

## 脱碳气化渣基土壤调理剂对土壤养分和羊草生长的影响

朱占荣<sup>1</sup>, 马泳波<sup>2</sup>, 边江东<sup>2</sup>, 张正<sup>2</sup>, 艾锋<sup>2</sup>, 杨航<sup>2</sup>, 曹虎生<sup>1</sup>, 李强<sup>2</sup>

(1. 陕西省一八五煤田地质有限公司, 陕西榆林 719000; 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)

**摘要:** 脱碳气化渣是煤气化渣经浮选提取残碳后的多孔型固体废弃物, 目前主要通过制成脱碳气化渣基土壤调理剂用于土壤改良, 以实现废弃物再利用。为了研究脱碳气化渣基土壤调理剂对沙地土壤性质和牧草生长的影响, 采用田间小区试验, 以羊草为指示作物, 设置 5 个脱碳气化渣基土壤调理剂施加量, 分别为 0(CK)、15(SF1)、30(SF2)、60(SF3)、120 t/hm<sup>2</sup>(SF4), 并对沙地土壤理化性质、羊草生理生化指标及品质进行分析。结果表明, 脱碳气化渣基土壤调理剂能够有效改善土壤养分供给能力, 添加脱碳气化渣基土壤调理剂的处理土壤有机质、碱解氮和有效磷含量较 CK 增幅分别为 8.95%~76.96%、4.95%~46.59% 和 5.80%~105.80%, 其中, SF4 处理的土壤有机质、碱解氮和有效磷含量显著高于其他处理。与 CK 相比, 添加脱碳气化渣基土壤调理剂的处理羊草地上生物量和成熟期株高增幅分别为 31.52%~113.16% 和 7.10%~28.90%; 添加脱碳气化渣基土壤调理剂的处理羊草粗蛋白和粗脂肪含量分别增加 29.26%~64.36% 和 8.74%~24.84%, 其中, SF4 处理增幅最大, 粗蛋白和粗脂肪含量分别达 73.70、117.10 g/kg。综上, 沙土中添加 120 t/hm<sup>2</sup> 的脱碳气化渣基土壤调理剂不仅能够显著调控土壤养分有效性, 而且能有效促进沙地羊草生物量的有效积累, 为最佳添加量。

**关键词:** 脱碳气化渣; 土壤理化性质; 羊草; 生物量; 土壤调理剂

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2024)05-0052-08

## Effects of Decarbonized Gasification Slag-Based Soil Conditioner on Soil Nutrients and Growth of *Leymus chinensis*

ZHU Zhanrong<sup>1</sup>, MA Yongbo<sup>2</sup>, BIAN Jiangdong<sup>2</sup>, ZHANG Zheng<sup>2</sup>, AI Feng<sup>2</sup>,

YANG Hang<sup>2</sup>, CAO Husheng<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Province 185 Coalfield Geology Co., Ltd, Yulin 719000, China; 2. Yulin University, Shaanxi

Key Laboratory of Ecological Restoration of Northern Shaanxi Mining Areas, Yulin 719000, China)

**Abstract:** Decarbonization gasification slag is a porous solid waste obtained by flotation extraction of residual carbon from coal gasification slag. At present, it is generally used to produce decarbonization gasification slag-based soil conditioner for soil improvement to achieve waste reuse. In order to study effects of decarbonized gasification slag-based soil conditioner on soil properties and growth of forage grass, in this study, using field plot test, and soil nutrients, taking *Leymus chinensis* as the indicate crop, five application levels of decarbonized gasification slag-based soil conditioner such as 0(CK), 15(SF1), 30(SF2), 60(SF3), and 120 t/ha(SF4) were set, and physical and chemical properties of sandy soil, physiological and biochemical indexes and quality of *Leymus chinensis* were analyzed. The results showed that decarbonized gasification slag-based soil conditioner could effectively improve soil nutrient supply capacity, the contents of soil organic matter, alkaline hydrolyzed nitrogen, and available phosphorus in soil of the treatments with addition of decarbonized gasification slag-based soil conditioner increased by 8.95%~76.96%, 4.95%~46.59%, and 5.80%~105.80% compared to those in CK, respectively. The contents of soil organic matter, alkaline hydrolyzed nitrogen, and available phosphorus in the treatment SF4 were significantly higher than those in other treatments. Compared to CK, the aboveground biomass and the plant height at maturity stage of *Leymus chinensis* in the treatments with addition of decarbonized gasification slag-based soil conditioner increased by 31.52%~113.16% and 7.10%~28.90%, respectively. The contents of crude protein and crude fat of *Leymus chinensis* in the additon treatments increased by 29.26%

收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 陕西省煤田地质集团有限公司创新能力支撑项目(SMDZ-2022CX-4); 国家重点研发计划(2022YFF1300802); 国家自然科学基金项目(42267071); 陕西省公益性地质调查项目(2023-12); 陕西省青年创新团队项目(2023-63); 陕西省技术创新引导专项(2024ZC-YYDP-58)

作者简介: 朱占荣(1985-), 男, 甘肃定西人, 高级工程师, 主要从事地质测量及科技管理工作。

通信作者: 李强(1986-), 男, 陕西榆林人, 教授, 博士, 主要从事多源固废生态化利用研究工作。

-64.36% and 8.74%-24.84%, respectively. The increase rate of the indexes in the treatment SF4 was the highest, and the contents of crude protein and crude fat reached to 73.70 and 117.10 g/kg. In conclusion, the treatment SF4 could not only significantly regulate the effectiveness of soil nutrients, but also promote the effective accumulation of biomass of *Leymus chinensis* in sand land, therefore, it was the best application level of decarbonized gasification slag-based soil conditioner.

