

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2024.05.08

煤矸石土壤调理剂对毛乌素沙地柳枝稷生长的影响

朱磊¹, 古文哲¹, 刘小铭², 李强², 马泳波², 张新富¹, 樊明景³, 刘江涛⁴

(1. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西西安 710054; 2. 榆林学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000; 3. 陕西汇森能源科技有限公司, 陕西榆林 719000; 4. 榆林环境保护工程有限责任公司, 陕西榆林 719000)

摘要: 提高毛乌素沙地保水保肥性能, 旨在为黄河“几”字弯生态保护与高质量发展提供理论支持。为了探究煤矸石对毛乌素沙地的改良效果, 以柳枝稷为指示作物, 采用随机区组设计, 设置煤矸石土壤调理剂含量分别为 0%(CK)、90%(ST1)、84%(ST2)、78%(ST3)、66%(ST4)、54%(ST5), 研究不同煤矸石含量的土壤调理剂对毛乌素沙地土壤性质和柳枝稷农艺指标的影响。结果表明, 添加煤矸石土壤调理剂可有效改善风沙土壤物理结构。其中, 与 CK 相比, ST1 处理含水率提高最多, 增加 41.36%; ST3 处理土壤容重较 CK 降低最多, 降低 19.91%; ST4 处理对风沙土孔隙度的提升最为显著, 相比 CK 增加 5.31%。煤矸石土壤调理剂促进了沙地柳枝稷生长。与 CK 相比, 施用煤矸石土壤调理剂能够显著提高柳枝稷株高, 其中, ST4 处理对柳枝稷的株高增长效果最为显著, 较 CK 增长 54.3%; ST2 处理则对柳枝稷地上生物量提升效果最为显著, ST3 处理对地下生物量提升最显著, 相比 CK 分别增长 57.26%、31.47%。主成分分析结果表明, 与 CK 相比, 煤矸石土壤调理剂处理组得分以 ST2 最佳, 得分为 0.40。因此, 改善毛乌素沙地土壤性质的最佳煤矸石土壤调理剂含量为 84%。

关键词: 煤矸石; 土壤调理剂; 改良土壤; 柳枝稷

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)05-0060-08

Effects of Coal Gangue Soil Conditioner on Growth of Switch Grass in Mu Us Sandy Land

ZHU Lei¹, GU Wenzhe¹, LIU Xiaoming², LI Qiang², MA Yongbo²,
ZHANG Xinfu¹, FAN Mingjing³, LIU Jiangtao⁴

(1. China National Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Ecological Restoration in Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China; 3. Shaanxi Huiyaomiao Energy Technology Co., Ltd., Yulin 719000, China; 4. Yulin Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: The purpose of improving the water and fertilizer retention performance of Mu Us Sandy Land is to provide theoretical support for the ecological protection and high-quality development of the "Ji" bend of the Yellow River. In order to explore the improvement effect of coal gangue on Mu Us Sandy Land, in this study, switch grass was taken as the indicator plant, and the content of soil conditioners of coal gangue was set to 0%(CK), 90%(ST1), 84%(ST2), 78%(ST3), 66%(ST4), and 54%(ST5) by random block method. The effects of soil conditioners with different coal gangue content on soil properties and agronomic indexes of switch grass in Mu Us Sandy Land were studied. The results showed that adding coal gangue soil conditioners could effectively improve the physical structure of aeolian sand soil. Among them, compared with CK, under ST1 treatment, water content increased the most, by 41.36%. The bulk density of soil under ST3 treatment decreased by 19.91% compared with CK. ST4 treatment had the most significant improvement on the porosity of aeolian sand soil, the value increased by 5.31% compared with CK. The soil conditioners of coal gangue promoted the growth of switch grass on sandy land. Compared with CK, the application of coal gangue soil conditioners could significantly increase the plant height of switch grass. Among them, ST4 treatment had the most significant increase effect on the plant height of switch grass, it increased by 54.3% compared with CK; ST2 treatment had the most significant increase effect on the aboveground biomass of switch grass and ST3 treatment had the most significant increase effect on the underground biomass, compared with CK, the increase of the biomass was 75.60% and 83.17%, respectively. Principal component analysis showed that ST2 had the best score in the treatment groups of coal gangue soil conditioners compared with CK, and the score was 0.40. Therefore, the best proportion of coal gangue soil conditioner to improve soil properties in Mu Us Sandy Land was 84%.

收稿日期: 2024-06-22

基金项目: 陕西省特支计划专项(TZRC-04); 陕西省教育厅创新团队项目(2023-63); “土壤-微生物-植物”耦合提高陕北矿区排土场土壤质量技术研究项目(1507-2020SF-419)

作者简介: 朱磊(1982-), 男, 安徽阜阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事矿区固废利用及生态修复研究工作。

通信作者: 李强(1986-), 男, 陕西榆林人, 教授, 主要从事多源固废协同矿山生态修复研究工作。

Key words: coal gangue; soil conditioner; improving the soil; switch grass

毛乌素沙地是典型的农牧交错带^[1],是京津冀地区主要沙尘源^[2],是黄河“几”字弯风沙防治“攻坚战”的前沿阵地^[3],也是我国重要能源战略基地和北方生态安全屏障重点建设区域^[4]。毛乌素沙地土壤具有粒径大、结构松散、难以形成团聚体、渗透能力强等特性^[5-6]。这些特性导致沙地土壤保水保肥能力差,水肥利用效率低,使得沙地农业和草业经济效益较低^[7]。因此,进行沙地土壤改良至关重要,这将有助于防治土壤荒漠化、改善生态环境,推动土壤改良的良性发展。但目前利用煤矸石针对毛乌素沙地土壤改良却鲜有报道。

