排队评分法,将不同土壤改良处理所测的物理指标、化学指标、酶活性指标等17个关键指标全部作为评价对象,对每一项指标的优缺点进行综合分析,并对其进行排序,从而给出打分值。将每个处理下所有指标的分数相加即得综合评分,如表3所示, T_5 处理添加的复合改良剂试验综合评分最高,为83.32分,即试验条件为 $A_2B_1C_2D_3$, T_{16} 处理的综合评分最低,为51.66分,即试验条件为 $A_4B_4C_1D_3$ 。依据各处理试验的综合评分,进行极差分析,结果表明,各因素对综合评分影响程度从大到小依次为聚丙烯酰胺(C)、生物炭(B)、凹凸棒土(A)和腐植酸(D),各因素综合评分的平均值最大分别为19.06、18.95、19.18、17.91。综上所述,对稀土尾矿土壤物理性质、化学性质及酶活性影响最优的复合土壤改良剂配方为 $A_2B_1C_4D_4$,即凹凸棒土10 g/kg、生物炭0 g/kg、聚丙烯酰胺3 g/kg和腐植酸3 g/kg。

表3 正交试验排队评分法极差分析表

Tab.3 Range analysis table of orthogonal test queuing scoring method

处理 Treatment	凹凸棒土 (A) Attapulgit	生物炭 (B) Biochar	聚丙烯酰胺 (C) Polyacrylamide	腐植酸 (D) Humic acid	容重 Bulk density	pH	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Rapidly available potassium	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus
T_1	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)	1.25	1.41	6.80	4.18	1.00	1.69	8.18	10.00
T_2	1(0)	2(2)	2(1)	2(1)	5.08	1.00	7.17	1.96	4.77	1.30	7.71	9.43
T_3	1(0)	3(4)	3(2)	3(2)	6.95	3.77	7.43	2.11	1.92	1.00	2.87	6.62
T_4	1(0)	4(6)	4(3)	4(3)	10.00	3.31	7.55	2.24	3.10	1.94	4.85	5.03
T_5	2(10)	1(0)	2(1)	3(2)	3.72	4.63	5.72	1.56	10.00	4.86	6.50	5.03
T_6	2(10)	2(2)	1(0)	4(3)	3.21	10.00	4.62	4.69	3.01	3.73	5.15	5.38
T_7	2(10)	3(4)	4(3)	1(0)	8.21	5.25	10.00	1.00	2.77	3.84	10.00	9.97
T_8	2(10)	4(6)	3(2)	2(1)	5.66	9.16	7.63	5.22	4.11	3.87	4.13	8.95
T_9	3(20)	1(0)	3(2)	4(3)	6.71	2.53	5.69	6.46	2.28	6.62	7.90	8.31
T_{10}	3(20)	2(2)	4(3)	3(2)	5.55	1.00	6.31	4.38	4.20	6.14	5.54	8.08
T_{11}	3(20)	3(4)	1(0)	1(0)	2.74	3.87	1.91	7.41	3.63	5.67	6.05	3.49
T_{12}	3(20)	4(6)	2(1)	2(1)	3.28	3.97	1.76	10.00	5.00	5.89	1.00	4.29
T_{13}	4(30)	1(0)	4(3)	2(1)	4.47	2.04	7.79	3.19	1.74	9.39	4.80	3.39
T_{14}	4(30)	2(2)	3(2)	1(0)	3.56	2.78	4.13	9.27	3.19	9.09	4.56	2.69
T_{15}	4(30)	3(4)	2(1)	4(3)	2.82	5.70	1.00	8.26	4.71	10.00	6.62	1.26
T_{16}	4(30)	4(6)	1(0)	3(2)	1.00	1.15	1.24	6.58	4.17	8.40	5.39	1.00

处理 Treatment	凹凸棒土 (A) Attapulgit	生物炭 (B) Biochar	聚丙烯酰胺 (C) Polyacrylamide	腐植酸 (D) Humic acid	全钾 Total potassium	有机质 Organic matter	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	脲酶 Urease	蛋白酶 Protease	蔗糖酶 Sucrase	综合得分 Overall score
T_1	1(0)	1(0)	1(0)	1(0)	1.54	1.00	10.00	8.77	1.77	5.13	4.06	66.79
T_2	1(0)	2(2)	2(1)	2(1)	4.72	3.96	7.92	1.66	2.90	9.74	3.25	72.56
T_3	1(0)	3(4)	3(2)	3(2)	1.46	6.72	4.36	2.79	6.40	9.38	2.77	66.54
T_4	1(0)	4(6)	4(3)	4(3)	3.39	9.23	3.11	1.94	7.32	10.00	2.53	75.54