**Key words:** decarbonised gasification slag; soil physical and chemical properties; *Leymus chinensis*; biomass; soil conditioner

煤气化是现代煤化工前端支柱产业的主要工艺流程,也是煤炭清洁、高效利用的主要途径。煤气化途径是指让煤在氧气不足的情况下进行部分氧化,使煤中有机物转化成氢气、一氧化碳、甲烷等可燃气体,同时产生蒸汽、焦油、灰渣等副产品<sup>[1]</sup>。原煤中的无机矿物组分和未进行完全氧化的炭质组分将转变为熔渣,被排出气化炉后形成一种煤基固体废弃物即煤气化渣。据统计,我国每年煤气化渣的排放量超过3 300万t,亟待生态化利用及大规模消纳。脱碳气化渣是由煤气化渣经过水力螺旋机二级分选、磁铁吸附等工艺产生的新型废渣,原理是利用煤气化渣中残碳分布不均匀的特性进行分选,最终选出含碳量高的气化渣颗粒进行残碳的回收利用。在化学组成方面,由于煤种、原煤产地、炉型、气化工工艺等条件的差异,脱碳气化渣在矿物组分含量上也存在差异,但均主要由SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和残碳构成<sup>[2]</sup>。在物理特性方面,脱碳气化渣特性与煤气化渣相似,渣样碳粒表面均具有发达的孔隙结构且无放射性和重金属、有机污染物等生态风险<sup>[3]</sup>。由于气化渣结构蓬松、孔径分布宽、有机碳含量丰富而且含有微量元素,使其具有改良贫瘠土壤的潜力。例如,ZHU等<sup>[4]</sup>研究了气化细渣在碱沙地中作为土壤改良剂的应用,施用20%的煤气化细渣时,土壤容重由1.47降低至1.05,土壤含碳量增加了10倍以上,土壤阳离子交换量增加115.7%,土壤pH值也降低了3.06%,同时种植的玉米和小麦发芽率也相应提高。田超<sup>[5]</sup>将气化细渣与牛粪配施到风沙土并种植黑麦草,60 d之后株高、地上鲜质量及分蘖数增幅分别为74.98%~105.33%、260.51%~401.26%、100.03%~114.81%。朱丹丹<sup>[1]</sup>将煤气化细渣与内蒙古沙化土壤混合进行温室培养、作物盆栽和大田试验,发现盆栽的玉米和小麦7 d出苗率均为100%,2 a大田试验玉米生长状况良好,籽粒品质与产量均有增加。虽然已有较多学者开展了煤气化渣利用的相关研究,但是目前针对脱碳气化渣在退化土壤改良方面的研究较少。

羊草属于典型的多年生无性系植物,又称克隆植物<sup>[6]</sup>,根系主要分布在20 cm土层中,茎秆直立,

叶高60~70 cm,疏丛状或单生,叶片修长且扁平,颜色一般为灰绿色或黄绿色,穗状花序直立<sup>[7]</sup>。羊草种群的更新替代主要由分蘖来完成,属于根茎型禾草,无性繁殖能力很强<sup>[8-9]</sup>。羊草在我国具有70多年的发展历程,20世纪50年代开始,我国以东北师范大学为代表的学者们开始进行羊草的生物生态学研究<sup>[9]</sup>。截至2021年,仅内蒙古种植面积就超过了2万hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。

为了研究脱碳气化渣基对沙地土壤和牧草生长的影响,本研究采用田间小区试验,分析不同的脱碳气化渣基土壤调理剂施加量对沙地土壤性质及羊草农艺性状和品质的影响,旨在为脱碳气化渣的生态化利用提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验在陕西省榆林市榆阳区芹河镇进行,位于毛乌素沙地东南缘,距离榆林市城区35 km,其地理位置为109°50'48"E,38°7'15"N。土壤类型为风沙土,海拔为1 020 m,年降雨量为350~400 mm且降雨集中在7—9月,属于半干旱型气候区。

### 1.2 试验材料

试验所用脱碳气化渣基土壤调理剂由榆林学院多源固废协同生态修复课题组自主研发,利用筛选的微生物菌剂将脱碳气化渣进行无害化处置并与多种功能性材料复配,最终制备为脱碳气化渣基土壤调理剂。试验用风沙土与脱碳气化渣基土壤调理剂基本性质见表1。供试羊草(*Leymus chinensis*)品种为中科1号羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.),草种购于榆林市某种业公司。

### 1.3 试验设计

试验区属于首次开垦的风沙地,试验选择脱碳气化渣基土壤调理剂作为改良风沙土的材料(表1),以不同施加量作为处理组,不施加任何材料作为对照组(CK),每个处理设置3次重复。施加量分别为15(SF1)、30(SF2)、60(SF3)、120(SF4)t/hm<sup>2</sup>。施加方式为先直接施于表土层,然后用旋耕机将其与0~20 cm表土充分混合。试验小区采用随机区组

设计, 试验田共计 240 m<sup>2</sup>, 采用喷灌方式进行灌溉, 灌溉量保持均匀一致。每个处理包括 3 次独立重复, 每次重复的试验田面积为 16 m<sup>2</sup>。于 2022 年 9 月 10 日开始布设试验田, 布设结束后, 按照 30 kg/hm<sup>2</sup> 的播种量进行播种, 行距为 50 cm, 将羊草种子与

一定量沙土搅拌确保种子播撒均匀, 播种深度 1~2 cm, 然后用沙土进行覆盖并灌溉至保墒状态, 后期管理按照正常田间管理进行, 包括除杂草、灌溉等, 期间不施加任何肥料。