煤矸石是黄河“几”字弯煤化工排放的主要工业固体废弃物,其资源化利用一直是国内外学者专家关注的热点问题。煤矸石因其含有 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等多种无机质成分,可有效治理土壤板结、沙化、盐碱化等现象,提高土壤渗透性,增加土壤的保水保肥能力,促进微量元素更好地被植物根系吸收。已有研究表明,在土壤中施入煤矸石能够有效改善土壤性质,增强土壤保水保肥能力,防止土壤退化^[8-12]。

煤矸石在土壤改良领域,前人已经取得了一系列研究进展。自20世纪90年代起,就有学者开始探索煤矸石在土壤改良中的应用。孙海蓉等^[13]通过将煤矸石粉末与土壤混合研究发现,其可有效降低土壤pH值,提高土壤氧化还原电位;将其制备成土壤改良剂后发现,这种改良剂能够显著提高土壤肥力和改善土壤结构。BLAGODATSKAYA等^[14]

则进一步研究了煤矸石对土壤微生物的影响,发现煤矸石土壤改良剂可以增加土壤微生物的生物量,从而提高土壤的生态系统功能。周昊等^[15]将煤矸石、粉煤灰、土壤进行复配,白三叶的株高与对照组持平,但生长状况显著提升。这些研究结果为煤矸石在土壤改良中的应用提供了理论基础和实践支持。然而,尽管前人的研究已经取得了一定的成果,但仍存在一些问题和空白点。首先,对于煤矸石的活化过程研究较少,如何更好地利用煤矸石中的有效成分来提高土壤肥力仍需进一步探索;其次,以煤矸石为主要原材料针对沙地改良方面研究还缺乏关注。

本研究以煤矸石为主要原料,并与发酵的羊粪、微生物菌剂等材料复配对煤矸石进行活化,最终研制成煤矸石土壤调理剂,将其应用于毛乌素沙地土壤改良,通过田间小区试验,探索土壤调理剂施用后对风沙地土壤性质和柳枝稷生长的影响,期为煤矸石的综合利用和沙地退化土壤的改良提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省榆林市芹河镇纪小滩村(109°50′48″E,38°7′15″N)。该地海拔1 130 m,年平均温度为8.0℃,年无霜期120~140 d,年降雨量400 mm,属于典型的半干旱沙土地。供试土壤0~20 cm基本理化性质见表1。

表1 供试土壤0~20 cm基本理化性质
Tab.1 Basic physical and chemical properties of the test soil in 0-20 cm

有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	碱解氮/(mg/kg) Alkali hydrolyzed nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	pH
1.12	0.07	0.11	6.36	1.54	37	8.37

1.2 试验材料

煤矸石取自榆林市某煤矿,其主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,分别占总质量的48.19%和19.01%,煤矸石经破碎、过筛,取粒径2~5 mm的煤矸石;脱硫石膏取自榆林市某电厂;羊粪取自榆林市某羊场;菌剂为榆林学院多源固废协同矿山生态修复课题组自行研制(登记编号为GDMCC202311320)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,共设置6个处理,

其中,处理组均施用了土壤调理剂,施用量为45 t/hm²,而煤矸石占比则分别为ST1(90%)、ST2(84%)、ST3(78%)、ST4(66%)、ST5(54%),同时设对照组(CK)。每个处理均包含3次独立重复。试验过程中,将预先称量好的煤矸石土壤调理剂均匀地撒施在对应小区,随后利用旋耕机将土壤调理剂与土壤进行混合并进行旋耕,耕作深度为40 cm。小区的规格为3 m×4 m,柳枝稷的施种量为3 g/m²。播种方式采用条播,深度为1 cm,行距

50 cm。同时,铺设了滴灌带进行浇水。试验于 2023 年 6 月布设,后续每月上旬观测柳枝稷株高、生物量、叶面积及土壤理化指标等数据。

1.4 测定项目及方法

依据“S”型五点法采集 0~20 cm 土层样品,采用烘干法测定土壤含水率,采用环刀法(100 cm³)测定土壤容重。柳枝稷的株高和叶面积分别使用卷尺和游标卡尺进行测量。在完成数据采集后,将柳枝稷样本放入烘箱进行杀青处理,然后持续烘干至恒质量,以获得生物量数据。