续表												
处理 Treatment	凹凸棒土 (A) Attapulgite	生物炭 (B) Biochar	聚丙烯酰胺 (C) Polyacrylamide	腐植酸 (D) Humic acid	全钾 Total potassium	有机质 Organic matter	酸性 磷酸酶 Acid phosphatase	β-葡萄糖 苷酶 β-glucosidase	脲酶 Urease	蛋白酶 Protease	蔗糖酶 Sucrase	综合 得分 Overall score
T ₅	2(10)	1(0)	2(1)	3(2)	2.72	4.00	7.14	5.97	5.62	5.84	10.00	83.32
T ₆	2(10)	2(2)	1(0)	4(3)	1.00	10.00	2.77	4.34	2.32	2.36	1.76	64.34
T ₇	2(10)	3(4)	4(3)	1(0)	1.77	6.57	2.79	2.56	10.00	6.54	1.62	82.90
T ₈	2(10)	4(6)	3(2)	2(1)	3.27	8.37	1.00	1.10	5.67	5.10	1.10	74.34
T ₉	3(20)	1(0)	3(2)	4(3)	5.11	3.25	4.51	4.78	4.83	6.36	1.33	76.68
T ₁₀	3(20)	2(2)	4(3)	3(2)	5.21	5.82	3.70	1.69	5.20	7.53	1.72	72.07
T ₁₁	3(20)	3(4)	1(0)	1(0)	4.32	6.66	1.17	1.00	1.54	6.63	1.19	57.29
T ₁₂	3(20)	4(6)	2(1)	2(1)	7.13	8.22	1.17	2.53	2.51	5.88	1.00	63.61
T ₁₃	4(30)	1(0)	4(3)	2(1)	8.73	2.79	4.40	10.00	5.11	7.10	1.43	76.36
T ₁₄	4(30)	2(2)	3(2)	1(0)	8.35	4.04	2.03	4.83	5.51	4.99	1.91	70.95
T ₁₅	4(30)	3(4)	2(1)	4(3)	10.00	5.93	2.03	1.62	3.55	5.45	1.14	70.08
T ₁₆	4(30)	4(6)	1(0)	3(2)	7.67	7.94	1.33	2.46	1.00	1.00	1.33	51.66
K ₁	281.42	303.15	240.08	284.25								
K ₂	304.90	279.92	289.57	280.55								
K ₃	269.65	276.81	288.50	273.59								
K ₄	269.04	265.15	306.87	286.63								
k ₁	17.59	18.95	15.01	17.77								
k ₂	19.06	17.49	18.10	17.53								
k ₃	16.85	17.30	18.03	17.10								
k ₄	16.82	16.57	19.18	17.91								
R	2.24	2.37	4.17	0.82								

2.4 望江南生长验证试验

根据综合评价筛选出的最优组合进行望江南生长验证试验。由表 4 可知,添加由凹凸棒土 10 g/kg、生物炭 0 g/kg、聚丙烯酰胺 3 g/kg、腐植酸 3 g/kg 配制而成的复合土壤改良剂显著促进了望江南的生长,其中在未经改良的稀土尾矿土中望江南的出苗率、株高、主根长、地径分别为 16.67%、10.08 cm、6.11 cm、1.67 mm;而在改良土中的出苗率、株高、主根长、地径分别为 41.67%、56.94 cm、28.36 cm、5.71 mm。与未经改良的稀土尾矿土相比,改良土中的出苗率、株高、主根长、地径分别显著增加了 149.97%、464.88%、364.16%、241.92%($P<0.05$)。表明添加由凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺、腐植酸 4 种物质组成的复合土壤改良剂可以有效改善稀土尾矿的土壤环境,促进望江南的生长。

表 4 望江南在不同土壤中的出苗率及差异比较

Tab.4 Comparison of seedling emergence rate and differences in different soils in the south of *Cassia occidentalis*

处理 Treatment	出苗率/% Emergence rate	株高/cm Plant height	主根长/cm Main root length	地径/mm Ground diameter
稀土尾矿土 Rare earth tailing soil	16.67±2.70 ^b	10.08±1.60 ^b	6.11±1.08 ^b	1.67±0.23 ^b
改良土 Improved soil	41.67±5.77 ^a	56.94±7.92 ^a	28.36±3.92 ^a	5.71±0.77 ^a

表中数据均为平均值±标准差;同列中数据后小写字母表示处理间在α=0.05水平的差异显著性。

The data in the table are mean ± standard deviations. Lowercase letters behind data in a column indicate significance of differences between treatments at the 0.05 level.