表 1 脱碳气化渣基土壤调理剂与风沙土的基本性质  
Tab.1 Basic properties of decarbonized gasification slag-based soil conditioner and sandy soil

物理性状 Physical property	容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	大团聚体/% Large cluster	微团聚体/% Microaggre- gate	有机质/ (g/kg) Organic matter	pH	碱解氮/ (mg/kg) Alkaline hydro- lyzable nitrogen	有效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium
脱碳气化渣基土壤调理剂 Decarbonized gasification slag- based soil conditioner	0.65	67.8	32.2	230.17	7.24	138.32	46.92	2 160.00
风沙土 Sandy soil	1.52			1.11	8.32	6.36	1.52	35.00

#### 1.4 测定项目及方法

2023 年 9 月 10 日采集完植物样本后进行土壤样本采集, 从每个小区随机采集 0~20 cm 的 3 个土柱, 充分混合后制成一个复合样本。然后, 将样本放入塑料带中密封, 低温运输到实验室, 分为 3 份, 分别进行低温保存。

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法(外加热)测定, 土壤速效钾含量采用乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法测定, 土壤有效磷含量采用碳酸氢钠浸提法(Olsen)测定, 土壤碱解氮含量采用碱扩散法测定。

植物样本的采集时间为 2023 年的 6 月 10 日、7 月 10 日、8 月 10 日、9 月 10 日。每个小区使用五点采样法采集 5 株中科羊草, 用尺子测量株高。收集中科羊草, 将地上和地下部分区分后直接称重, 获得鲜质量。利用便携式叶绿素含量测量仪 CCM-300 (Opti-Sciences, USA) 测定。粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定, 酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量采用范氏洗涤纤维分析法测定, 粗灰采用高灼烧法测定, 粗脂肪含量采用脂肪仪 Soxtec 8000 测定, 粗纤维含量采用酸碱消煮法测定。

#### 1.5 数据处理

试验数据使用 Excel 2021 进行统计分析, 用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行数据分析, 使用 Origin 2022 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 脱碳气化渣基土壤调理剂对土壤养分的影响

土壤有机质可以优化土壤结构, 提高土壤的温度, 促进作物的生长发育, 提高土壤的保肥能力和

缓冲性能<sup>[11]</sup>; 土壤碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)指的是土壤中可以直接被植物吸收, 在土壤中迁移性强, 不受土壤固相物质的束缚, 在空间上可以满足植物营养需求的土壤养分。从表 2 可以看出, 脱碳气化渣基土壤调理剂能显著提高土壤有机质和速效养分含量, SF2、SF3 和 SF4 处理的土壤有机质含量分别比 CK 显著增加了 8.95%、32.44% 和 76.96% ( $P < 0.05$ ); 各处理土壤的碱解氮含量趋势与有机质趋势一致, SF2、SF3 和 SF4 处理碱解氮含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 增幅为 4.95%~46.59%; SF2、SF3 和 SF4 处理土壤有效磷含量较 CK 增幅为 31.16%~105.80%; SF4 处理土壤速效钾含量显著高于其他处理, 较 CK 增加了 11.54% ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同处理下土壤养分含量分析  
Tab.2 Soil nutrient content analysis under different treatments

处理 Treat- ment	有机质/ (g/kg) Organic matter	碱解氮/ (mg/kg) Alkaline hydro- lyzable nitrogen	有效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available po- tassium
CK	4.47±0.02d	5.86±0.06d	1.38±0.02d	34.67±0.88b
SF1	3.46±0.06e	4.90±0.09e	1.46±0.02d	35.00±1.15b
SF2	4.87±0.04c	6.15±0.06c	1.81±0.03c	34.67±0.67b
SF3	5.92±0.02b	7.05±0.05b	2.29±0.06b	33.33±0.33b
SF4	7.91±0.06a	8.59±0.07a	2.84±0.03a	38.67±0.33a

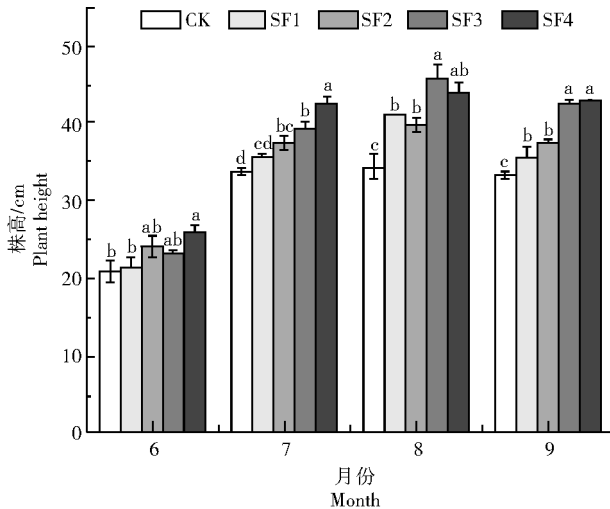
注: 每列不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著。表 3 同。  
Note: Different lowercase letters in each column indicated significant differences ( $P < 0.05$ ). The same as Tab.3.