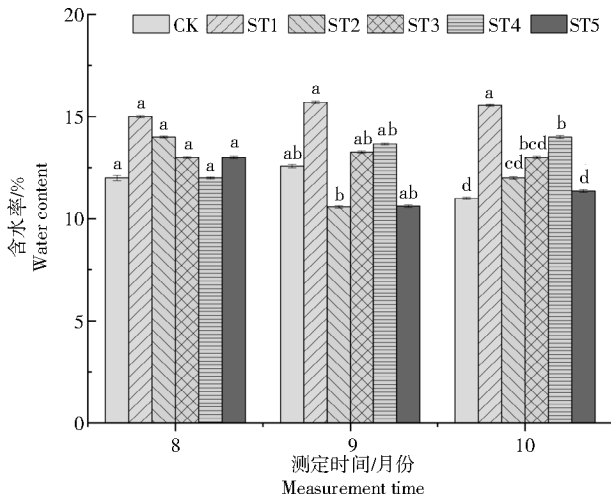
1.5 数据分析

数据分析采用 Office 2010 和 SPSS 13.0 软件,绘图采用 Origin 2022 软件。

2 结果与分析

2.1 煤矸石土壤调理剂对土壤物理性状的影响

2.1.1 土壤含水率分析 土壤含水率是评价土壤肥力的重要指标^[16]。不同处理土壤含水率分析结果如图 1 所示。



不同小写字母表示处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicated that the differences among treatments reached the significant level($P < 0.05$). The same as below

图 1 不同处理土壤含水率分析
Fig.1 Analysis of soil water content in different treatments

从图 1 可以看出,在 8 月份测得各处理的土壤含水率相比于 CK 没有显著差异,而且各处理之间也没有显著差异;9 月份检测的结果显示,相较于 CK,ST1、ST3、ST4 处理含水率分别增加 24.80%、5.41%、8.59%,而 ST2、ST5 处理则均降低 15.82%;其中,ST1 处理增幅最大,ST1 与 ST2 处理间存在显著差异($P < 0.05$);10 月份检测的结果显示,相较于 CK 均有不同程度增加,各处理增幅为 3.27%~

41.36%,其中,ST1 和 ST4 处理分别与 CK 存在显著差异($P < 0.05$)。这一结果说明,施用煤矸石土壤调理剂可以有效提高土壤含水率,其中 ST1 处理的效果最为显著。

2.1.2 土壤容重分析 土壤容重是反映土壤结构状况的一个重要指标,通常风沙土物理结构较差,不利于土壤内部物质的交换和调节^[17]。从图 2 可以看出,8 月份测得的土壤容重结果显示,各处理与 CK 没有显著差异。9 月份检测结果显示,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5 处理的土壤容重与 CK 相比均显著降低($P < 0.05$),降幅为 9.66%~16.55%;10 月检测结果显示,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5 处理的土壤容重与 CK 相比也显著降低($P < 0.05$),降幅为 11.21%~19.9%。可见,施用煤矸石土壤调理剂能够降低风沙地土壤容重。其中,ST3 处理对土壤容重的降低效果最为明显,表明该处理在改善土壤结构、降低土壤容重方面具有较大优势。

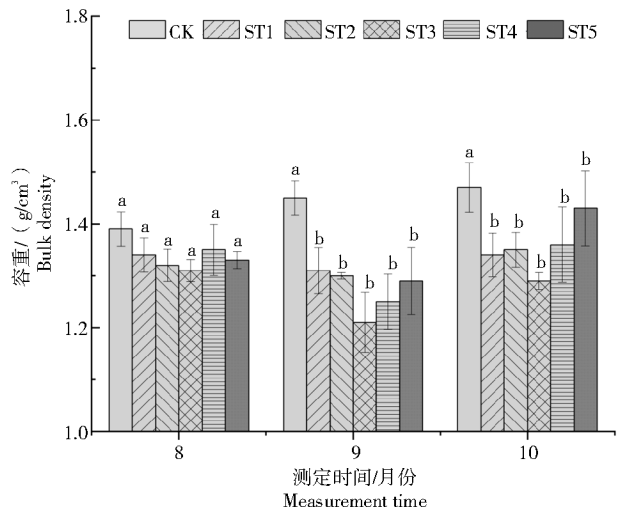


图 2 不同处理土壤容重分析
Fig.2 Analysis of soil bulk density in different treatments

2.1.3 土壤孔隙度分析 土壤孔隙度作为评价土壤结构状况的关键指标,其高低直接影响着土壤中水、气和营养物质的交换与调节。从图 3 可以看出,与 CK 相比,ST1、ST2 和 ST3 处理在 8 月份测得的土壤孔隙度有不同程度提升,增幅为 0.97%~4.23%,而处理 ST4 和 ST5 的孔隙度则有所下降,分别减少了 5.31% 和 2.35%。9 月份的检测结果显示,相较于 CK,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5 处理的孔隙度都有所增加,增幅为 4.12%~5.80%,ST1 处理与 CK 相比存在显著性差异($P < 0.05$)。10 月份测得的结果显示,各处理与 CK 间没有显著性差异。