3 讨论

3.1 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的影响

土壤的理化性质及酶活性在一定程度上能反映出土壤的健康状况。在本试验中,添加由凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸组成的复合土壤改良剂显著改善了稀土尾矿土壤的理化性质及酶活性。其中凹凸棒土和聚丙烯酰胺这2种改良剂对土壤理化性质的改良影响较大,这可能是因为凹凸棒土是一种具链层状结构的含水富镁铝硅酸盐黏土矿物,其自身的碱性较高,同时储备了大量的矿物元素,因此将其施入土壤中可以中和土壤的酸性,提高土壤的pH值,增加土壤的阳离子交换性,使土壤中的 H^+ 或 NH_4^+ 的含量增加,进而促进土壤中缓效态的氮、磷、钾元素转化为速效态^[21]。而聚丙烯酰胺作为一种高分子的聚合物,具有较好的凝絮和团聚作用,当它在水中溶解后,其分子会同土壤颗粒互相作用,形成体积很大的絮团,使土壤结构变疏松,达到降低土壤容重的效果^[22]。前人的研究^[23]发现,聚丙烯酰胺可促进土壤对氮和钾的吸附与固定,但会减弱土壤对磷的吸附与固定。而在本研究中发现,聚丙烯酰胺的添加对土壤有效磷和全磷改良的影响均显著,这可能是因为本研究中所选用的是阳离子型聚丙烯酰胺,它与 PO_4^{3-} 的离子属性相反,异性相吸,因此对于磷素的亲和力较强,施入土壤中有助于增加土壤对磷的吸附^[24]。

有机质是衡量土壤健康状况的基本指标之一,土壤酶能催化多种生化反应,促进植物生长和养分循环^[25]。在本试验中,生物炭对土壤有机质和酶活性改良的作用最大。生物炭的添加促进了土壤中有机质含量的增加,这是因为生物炭为富碳材料,自身的有机质含量就是其他改良剂的好几倍甚至是几百倍,将其施入土壤相当于直接向土壤中输入外源有机质^[26],因此生物炭对土壤中有机质的改良效果最好。但在本试验中还发现,生物炭的添加对土壤中酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶和蔗糖酶的活性有显著的抑制作用,这可能是与生物炭的吸附能力有关。有研究表明生物炭不仅能吸附反应底物,同时也能吸附酶分子^[27]。当生物炭添加量过高时,以吸附酶分子为主,会阻碍某些酶促反应的进行。因此考虑到综合效益,在本研究中生物炭以不添加为最佳。

3.2 复合土壤改良剂对稀土尾矿植物生长的影响

植物之所以在稀土尾矿上难以正常生长,是因为稀土尾矿土壤容重大、透气性差、保水保肥能力弱,易板结和干旱,土壤偏酸且养分极度匮乏^[28],这对植物生长极为不利。大量研究表明,凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸用于改良土壤后,能够改善土壤理化性质^[29],增加土壤养分,进而促进植物生长^[30-31];杨桥^[32]研究表明在稀土尾矿土壤中添加生物炭和腐植酸能够增加土壤肥力,促进黑麦草的生长。本研究结果表明,添加凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺和腐植酸后,显著改善了稀土尾矿植被定植的限制性条件。经过改良,土壤的容重明显减小,其通透性得到显著增强,保水保肥的能力亦有所提升,进而增加了土壤中可利用的氧气和水分,有效提高了种子的出苗率;同时,土壤pH值的升高也为植物的生长发育创造了更为适宜的土壤环境;此外,土壤养分含量的增加,意味着可供植物吸收的营养成分有所丰富,进一步改善了植物的生长条件。综上,复合土壤改良剂的应用,有效改善了土壤的物理结构与养分状况,促进了望江南植株的生长发育,为稀土尾矿地区的生态修复提供了技术支撑。

4 结论

复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的改善具有积极作用。在本试验中,4种土壤改良剂对土壤铵态氮、硝态氮、蔗糖酶的改良效果均显著,其中凹凸棒土和聚丙烯酰胺对土壤容重、pH、有效磷、全钾、酸性磷酸酶、脲酶、蛋白酶的改良效果显著;生物炭对土壤pH、有机质、酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶的改良效果显著;腐植酸对土壤有效磷、有机质的改良效果显著。排队评分法结果表明,复合土壤改良剂的最优配方为 $A_2B_1C_4D_4$ (凹凸棒土10 g/kg,生物炭0 g/kg,聚丙烯酰胺3 g/kg,腐植酸3 g/kg)。植物验证试验结果表明,望江南在改良后的土壤上生长良好。综上,在稀土尾矿土壤修复及植被恢复中,可选用凹凸棒土、生物炭、聚丙烯酰胺以及腐植酸作为改良剂。