### 2.2 脱碳气化渣基土壤调理剂对羊草农艺性状的影响

#### 2.2.1 羊草株高分析 通过采集不同月份羊草进

行株高测定和线性拟合(图1)。在6月测得的结果显示,SF1、SF2、SF3和SF4处理株高分别较CK增加了2.39%、15.47%、10.37%和23.29%,株高从高到低排列为SF4>SF2>SF3>SF1>CK,SF4处理相较于CK达到了显著差异( $P<0.05$ )。7月的结果显示,羊草处于生长旺盛期,各处理的株高同样高于CK,株高增幅为6.13%~25.79%,其中SF2、SF3和SF4处理均与CK达到显著差异( $P<0.05$ )。8月测得的结果显示,SF3处理长势最好,与CK相比,增长幅度为33.66%,其次分别为SF4、SF1和

SF2处理。9月测得的结果显示,羊草生长放缓,羊草株高与8月相比,各处理组的变化均很小,但各处理的株高同样高于CK、SF4、SF3、SF2和SF1处理较CK分别提升了7.10%、12.70%、27.10%和28.90%。与7月、8月相比,9月羊草株高基本无变化的原因是羊草已进入抽穗期,此阶段羊草株高维持稳定,进入干物质积累和籽粒灌浆结实期,羊草的水分含量逐渐降低,干物质含量占比逐渐升高( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示不同时期处理间差异显著( $P<0.05$ )。图3、4同

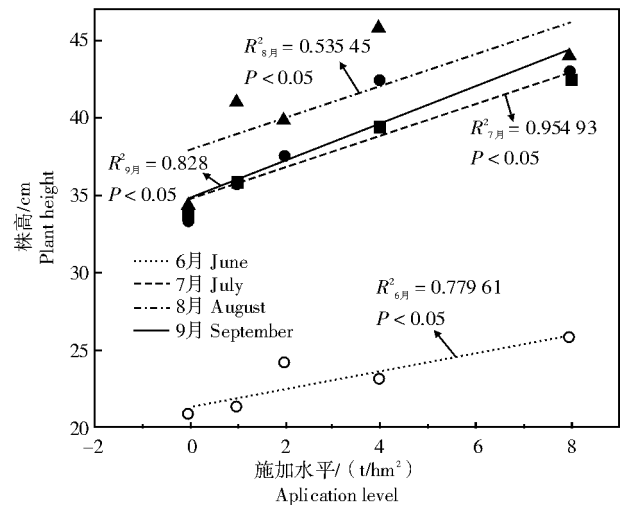
Different small letters indicated that there were significant differences among treatments in different periods( $P<0.05$ ). The same as Fig.3,4

图1 不同处理下羊草株高分析

Fig.1 Analysis of *Leymus chinensis* plant height under different treatments

可见,随着脱碳气化渣基调理剂施加量的增加,羊草株高呈上升趋势。7月中旬羊草进入抽穗期,抽穗期后羊草株高一般趋于稳定,可以看出添加脱碳气化渣基调理剂的处理株高均大于CK。以施加水平为变量,通过线性拟合后发现拟合度较高,6月、7月、8月、9月施加水平对株高的解释度分别为0.779、0.954、0.535和0.828,解释度均大于0.5,由此可以推断出在0~120 t/hm<sup>2</sup>施加水平下的株高。

2.2.2 对羊草生物量的影响 从图2可以看出,在不同脱碳气化渣基调理剂施加水平下,CK的地上部分鲜质量总体小于各处理,6月结果显示,各处理间地上部分鲜质量差异不显著;7月测得的结果显示,SF4处理地上部分鲜质量显著高于CK( $P<0.05$ ),其余处理地上部分鲜质量与CK相比无显著差异;8月测得的结果显示,SF1和SF4处理地上部分鲜质量显著高于CK( $P<0.05$ );9月测得的结果显示,SF1、SF2、SF3和SF4处理的地上部分鲜质量均显著高于CK( $P<0.05$ ),较CK分别增加了



31.52%、50.70%、113.16%和71.97%。

6月SF1、SF2、SF4处理的地下部分鲜质量均显著低于CK( $P<0.05$ );7月测得的结果显示,SF4处理与CK、SF1、SF2和SF3处理相比,分别增加94.07%、72.28%、143.54%和78.40%;8月测得的结果显示,SF4处理与CK、SF1、SF2和SF3处理相比,分别增加17.93%、117.34%、143.54%和85.13%;9月测得的结果显示,SF3处理的地下部分鲜质量最大,其次为SF4处理。CK、SF1、SF2处理的地下鲜质量均低于1 000 g/m<sup>2</sup>,SF1处理的地下鲜质量显著低于CK和SF2处理( $P<0.05$ )。

在植物总鲜质量方面,7月测得结果显示,SF4处理显著高于其他处理,CK、SF1、SF2和SF3处理的总鲜质量均在1 500 g/m<sup>2</sup>上下波动;8月测得结果显示,SF4处理总鲜质量显著高于CK、SF1、SF2和SF3处理( $P<0.05$ ),CK和SF1处理的总鲜质量又显著高于SF2和SF3( $P<0.05$ );9月测得结果显示,SF2、SF3处理的总鲜质量逐渐升高,SF3