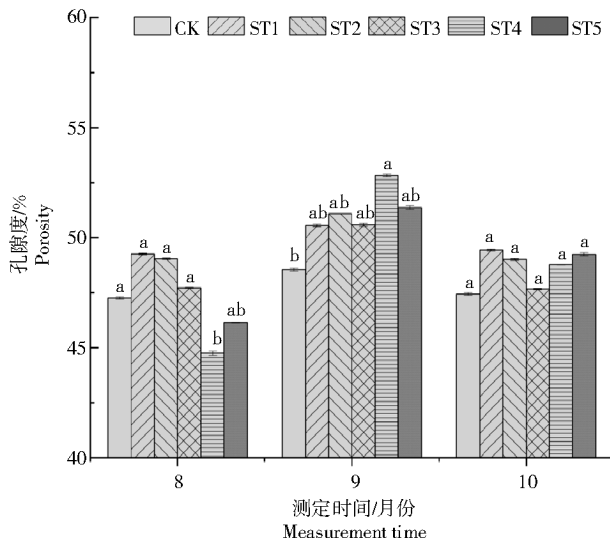


图3 不同处理土壤孔隙度分析
Fig.3 Analysis of soil porosity in different treatments

2.2 煤矸石土壤调理剂对柳枝稷生长的影响

2.2.1 株高 株高可以直接反映植物生长状况。从图4可以看出,施用煤矸石土壤调理剂对沙地柳枝稷生长有着显著影响。与CK相比,各处理组在8月份测得的株高均有所增加,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5处理增幅为19.21%~36.24%,其中ST4处理提升最高,为36.24%,各处理与CK均存在显著性差异($P < 0.05$),但各处理间差异不显著。9月份测得株高结果显示,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5处理相比于CK增幅为13.75%~54.3%,其中,ST4处理增幅最大,为54.30%,ST4处理与CK、ST1、ST2处理均存在显著性差异($P < 0.05$)。10月测得的结果显示,相比CK,各处理的增幅为12.81%~34.82%,其中,ST4处理增幅最大,为34.82%,ST4处理与CK相比差异显著($P < 0.05$)。

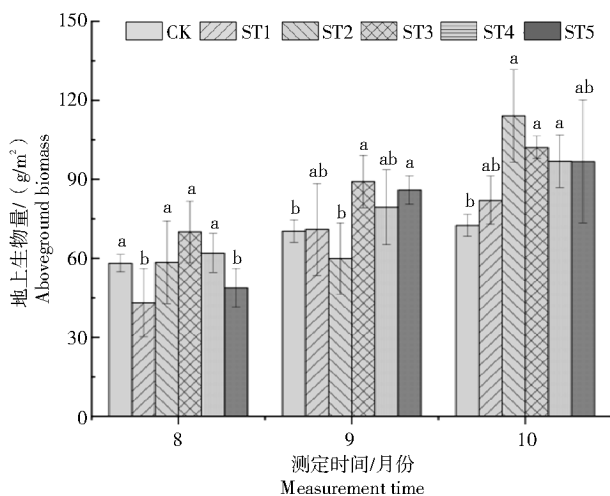


图5 不同处理柳枝稷地下/地上生物量分析
Fig.5 Analysis of under/aboveground biomass of switch grass in different treatments

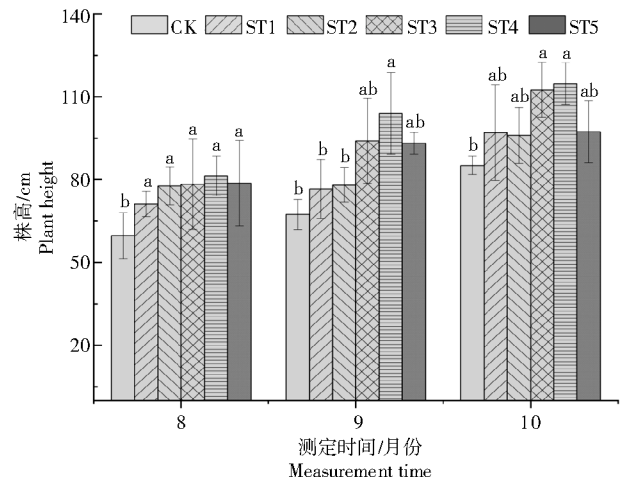
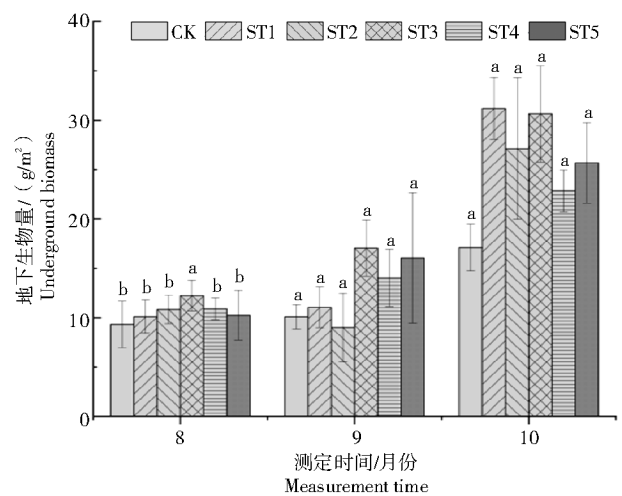


图4 不同处理柳枝稷株高分析
Fig.4 Analysis of plant height of switch grass in different treatments