致谢:江西省教育厅科技项目(GJJ13279)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] HUGHES I D, DANE M, ERNST A, et al. Lanthanide contraction and magnetism in the heavy rare earth elements[J]. Na-

- ture, 2007, 446(7136): 650-653.
- [2] 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.
PENG Y, HE G J, ZHANG Z M, et al. Eco-environmental dynamic monitoring and assessment of rare earth mining area in southern Ganzhou using remote sensing[J]. Acta ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1676-1685.
- [3] XIAO Y F, LIU X S, FENG Z Y, et al. Role of minerals properties on leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Journal of rare earths, 2015, 33(5): 545-552.
- [4] OU X L, CHEN Z B, CHEN X L, et al. Redistribution and chemical speciation of rare earth elements in an ion-adsorption rare earth tailing, Southern China[J]. Science of the total environment, 2022, 821: 153369.
- [5] LE S, QIAN J Z, ZHANG F W, et al. An ecological remediation model combining optimal substrate amelioration and native hyperaccumulator colonization in non-ferrous metal tailings pond[J]. Journal of environmental management, 2022, 322: 116141.
- [6] 刘欢平, 郑彩霞, 石琪仙, 等. 聚丙烯酰胺与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 121-127.
LIU H P, ZHENG C X, SHI Q X, et al. Effect of mixed application of polyacrylamide and humic acid on water infiltration characteristics of purple soil[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2023, 43(4): 121-127.
- [7] 魏彦凤, 王继涛, 李文慧, 等. 凹凸棒土-生物炭缓释材料对养分缓释及小白菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 121-132.
WEI Y F, WANG J T, LI W H, et al. Effects of attapulgite-biochar composites on nutrient slow-release in pakchoi field and the growth of pakchoi[J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(22): 121-132.
- [8] 杨婷, 吴军虎. 凹凸棒土对土壤团粒结构及水力参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 46-51.
YANG T, WU J H. Effect of attapulgite on soil aggregate structure and hydraulic parameters[J]. Agricultural research in the arid areas, 2017, 35(6): 46-51.
- [9] JONG H, YONG S, SE W K, et al. Characteristics of biochars derived from fruit tree pruning wastes and their effects on lead adsorption[J]. Journal of the Korean society for applied biological chemistry, 2015, 58(5): 751-760.
- [10] 周冉冉, 马司光, 张文晶, 等. 生物炭与生物基质对设施黄瓜连作土壤改良效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(3): 537-546.
ZHOU R R, MA S G, ZHANG W J, et al. The effect of biochar and biological substrate on soil amending under protected cucumber continuous cropping[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(3): 537-546.
- [11] 杨侨, 赵龙, 侯红, 等. 土壤改良剂对赣南废弃稀土尾矿的改良效应[J]. 应用化工, 2018, 47(2): 211-214.
YANG Q, ZHAO L, HOU H, et al. Effect of soil ameliorants on abandoned rare mine tailing in Jiangxi Province[J]. Applied chemical industry, 2018, 47(2): 211-214.
- [12] MARINA F J, GINEVAR F, THOMAS M, et al. Reclamation of acid soils with biomass ashes from pyrolytic wood liquefaction[J]. Waste and biomass valorization, 2020, 11(9): 5067-5078.
- [13] 孙波, 吕春娟. 聚丙烯酰胺在土壤改良中的应用[J]. 水土保持应用技术, 2020, 40(6): 23-26.
SUN B, LYU C J. Application of polyacrylamide in soil improvement[J]. Soil and water conservation application technology, 2020, 40(6): 23-26.
- [14] MARINHO J J L, PISCOYA V C, FERNANDES M M, et al. Carbon dynamics in humic fractions of soil organic matter under different vegetation cover in southern Tocantins[J]. Floresta ambiente, 2021, 28(2): e20200024.
- [15] 杨婷. 凹凸棒土添加对黄土高原典型土壤水分有效性与玉米生长生理特性的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
YANG T. Effects of attapulgite on soil water effectiveness and physiological characteristics of maize growth of typical soils on the loess plateau[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.
- [16] 汪洋, 艾艳梅, 陈泓璐, 等. 生物炭对铜矿区排土场污染土壤理化性质和重金属形态的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 444-450.
WANG Y, AI Y M, CHEN H L, et al. Effects of biochar on the physical and chemical properties and heavy metal forms of polluted soil in the dump of copper mining area[J]. Research of soil and water conservation, 2023, 30(2): 444-450.
- [17] 李长江, 丛海涛, 李青梅, 等. 不同土壤调节剂对新增耕地土壤质量以及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, 60(9): 50-58.
LI C J, CONG H T, LI Q M, et al. Effects of different soil conditioner on soil quality and maize yield on new cultivated land