处理的总鲜质量显著高于其他处理( $P<0.05$ ), SF4 处理的鲜质量显著高于 CK、SF1 和 SF2 处理

( $P<0.05$ )。

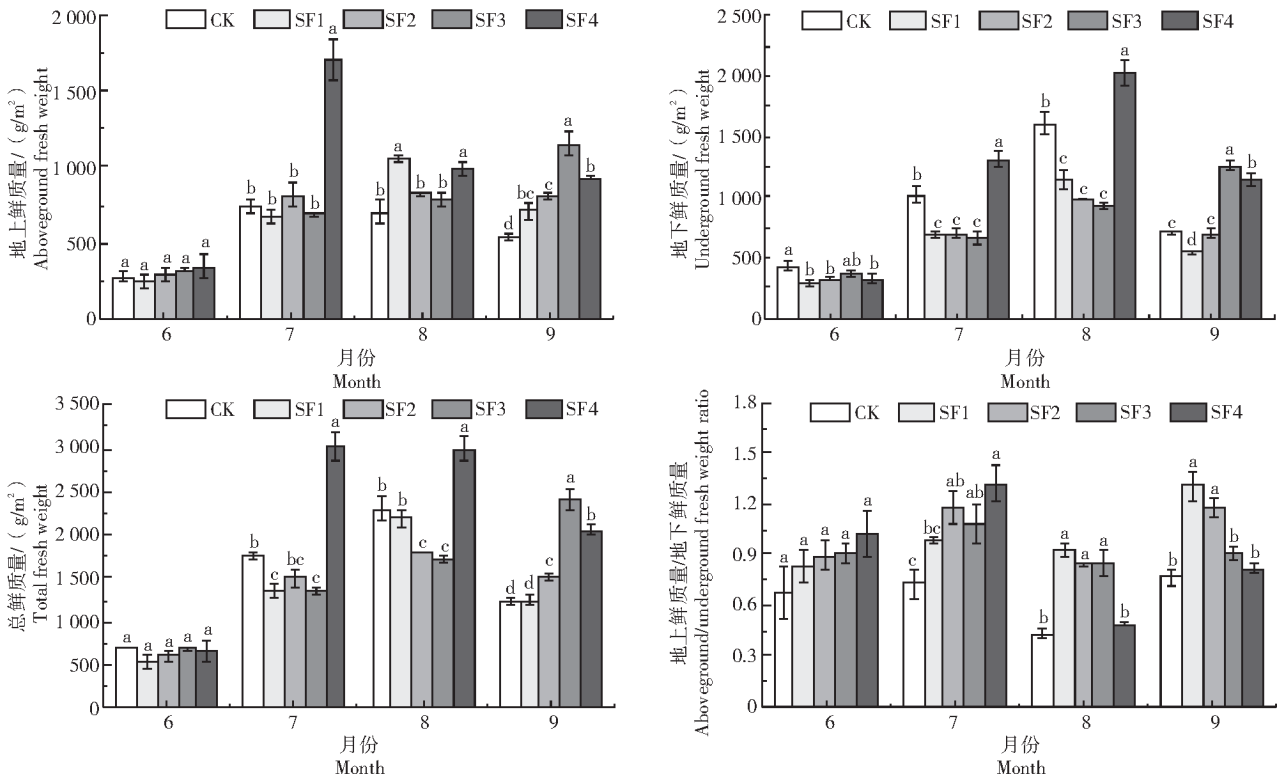


图2 不同处理下羊草地上、地下鲜质量分析  
Fig.2 Analysis of aboveground and underground fresh weight of *Leymus chinensis* under different treatments

从地上地下鲜质量比值来看,6月份结果显示,各处理与CK均没有显著性差异;7月份结果显示,SF1、SF2、SF3和SF4处理显著高于CK,与CK相比,增幅分别为33.79%、61.64%、47.95%和80.82%;8月份结果显示,CK和SF4处理地上地下鲜质量比最低,两者之间无显著性差异且均显著低于SF1、SF2和SF3处理( $P<0.05$ );9月份结果显示,SF1、SF2处理地上地下鲜质量显著高于CK、SF3、SF4处理( $P<0.05$ )。

2.2.3 对羊草叶绿素含量的影响 叶绿素含量作为植物叶片的重要生理指标,与植物的光合速率关联度非常强,直接参与植物的光合作用过程<sup>[12]</sup>,不仅可以表征出植物对环境的适应能力而且可以间接反映生长的土壤和气候环境概况。叶片SPAD值是一个相对叶绿素含量读数,也称绿色度,通过叶绿素测定仪器可定量描述叶片的叶绿素含量<sup>[13]</sup>。从图3可以看出,7月测得的各处理叶绿素含量由大到小排序为SF4>SF2>SF1>CK>SF3,其含量分别为36.43、31.77、31.28、31.27、30.47;8月测得的各处理的叶绿素含量较7月均有所降低,CK、SF1、SF2、SF3、SF4处理叶绿素含量较7月分别降

低23.56%、5.01%、9.44%、0.55%、16.65%;9月测得的结果显示,SF4处理的叶绿素含量显著高于其他处理( $P<0.05$ )。

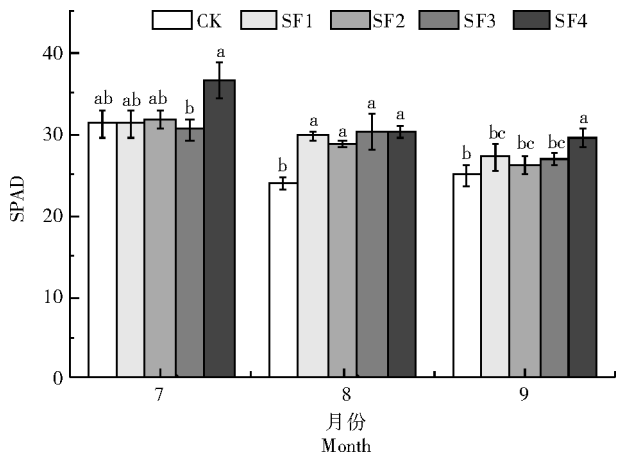


图3 不同处理下羊草叶绿素含量分析  
Fig.3 Analysis of chlorophyll content of *Leymus chinensis* under different treatments