2.2.2 生物量 植物生物量是评估生长状况的直接指标。由图5可知,8月份测得的柳枝稷地上生物量,ST2、ST3、ST4处理与CK相比没有显著性差异,ST1和ST5处理的地上生物量较CK分别显著降低了25.80%和16.07% ($P < 0.05$);9月份测得的结果显示,ST3和ST5处理的地上生物量分别较CK显著增加26.89%和22.12% ($P < 0.05$),其余处理与CK相比没有显著性差异;10月份测得的结果显示,相比CK,ST1、ST2、ST3、ST4、ST5处理增幅为13.09%~57.26%,其中,ST2处理增幅最大,为57.26%,ST2、ST3、ST4处理与CK相比存在显著性差异($P < 0.05$)。8月份测得的柳枝稷地下生物量结果显示,ST3处理与CK相比显著增加31.47% ($P < 0.05$),其他处理与对照没有显著性差异;9月份和10月份测得的结果显示,各处理与CK间均没有显著性差异。



2.2.3 叶面积 不同处理叶面积分析结果如图 6 所示。

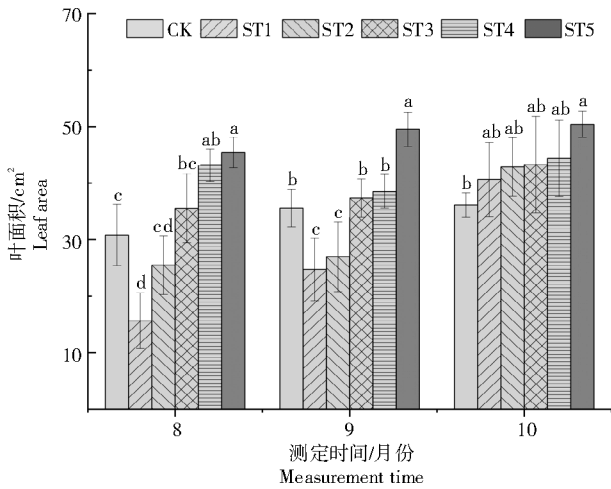


图 6 不同处理叶面积分析
Fig.6 Analysis of leaf area in different treatments

由图 6 可知,8 月份测得的柳枝稷叶面积 ST4 和 ST5 处理显著大于 CK,其中,ST5 处理比 CK 增加 47.48%,ST1 和 ST2 处理的叶面积比 CK 显著减少 49.23% ($P < 0.05$),其他处理与 CK 相比没有显著性差异。9 月份测得的结果显示,ST4 和 ST5 处理的叶面积显著大于 CK ($P < 0.05$),其中,ST5 处理的叶面积较 CK 增加 39.04%,ST1 处理的叶面积与

CK 相比显著减少 ($P < 0.05$),其他处理与 CK 相比没有显著性差异。10 月份测得的结果显示,ST5 处理的叶面积与 CK 相比显著增加 39.52% ($P < 0.05$),其他处理与 CK 相比没有显著性差异。

2.3 综合评价体系的建立

各种处理对风沙土的土壤特性和柳枝稷的生长都有一定影响,但目前缺乏一个统一的标准来全面评估这些影响。虽然某些处理在一个指标上表现优异,但在其他指标上可能不理想,说明单一指标无法全面反映处理措施的整体改良效果。因此,采用主成分分析和加权计算方法构建了一个综合评价体系,通过这一体系量化各种处理措施的综合表现,进而确定出最佳的煤矸石土壤调理剂配比方案。

2.3.1 改良效果评价指标相关性分析 表 2 提供了 6 个关键改良效果评价指标间的相关性概览。在评估土壤和植物生长状况时,指标涵盖了土壤的物理性质以及植物的生长特性。土壤物理指标主要包括含水率(X1)、孔隙度(X2)和容重(X3),这些指标能够反映土壤的保水能力、通气性。同时,也关注 3 个关键的植物生长指标:株高(X4)、生物量(X5)和叶面积(X6),这些指标能够直观地反映植物的生长状况。

表 2 土壤物理指标和植物生长指标的相关性分析
Tab.2 Correlation analysis of soil physical indexes and plant growth indexes

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6
X1	1					
X2	0.434	1				
X3	-0.625	-0.419	1			
X4	-0.026	-0.394	-0.256	1		
X5	-0.478	-0.142	0.011	0.742	1	
X6	0.24	-0.452	-0.357	0.604	0.008	1

2.3.2 各成分的特征根与方差贡献率 各主成分的特征根与累积贡献率结果如表 3 所示。

表 3 各主成分的特征根与累积贡献率
Tab.3 Characteristic roots and cumulative contribution rates of each principal component %

特征根 Characteristic root	方差解释率 Variance interpretation rate	累积贡献率 Accumulative contributions ratio
V1 2.32	38.66	38.66
V2 2.05	34.14	72.80
V3 1.17	19.50	92.30

利用主成分分析对 6 项改良效果评价指标进

行评估,得出 3 个主成分(V1、V2、V3)的累计贡献率高达 92.30%。其中,主成分 V1 的特征根为 2.32,贡献了 38.66% 的总变异;主成分 V2 的特征根为 2.05,贡献了额外的 34.14%;而主成分 V3 的特征根为 1.17,贡献了 19.50%。因此,这 3 个主成分共同解释了原始数据中超过 90% 的变异,充分展示了改良效果的全面情况。