- [J]. Soil and fertilizer in China, 2023, 60(9): 50-58.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 王晟强, 张喆, 叶绍明. 桂南茶园土壤团聚体酶活性对植茶年限的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6532-6541.
WANG S Q, ZHANG Z, YE S M. Response of soil aggregate-associated enzyme activities to tea planting age in the hilly region of southern Guangxi, China[J]. Acta ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6532-6541.
- [20] 朱宏达, 李建安, 廖科, 等. 油茶低产林改造剩余物基质的保水保肥效应[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(11): 63-72.
ZHU H D, LI J A, LIAO K, et al. Effect of water and fertilizer conservation based on transforming residue matrix of low-yield *Camellia oleifera* forest[J]. Journal of central south university of forestry and technology, 2023, 43(11): 63-72.
- [21] 林海, 靳晓娜, 董颖博, 等. 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 945-952.
LIN H, JIN X N, DONG Y B, et al. Effects of bentonite on chemical forms and bioavailability of heavy metals in different types of farmland soils[J]. Environmental science, 2019, 40(2): 945-952.
- [22] 员学锋. PAM的土壤保水、保肥及作物增产效应研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2003.
YUAN X F. Study of PAM on water conservation, fertilizer conservation and increasing yield[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2003.
- [23] 张艳艳, 唐泽军. PAM调控土壤养分元素迁移与流失试验研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 33-39.
ZHANG Y Y, TANG Z J. Regulation and control of PAM on vertical transport and leaching loss of soil nutrient[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2017, 37(4): 33-39.
- [24] 杨雪芹. 不同结构改良剂对土壤中磷吸附、解吸和迁移的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
YANG X Q. Effects of soil amendment on phosphorus adsorption and desorption and migration in lou soil[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2006.
- [25] 洪彪, 李明, 黄结雯, 等. 连作对广藿香扦插苗土壤微生物及酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3): 438-447.
HONG B, LI M, HUANG J W, et al. Effects of continuous cropping on microorganism and enzyme activities in the restubble soil of patchouli[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(3): 438-447.
- [26] 赵亚鹏, 贾辉, 符云鹏, 等. 施用等碳量生物炭和腐熟秸秆对土壤养分及有机碳库的影响[J]. 烟草科技, 2020, 53(1): 12-20.
ZHAO Y P, JIA H, FU Y P, et al. Effects of biochar and decomposed straw at equal carbon content on soil fertility and organic carbon pool[J]. Tobacco science and technology, 2020, 53(1): 12-20.
- [27] 王晨. 4种原料制备的生物炭对土壤Zn、Cd形态及土壤酶活性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
WANG C. Effects of biochar prepared by 4 kinds of raw material on Zn, Cd forms and enzyme activities in soils abstract [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [28] 罗才贵, 罗仙平, 周娜娜, 等. 南方废弃稀土矿区生态失衡状况及其成因[J]. 中国矿业, 2014, 23(10): 65-70.
LUO C G, LUO X P, ZHOU N N, et al. Status and causes of ecological imbalance of abandoned rare-earth mine in south China[J]. China mining magazine, 2014, 23(10): 65-70.
- [29] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1842-1849.
YAN J P, DING X D, CUI L, et al. Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil[J]. Journal of agro-environment science, 2018, 37(9): 1842-1849.
- [30] 李万宁, 刘翠翠, 王东新, 等. 生物炭-蚯蚓粪-腐殖酸联合改良土壤研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(5): 12-19.
LI W N, LIU C C, WANG D X, et al. Study on soil improvement by combining biochar-earthworm manure-humic acid[J]. China resources comprehensive utilization, 2023, 41(5): 12-19.
- [31] 曾庆阳, 熊振宇, 张书扬, 等. 改性木屑和稻壳生物炭对土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1066-1075.
ZENG Q Y, XIONG Z Y, ZHANG S Y, et al. Effects of modified sawdust and rice husk biochar on cadmium forms in soil and cadmium uptake by rice[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1066-1075.
- [32] 杨侨. 稀土矿废弃地植物-微生物-改良剂联合生态修复效果研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
YANG Q. Study on ecological restoration effect of plant-microorganism-modifier in rare earth mine wasteland[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.