7—9月,各处理组羊草叶片的叶绿素含量都呈下降趋势,在7、8、9月,羊草叶片的叶绿素含量总体平均值分别为32.24、28.45、26.95,叶绿素含量偏低,8月和9月总体叶绿素含量与7月比较,分别下降了

11.76%和16.41%。CK的叶绿素含量在7、8、9月始终为最低,SF1、SF2和SF3处理的叶绿素含量差异较小,SF4处理叶绿素含量显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),说明在脱碳气化渣施加水平为120 t/hm<sup>2</sup>时,能显著增加羊草的叶绿素含量,7月、8月和9月,SF4处理下羊草的叶绿素平均含量与CK相比分别增加16.50%、17.26%和18.76%。

### 2.3 脱碳气化渣基土壤调理剂对羊草营养品质的影响

由表3可知,在不同处理下,羊草粗蛋白含量具有显著差异,从整体来看,羊草粗蛋白含量随着脱碳气化渣基调理剂施加量的增加而升高,SF2、SF3和SF4处理的粗蛋白含量与CK间达到显

著性差异水平( $P < 0.05$ ),较CK分别提高了47.12%、29.26%和64.36%。

牧草中的粗脂肪是禽畜的主要营养成分之一,是牲畜体内热能的重要来源,一般认为能够被乙醚浸出的物质称为粗脂肪,不仅够为牲畜提供热量,还能提高牲畜的质量增加速度。由表3可知,CK、SF1、SF2、SF3和SF4处理的粗脂肪含量分别为93.80、110.20、108.97、102.00、117.10 g/kg,SF4处理的粗脂肪含量最高,CK的粗脂肪含量最低,SF4处理的粗脂肪含量比CK提高2.33%,SF1、SF2、SF3处理的粗脂肪含量基本一致,SF4处理粗脂肪含量显著高于CK和SF3处理( $P < 0.05$ ),SF1和SF2处理的粗脂肪含量显著高于CK( $P < 0.05$ )。

表3 不同处理下羊草营养品质指标分析  
Tab.3 Analysis of nutritional quality indexes of *Leymus chinensis* under different treatments g/kg

处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗纤维 Crude fiber	粗灰分 Crude ash	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber
CK	44.84±0.37d	93.80±3.06c	300.70±0.31b	276.07±2.47b	675.33±2.84a	418.10±0.26b
SF1	38.85±0.17e	110.20±3.23ab	326.43±3.25a	391.10±5.86a	672.50±1.79a	415.10±0.23c
SF2	65.97±0.44b	108.97±4.53ab	299.73±0.61b	190.50±1.06e	654.53±2.24b	414.07±1.03c
SF3	57.96±0.08c	102.00±0.46bc	306.20±3.43b	257.50±1.27c	654.53±2.81b	419.83±0.38a
SF4	73.70±0.21a	117.10±3.29a	305.97±3.44b	212.47±1.07d	651.43±2.05b	401.60±0.23d

从表3可以看出,SF2处理粗纤维含量显著大于其他处理( $P < 0.05$ ),较CK提高8.55%。总体来看,各处理的粗纤维含量集中在300 g/kg左右。各处理的粗灰分含量均存在显著差异( $P < 0.05$ ),SF1处理的粗灰分含量较CK增加了41.65%,整体看来随着土壤调理剂施加量的增加,羊草粗灰分含量呈下降趋势。

在中性洗涤纤维含量方面,从表3可以看出,CK和SF1处理中的中性洗涤纤维含量显著高于SF2、SF3和SF4处理( $P < 0.05$ ),分别增加了2.70%、3.18%和3.67%。从整体来看,各处理的中性洗涤纤维含量均高于650.00 g/kg,中性洗涤纤维的含量随着脱碳气化渣基调理剂施加量的增加而逐渐降低。在酸性洗涤纤维含量方面,各处理的含量均集中在400.00 g/kg左右,含量从高到低分别为SF3>CK>SF1>SF2>SF4。

### 3 结论与讨论

本研究将脱碳气化渣用于土壤改良的主要目的是为了改善土壤物理性状,进而能够提高贫瘠地区土壤的保水保肥能力和水肥利用效率,促进羊草的生长,最终为生态脆弱区的植被建立提供参考。

土壤有机质和速效养分是表征土壤改良状况的重要指标<sup>[14]</sup>。本研究发现,施用脱碳气化渣基土壤调理剂可以显著改善土壤养分供给能力,其中SF1处理的土壤养分与CK相比基本无显著性提升,SF2、SF3和SF4处理的土壤有机质含量比CK增加8.95%、32.44%和76.96%,碱解氮含量比CK分别增加4.95%、20.31%和46.59%,有效磷含量分别比CK增加31.16%、65.94%和105.80%。土壤有机质含量与施用量呈显著正相关,本研究中所使用的脱碳气化渣较难分解,主要提供有机质中的惰性成分,添加的菌剂可以有效提升土壤的活性有机质,最终实现土壤有机质的显著提高<sup>[15]</sup>。另外,施用脱碳气化渣基调理剂可以有效提升土壤的速效养分含量,表明脱碳气化渣基土壤调理剂具有加速活化养分的功效,尤其是氮元素和磷元素。这是由于脱碳气化渣中添加的微生物菌剂能通过减少气态氮损失和减少氮淋溶来调节土壤中的氮通量,进而影响土壤碱解氮含量<sup>[16-17]</sup>。微生物群落中的变形菌门具有溶磷作用的同时也会提升土壤速效磷含量,这也与本研究结果一致。