2.3.3 主成分以及综合得分 特征向量可以明确地展示每个主成分与原始指标之间的权重关系。所以,这 3 个主成分和 6 个初始指标间的关联可以通过线性组合方程来描述,各成分的函数表达式如下。

$$V1 = -0.348X1 - 0.479X2 + 0.129X3 + 0.543X4 +$$

$$0.486X5+0.317X6 \quad (1)$$

$$V2=0.525X1+0.133X2-0.609X3+0.342X4-0.018X5+0.467X6 \quad (2)$$

$$V3=-0.113X1+0.556X2-0.238X3+0.184X4+0.619X5-0.453X6 \quad (3)$$

2.3.4 改良效果综合评价 通过主成分加权求和的方法可以获得综合评价方程。

$$V=0.419V1+0.370V2+0.211V3 \quad (4)$$

由表4可知,6个处理得分大小排序为ST2>ST3>ST4>ST5>CK>ST1,ST2处理的得分为0.4013,其次是ST3处理,得分为0.393。

表4 主成分及综合得分

Tab.4 Principal components and comprehensive scores

处理 Treatment	F1	F2	F3	F
CK	0.486	-0.018	0.619	0.341 2
ST1	0.129	-0.609	-0.238	0.329 8
ST2	0.317	0.467	-0.453	0.401 3
ST3	0.543	0.342	0.184	0.393 0
ST4	-0.479	0.133	0.556	0.367 3
ST5	-0.348	0.525	-0.113	0.364 0

3 结论与讨论

煤矸石兼具“资源”和“环境”双重属性以及污染“源”和“汇”双重属性^[18],煤矸石中有机物质含量相对较高,掺杂一定量的煤矸石可改善土壤环境,改善土壤的孔隙,提高土壤微生物活力^[19-21]。近年来,学者们已针对煤矸石改良土壤进行了大量有益的探索。

本研究表明,煤矸石土壤调理剂的应用可有效提高土壤的含水率,各处理增幅为3.27%~41.36%。这一结果归因于煤矸石本身具有一定的保水能力。煤矸石中的微小孔隙能够储存水分,并在土壤中形成一个“水库”,缓慢释放水分供植物吸收利用。特别是ST1处理,使其保水性能较其他处理最佳,从而显著提高了土壤的含水率,这与周琛鸿等^[22]研究结果一致。此外,煤矸石的加入也增加了土壤的孔隙度,使土壤结构变得更加疏松,降低了土壤的容重。本研究中,ST3处理对土壤容重的降低效果最为显著,降幅为19.91%;ST4处理对风沙土孔隙度的提升最为显著,增幅为5.31%,原因在于煤矸石相对于风沙土颗粒较大,能在土壤中形成较多的孔隙,且煤矸石由于其本身的物理性质,如颗粒大小、形状和密度等,与土壤中的原生颗粒

有所不同。当煤矸石被添加到土壤中时,由于其颗粒较大,它们会占据一定的空间,形成较大的孔隙。这些孔隙不仅可以储存更多的水分,还可以使土壤整体结构变得更为疏松,从而降低土壤的容重。这与前人研究结果相一致^[23]。但在10月观测期间,CK土壤容重显著高于各处理,这一变化归因于试验小区内水管意外破裂的特定事件。该事件直接导致了CK小区内土壤经历了频繁的干湿循环过程。此干湿交替现象作为环境因素的变化,显著影响了土壤的物理结构,具体表现为土壤颗粒间的紧实度增加,进而引发了土壤容重的上升。聂朝阳等^[24]在盐碱地施用土壤调理剂,土壤容重和硬度分别降低5.2%和5.4%,与本研究结果相似。

株高、生物量、叶面积是反映植物生长的重要指标。张宇航等^[25]研究发现,使用煤矸石处理的植物株高和生物量分别比CK提高了21.45%和25.89%,这与本研究结果基本一致。本研究中,柳枝稷的生长在不同处理条件下与CK相比均存在显著性差异。ST4处理对柳枝稷的株高增长效果最为明显,最大增幅为54.30%,ST2处理则对柳枝稷地上生物量的提升效果最为显著,增幅为57.26%,ST3处理对地下生物量提升最为显著,增幅为31.47%,ST5处理对叶面积增幅最高,为47.48%。具体来说,施用煤矸石土壤调理剂,株高平均增高21.00%,并且在8—10月期间,ST3和ST4处理表现最佳。氮、磷、钾元素作为植物体内蛋白质、核酸、叶绿素、酶等生物大分子的基本构成元素,对于植物的生长和发育具有不可替代的作用。本研究发现,经过微生物活化处理的煤矸石显著提升了植物的株高、生物量和叶面积,这可能主要归因于微生物活化过程中煤矸石中氮、磷、钾等关键养分的释放。微生物通过其特有的代谢活动,可能有效地促进了煤矸石中氮、磷、钾等元素的溶解和转化,使得这些养分更易于被植物根系吸收和利用。这与盛定红等^[26]研究结果相似,他们将蜡状芽孢杆菌、磷石膏、煤矸石进行复配的T2处理优于单加煤矸石肥料的T1处理,与T1处理相比,T2处理的最大叶片面积增加28.37%、茎围增加8.33%、株高增加23.04%。这一研究揭示了微生物与煤矸石在协同作用下促进植物生长方面具有巨大潜力。另有研究表明,将煤矸石与草木灰进行煅烧合成硅肥,硅肥对农作物的生长以及土壤改良有较好效果^[27]。本试验中,施用煤矸石土壤调理剂后,风沙地物理结构、柳枝稷生物学特性都得到极大提高和改