农艺性状是农业生产的基础,从而为农业生产提供科学依据。在株高方面,可以发现,羊草株高

在 6—7 月变化十分明显,但 7 月之后,羊草株高基本无变化,甚至 8 月株高比 9 月大,一方面是因为陕北风沙草滩区的羊草在 7 月中旬左右进入抽穗期,株高基本不会增加,茎叶中的营养物质大量被羊草繁殖器官占用<sup>[18]</sup>,另一方面是采样方式为破坏式采样,所以,会出现 9 月株高比 8 月低的情况。另外,发现随着调理剂施加量的增加,株高是逐渐升高的状态,主要原因是土壤环境改变使得羊草通过改变株高来适应其变化<sup>[19]</sup>。在本研究中,调理剂中养分含量较高,施加量的增加意味着土壤养分升高,从最终的结果中也可印证,其中,土壤 N 和 P 对羊草的株高影响最明显,N 和 P 是植物细胞合成的主要元素,在一定范围内,土壤 N 和 P 供给充足时,植物生长速率会增加,株高是最主要的表现形式<sup>[20-21]</sup>。在地上和地下鲜质量比值的变化中,发现各处理的比值都呈现 6—7 月增大,7—8 月减小,8—9 月又增大的趋势,这种趋势是符合植物营养器官生长规律的,即植物的生长大周期,在羊草生长前期处于停滞期,羊草处于细胞分裂期和原生质体积累时期,羊草在 6—7 月,茎叶部分处于对数生长期,细胞体积随着时间的变化而对数增大,又进入直线生长期,生长速率恒定,地上部分生长速度大于地下部分生长速度,导致地上地下鲜质量比值增加。7—8 月,羊草开始进入抽穗期,羊草地上部分生长缓慢且该地区炎热,日照强度较大,羊草茎叶部分失水严重,导致地上地下鲜质量比降低。8—9 月,羊草逐渐进入衰老期,羊草体内生长激素受到抑制且受光照、温度等环境因素的影响,羊草茎叶细胞分裂减弱,最终使得地上地下鲜质量比降低。

按照《中国饲料成分及营养价值表(2022 年第 33 版)》中羊草的相关营养品质指标,可知羊草的粗蛋白含量为 70 g/kg,粗脂肪含量为 20 g/kg,粗纤维为 340 g/kg,粗灰分为 80 g/kg,中性洗涤纤维为 670 g/kg,酸性洗涤纤维为 470 g/kg<sup>[22]</sup>。本研究中羊草粗脂肪和粗灰分含量均高于其中的标准值,各处理和对照的粗脂肪含量在 93.80~117.10 g/kg,粗灰分含量在 190.50~391.10 g/kg。本研究的羊草样本处于成熟期,一方面中科羊草需要产生籽粒或者是果实,需要大量的脂肪来维持这一过程,且随着植物生长越来越好,光合效率随之提升,吸收养分后转化为粗脂肪。另一方面,因为风沙地中水分含量较低,而中科羊草又是一种抗逆性较强的植物,因此,会积累较多的储备物质,如粗脂肪。另

外,各处理下羊草的粗脂肪含量显著高于 CK,是因为添加土壤调理剂,羊草能吸收更多的养分,进而能积累更多的储备物质。粗灰分方面,羊草进入生长后期,植物细胞内容物逐渐减少,植物矿质营养元素随着羊草的衰老而流失<sup>[23]</sup>,使得羊草的矿物质氧化物和盐类无机物占比增加,导致粗灰分占比升高。这与李春风<sup>[24]</sup>的研究一致,本研究随着土壤调理剂的增加,羊草粗灰分有降低趋势的原因是生物量高的羊草矿质营养元素流失速度较慢,在生长后期对环境的适应性也较强,故产生各处理下粗灰分逐渐降低、叶绿素含量逐渐增加的现象,说明添加土壤调理剂后可以有效延缓羊草的衰老,增加羊草持绿时长。

在风沙土中添加脱碳气化渣基土壤调理剂能增加土壤养分,主要表现在有机质、碱解氮和有效磷这 3 个指标;羊草株高指标对土壤养分变化响应最为敏感,随着施加量的增加,羊草株高、地上鲜质量、叶绿素含量呈逐渐上升趋势;羊草的粗蛋白、粗脂肪和粗灰分对脱碳气化渣基土壤调理剂施加量响应最敏感,粗蛋白和粗脂肪含量随着施加量的增加而上升,粗灰分与施加量呈负相关关系。风沙土中施加脱碳气化渣基土壤调理剂能够改变土壤养分功能,土壤碱解氮和有效磷是影响羊草农艺性状和营养品质的主要因子。

#### 参考文献:

- [1] 朱丹丹. 煤气化细渣在土壤改良及水污染治理中的资源化利用研究[D]. 长春:吉林大学,2021.  
ZHU D D. Research on resource utilization of coal gasification fine slag in soil improvement and water pollution control[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [2] 范宁,张逸群,樊盼盼,等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术,2022,28(8):145-154.  
FAN N, ZHANG Y Q, FAN P P, et al. Research progress on characteristics analysis and resource utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 145-154.
- [3] 刘艳丽,李强,陈占飞,等. 煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J]. 煤炭科学技术,2022,50(11):251-257.  
LIU Y L, LI Q, CHEN Z F, et al. Characterization and comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 251-257.
- [4] ZHU D, MIAO S, XUE B, et al. Effect of coal gasification fine slag on the physicochemical properties of soil[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, 230(7): 1-11.
- [5] 田超. 粉煤灰、气化细渣对风沙土的改良效果及治理沙漠化的途径研究[D]. 银川:宁夏大学,2022.  
TIAN C. Study on the improvement effect of fly ash and gasification fine slag on aeolian sand soil and the ways to control desertification[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.

- [6] 刘公社,李晓霞,齐冬梅,等.羊草种质资源的评价与利用[J].科学通报,2016,61(2):271-281.  
LIU G S, LI X X, QI D M, et al. Evaluation and utilization of germplasm resources of *Leymus chinensis*[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2):271-281.
- [7] 任晓慧,王健,麻小凤.羊草的丰产栽培及利用技术[J].畜牧兽医杂志,2018,37(2):81-82,84.  
REN X H, WANG J, MA X F. High yield cultivation and utilization technology of *Leymus chinensis*[J]. Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 37(2):81-82, 84.
- [8] 刘昭明,刘岩,闫文平,等.不同羊草品种小区种植对比试验[J].黑龙江畜牧兽医,2017(19):144-145,149.  
LIU Z M, LIU Y, YAN W P, et al. Comparative experiment of different varieties of *Leymus chinensis* in plots[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Science, 2017(19):144-145, 149.
- [9] 祝廷成.羊草生物生态学[M].长春:吉林科学技术出版社,2004.  
ZHU T C. Bioecology of *Leymus chinensis*[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2004.
- [10] 陶雅,徐丽君,李峰,等.我国羊草产业亟待振兴[J].草业学报,2023,32(11):188-198.  
TAO Y, XU L J, LI F, et al. Chinese *Leymus chinensis* industry needs to be revitalized [J]. Journal of Pratacultural Industry, 2023, 32(11):188-198.
- [11] 庞英华,顾万帆,金鑫,等.杭州余杭径山茶园土壤养分状况及肥力质量评价[J].中国农学通报,2024,40(9):97-105.  
PANG Y H, GU W F, JIN X, et al. Evaluation of soil nutrient status and fertility quality of tea plantations in Jingshan, Yuhang, Hangzhou[J]. Chinese Agronomy Bulletin, 2024, 40(9):97-105.
- [12] 王彦钦,孟宪刚,李武阳,等.衣藻对盐胁迫下小麦幼苗光合生理指标的影响[J].河南农业科学,2023,52(10):22-29.  
WANG Y Q, MENG X G, LI W Y, et al. Research progress on the effects of abiotic stress factors on wheat photosynthesis[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(10):22-29.
- [13] 杨瑾.羊草抗旱生产力的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.  
YANG J. Research on drought resistance productivity of *Leymus chinensis*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [14] LAKHDAR A, RABHI M, GHNAYA T, et al. Effectiveness of compost use in salt-affected soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1/3):29-37.
- [15] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16):4045-4050.
- [16] 李奇,王艳红,李义纯,等.不同类型调理剂对镉污染土壤修复效果和微生物群落的影响[J].南方农业学报,2022,53(7):1855-1866.  
LI Q, WANG Y H, LI Y C, et al. Effects of different types of conditioners on the remediation effect and microbial community of cadmium-contaminated soil[J]. Southern Journal of Agriculture, 2022, 53(7):1855-1866.
- [17] 崔恒,张久东,宝林,等.不同用量有机酸土壤调理剂对土壤养分和作物生长的影响[J].应用生态学报,2021,32(12):4411-4418.  
CUI H, ZHANG J D, BAO L, et al. Effects of different dosages of organic acid soil conditioners on soil nutrients and crop growth[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12):4411-4418.
- [18] 金磊.气象因子与羊草生长高度的关系研究——以内蒙古草甸草原区为例[J].畜牧与饲料科学,2018,39(10):65-68.  
JIN L. Study on the relationship between meteorological factors and the growth height of *leymus chinensis*-taking the meadow steppe area of inner mongolia as an example[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(10):65-68.
- [19] 代景忠,白玉婷,卫智军,等.羊草功能性状对施肥的动态响应[J].植物生态学报,2023,47(7):943-953.  
DAI J Z, BAI Y T, WEI Z J, et al. Dynamic response of functional traits to fertilization in *Leymus chinensis*[J]. Acta Phytocological Sinica, 2023, 47(7):943-953.
- [20] 那守海,郭盛磊,阎秀峰.氮、磷处理对落叶松幼苗氮素积累和转运的影响[J].东北林业大学学报,2007(12):1-3.  
NA S H, GUO S L, YAN X F. Effects of nitrogen and phosphorus supply on accumulation and translocation in larch seedlings [J]. Journal of northeast forestry university, 2007(12):1-3.
- [21] 侯琼,王英舜,师桂花,等.锡林郭勒典型草原牧草生长特性与主要生态因子分析[J].中国农学通报,2010,26(14):1-7.  
HOU Q, WANG Y S, SHI G H, et al. Grass growing characters and major ecological factors analysis for typical steppe in Xilinguole[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2010, 26(14):1-7.
- [22] 中国饲料成分及营养价值表(2022年第33版)(续)[J].中国饲料,2022(24):63-68.  
China feed Composition and nutritional value table (33rd edition 2022)(continued)[J]. China Feed, 2022(24):63-68.
- [23] 孙万斌,冯刚刚,马晖玲,等.不同紫花苜蓿品种在不同生育期营养品质特性的比较[J].草原与草坪,2017,37(2):63-68.  
SUN W B, FENG G G, MA H L, et al. Nutrition characteristics of different alfalfa varieties in different growth stages[J]. Grassland and Lawn, 2017, 37(2):63-68.
- [24] 李春风.不同居群赖草各生育期的营养成分比较[J].当代畜牧,2017(3):58-60.  
LI C F. Comparison of nutritional components in different populations of *Leymus secalinus* at different growth stages[J]. Contemporary Animal Husbandry, 2017(3):58-60.