善。这一发现与白博文等^[28]研究结果相似。

本研究中,施用煤矸石土壤调理剂处理土壤的含水率均有增长,平均增幅为 11.27%,容重有所下降,平均降幅为 8.16%,土壤孔隙度平均增幅 2.9%。与 CK 相比,其中 ST1 处理土壤含水率最佳,增幅达到 41.36%,ST3 处理的土壤容重降幅较大,为 19.91%。此外,ST4 处理对风沙土孔隙度的提升也最为显著,增幅为 5.31%,表明不同处理对风沙土的物理性质具有不同的改善效果。在不同处理条件下柳枝稷的生长也表现出明显的差异。ST4 处理对柳枝稷的株高增长效果最为明显,株高增幅最大达 54.30%,ST5 处理对叶面积增幅最高,为 47.48%;而 ST2 处理则对柳枝稷地上生物量的提升效果最为显著,增幅为 57.26%,ST3 处理对地下生物量提升最为显著,增幅为 31.47%。这些结果表明,不同处理对柳枝稷的生长具有不同的促进作用,其中 ST4 处理对株高表现出最优效果,ST5 处理对叶面积增幅最高,而 ST2 处理对柳枝稷地上生物量提升最显著,ST3 处理则对柳枝稷地下生物量的提升效果最为明显。煤矸石土壤调理剂的应用显著改善了土壤的理化性质,土壤含水率得到显著提高,为作物的生长提供了必要的水分条件;同时,土壤容重明显降低,土壤的透气性和疏松性得到显著改善,有利于作物的根系发育。在植物生长方面,煤矸石土壤调理剂的应用也取得了显著成效;柳枝稷的株高、生物量以及叶面积均得到显著增加。其中改良效果最佳的为 ST2 处理,得分为 0.4013。这一结果充分证明了煤矸石土壤调理剂在改善土壤环境、促进植物生长方面的有效性。

参考文献:

- [1] 薛晓玉,王晓云,段含明,等. 北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析[J]. 水土保持研究,2021,28(2):190-197. XUE X Y, WANG X Y, DUAN H M, et al. Temporal and spatial changes of NPP and its causes in the agricultural pastoral ecotone of northern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2):190-197.
- [2] 赵晓萌,程宏,蒋宁,等. 京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化[J]. 科学通报,2023,68(S1):238-253. ZHAO X M, CHENG H, JIANG N, et al. Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(S1):238-253.
- [3] 卢琦,肖春蕾,包英爽,等. 打赢“三北”攻坚战,再造一个“新三北”:实现路径与战略规划[J]. 中国科学院院刊,2023,38(7):956-965. LU Q, XIAO C L, BAO Y S, et al. Implementation path and strategic planning of winning the battle of "Three-North" and reconstructing "New Three-North"[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7):956-965.
- [4] 郭二果,李现华,祁瑜,等. 国家北方重要生态安全屏障保护与建设[J]. 中国环境管理,2021,13(2):80-85. GUO E G, LI X H, QI Y, et al. Ecological protection and construction of the national ecological security barrier in Inner Mongolia region[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(2):80-85.
- [5] 赵智,唐泽军,宋满刚,等. 粉煤灰和 PAM 改良沙土物理性质田间试验[J]. 水土保持学报,2013,27(3):178-183. ZHAO Z, TANG Z J, SONG M G, et al. An field trial of polyacrylamide and fly ash for modifying physical properties of sandy soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3):178-183.
- [6] 宋明元,吕贻忠,李丽君,等. 土壤综合改良措施对科尔沁风沙土保水保肥能力的影响[J]. 腐植酸,2017(2):46. SONG M Y, LÜ Y Z, LI L J, et al. Effect of comprehensive soil improvement measures on water and fertilizer conservation ability of Horqin aeolian sandy soil[J]. Humic Acid, 2017(2):46.
- [7] 王辰,梁惠祺,别泉泉,等. 煤矸石土壤改良剂的研究与进展[J]. 中国煤炭,2021,47(12):49-56. WANG C, LIANG H Q, BIE Q Q, et al. Research progress of coal gangue soil amendment[J]. China Coal, 2021, 47(12):49-56.
- [8] 艾锋,李强,任浩东,等. 蚯蚓肥复配土壤调理剂对毛乌素沙地土壤性质及中科羊草生长的影响[J]. 陕西农业科学,2022,68(8):11-17. AI F, LI Q, REN H D, et al. Effects of earthworm fertilizer combined with soil conditioner on soil properties and growth of *Leymus chinensis* in mu us sandy land[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2022, 68(8):11-17.
- [9] 宋佳奇,索全义,赵炳全,等. 有机型沙地调理剂对沙土理化性质的影响[J]. 土壤通报,2018,49(4):949-952. SONG J Q, SUO Q Y, ZHAO B Q, et al. Effects of organic conditioner on physical and chemical properties of sandy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4):949-952.
- [10] 卢钰升,顾文杰,李集勤,等. 烟草新型土壤调理剂对植烟沙泥田土壤的改良及应用效果[J]. 热带作物学报,2021,42(4):1055-1060. LU Y S, GU W J, LI J Q, et al. Soil improvement and application effect of a novel tobacco soil conditioner on sandy soil[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(4):1055-1060.
- [11] 杜鹤. 煤泥土对煤矸石山土壤改良及植被恢复的试验研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2021.DOI:10.27210/d.cnki.glnju.2021.000062. DU H. Experimental study on soil improvement and vegetation restoration of coal gangue mountain[D]. Fuxin: Liaoning Engineering and Technical University, 2021.DOI:10.27210/d.cnki.glnju.2021.000062.
- [12] 尹万伟,黄本波,汪凤玲,等. 土壤调理剂的研究现状与进展[J]. 磷肥与复肥,2019,34(2):19-23. YIN W W, HUANG B B, WANG F L, et al. Research status and progress of soil conditioner[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(2):19-23.
- [13] 孙海容,赵爱东. 利用高硫煤矸石改良土壤的探讨[J]. 煤炭加工与综合利用,1999(3):13-15. SUN H R, ZHAO A D. Discussion on the soil improvement using high sulfur coal refuse[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1999(3):13-15.

- [14] BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 192-211.
- [15] 周昊, 郭娇娇, 何绪文, 等. 煤矿区固废改良土壤对植物生长的影响[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(3): 23-25.
ZHOU H, GUO J J, HE X W, et al. Research on impact of coal solid waste improved soil on plant growth[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(3): 23-25.
- [16] 刘思源, 苟婷睿, 张红忠, 等. 土壤含水率的插值计算及其精度分析[J]. *新疆环境保护*, 2021, 43(3): 33-38.
LIU S Y, GOU T R, ZHANG H Z, et al. Interpolation calculation of soil moisture content and precision analysis[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2021, 43(3): 33-38.
- [17] 杨桐桐, 封莉, 张立秋. 城市污泥堆肥产品施用对沙荒地土壤理化性质及高羊茅生长的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2462-2468.
YANG T T, FENG L, ZHANG L Q. Effects of application of composted municipal sludge on physicochemical properties of desert land soil and growth of tall fescue[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4): 2462-2468.
- [18] 王凤艳. 蚯蚓粪对土壤的影响[J]. *吉林农业*, 2005(10): 25.
WANG F Y. Effects of earthworm manure on soil[J]. *Agriculture of Jilin*, 2005(10): 25.
- [19] 刘小铭, 艾锋, 李强, 等. 陕北侏罗纪煤田煤矸石的特性与研究进展[J]. *陕西煤炭*, 2024, 43(3): 53-58.
LIU X M, AI F, LI Q, et al. Characteristics of coal gangue of Jurassic coal field in northern Shaanxi[J]. *Shaanxi Coal*, 2024, 43(3): 53-58.
- [20] 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.
LIANG L, ZHANG W J, XU B H, et al. Research progress on effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and soil environment[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(3): 1-11.
- [21] WU Y M, XI B D, FANG F, et al. Insights into relationships between polycyclic aromatic hydrocarbon concentration, bacterial communities and organic matter composition in coal gangue site[J]. *Environmental research*, 2023, 236(P2): 116502.
- [22] 周琛鸿, 李绪萍, 张靖, 等. 不同含水率煤矸石浸水复干氧化特性研究[J/OL]. *煤炭科学技术*, 2023; 1-10. (2023-10-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231012.1316.001.html>.
- ZHOU C H, LI X P, ZHANG J, et al. Study on oxidation characteristics of coal gangue with different moisture content under water immersion drying[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 2023; 1-10. (2023-10-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231012.1316.001.html>.
- [23] 殷奥杰, 张世文, 周思雨, 等. 改性煤矸石对砂姜黑土物理结构及有机碳组分的影响[J/OL]. *农业环境科学学报*, 2024; 1-14. (2024-05-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240521.1247.008.html>.
YIN A J, ZHANG S W, ZHOU S Y, et al. Effects of modified coal gangue on the physical structure and organic carbon components of Shajiang black soil[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024; 1-14. (2024-05-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240521.1247.008.html>.
- [24] 聂朝阳, 杨帆, 王志春, 等. 外源物料添加对西辽河平原苏打盐碱化耕地土壤改良效果研究[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(4): 446-457.
NIE Z Y, YANG F, WANG Z C, et al. Effects of exogenous material additions on the improvement of cultivated sodic-saline soil in West Liaohe plain[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(4): 446-457.
- [25] 张宇航, 宋子岭, 孔涛, 等. 煤矸石对盐碱土壤理化性质的改良效果[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 195-204.
ZHANG Y H, SONG Z L, KONG T, et al. Amelioration effect of coal gangue on physical and chemical properties of saline-alkaline soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 195-204.
- [26] 盛定红, 张景宁, 李小军, 等. 煤矸石肥料的制备及应用研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(3): 960-963, 967.
SHENG D H, ZHANG J N, LI X J, et al. Study on preparation and application of coal gangue fertilizer[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(3): 960-963, 967.
- [27] 申午艳. 基于煤矸石制备Si:K肥基改良剂及其改良效应研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
SHEN W Y. Study on preparation of Si-K fertilizer base improver based on coal gangue and its improvement effect[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [28] 白博文, 刘善江, 申俊峰, 等. 土壤调理剂研发及应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(3): 14-18.
BAI B W, LIU S J, SHEN J F, et al. Research progress on the development and application of soil conditioners[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 14-18.