

紫花苜蓿对草炭改良露天矿表土替代材料的响应

位蓓蕾, 胡振琪*, 张建勇, 曾纪勇, 蒋知栋

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 矿山生态安全教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要:为探讨添加草炭对露天矿表土替代材料的改良效果,以紫花苜蓿为试材,草炭为改良剂,研究了草炭添加量分别为 0、10、30、50 g·kg⁻¹(干土)与表土替代材料配合施用对紫花苜蓿生长性能及抗逆性能的影响。试验结果显示,添加草炭对紫花苜蓿生长期内的株高、生长率、生物量、叶片 SPAD 值、叶片的细胞膜透性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性及可溶性蛋白含量等指标均有显著影响($P<0.05$)。草炭施用量为 10 g·kg⁻¹(干土)时,紫花苜蓿的株高、生长率、地上及地下部分的生物量、叶片 SPAD 峰值均高于其他处理,叶片细胞膜透性、SOD 酶活性、CAT 酶活性、POD 酶活性及可溶性蛋白等抗逆性指标也显著优于其他处理,所以,当草炭施用量为 10 g·kg⁻¹(干土)时改良效果最佳。

关键词:排土场复垦;表土替代材料;草炭

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)10-2020-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.10.017

The Response of the Peat Improved Open Pit Mine Topsoil Alternative Materials for *Medicago Sativa*

WEI Bei-lei, HU Zhen-qi*, ZHANG Jian-yong, ZENG Ji-yong, JIANG Zhi-dong³

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology(Beijing), Engineering Research Center of Mining Environment & Ecological Safety, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: To research the improvement effect of the peat for the topsoil alternative materials, this paper takes *Medicago sativa* and uses peat as the selected crop and amendment, respectively, and researches the effect of the growth performance and stress resistance for the *Medicago sativa* with the combination of topsoil alternative materials and different added content, which at 0, 10, 30, 50 g peat·kg⁻¹ soil. The results shows that the indexes of height growth, growth rate, biomass, leaf SPAD value, cell membrane permeability, SOD activity, POD activity, soluble protein are greatly influenced by using the new topsoil alternative materials with peat($P<0.05$). Additionally, the indexes of height growth, growth rate, biomass, leaf SPAD value are higher than the other treatments with the added content at 10 g peat·kg⁻¹. Moreover, the indexes of the cell membrane permeability, SOD activity, POD activity, soluble protein are significantly improved compared with the other treatment.

Keywords: rehabilitation for overburden dumps; topsoil alternative materials; peat

内蒙古地区煤炭资源储量丰富且埋深较浅,适于露天开采^[1-2]。针对内蒙古某矿区的调查研究发现,在复垦过程中表土极为重要,但是矿区周围农耕地少、熟土层薄,矿区复垦没有客土来源。因此,在珍惜、保护与合理利用当地表土层的同时,还必须寻找新的表土替代材料,以补充土源不足,这是内蒙古表土贫瘠

露天矿区复垦研究中的重要内容。经过大量的调查研究发现,在被剥离的上覆岩土层中,存在一层赋存量较大,厚度在 16 m 左右的褐色黏土,通过土壤理化特性及出苗率实验发现,将其作为露天矿表土替代材料的可行性极高。但是,由于供试土壤为弱碱性重黏土,养分含量及微生物数量较低,若用其作为表土替代材料,尚需进一步改良^[3-4]。

草炭(Peat)又名泥炭,也叫泥煤,是沼泽发育过程中的产物,草炭质地松软,呈弱酸性,吸水性强,富含有机质、氮、钾、磷、钙、锰等多种营养物质,可以显著改善土壤结构,提高土壤有机质和腐殖质含量,增

收稿日期:2013-03-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010YD03)

作者简介:位蓓蕾(1987—),女,河北石家庄人,在读研究生,从事矿区土地复垦与生态重建方面的研究。

E-mail:weibeilei87@163.com

*通信作者:胡振琪 E-mail:huzq@cumt.edu.cn

加土壤细菌、真菌和放线菌的数量,基本能够满足表土替代材料改良需求。由于本文研究区处于环境恶劣生态脆弱区,而紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为一种适应性广,且具有抗旱、抗寒、耐盐碱等特点的植物,兼具固氮改土、改善土壤生态环境的作用^[9],所以本文选择紫花苜蓿作为供试作物。以作物的生长性能和抗逆性能^[6-7]为切入点,本文研究草炭与表土替代材料的最佳配比及其对土壤改良的实际效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以当地矿区提供的表土替代材料作为供试土壤,其理化性质见表 1。以当地表土作为对照,紫花苜蓿作为盆栽植物。

1.2 试验设计与盆栽试验方法

本试验利用草炭对矿区提供的供试材料进行改良,TS 处理为当地表土,作为对照组,供试材料中草炭添加量的设置为 0、10、30、50 g·kg⁻¹(干土)4 个水平,分别表示为 P0、P10、P30、P50,每个处理 3 个平行。供试土壤经风干后过 2 mm 筛,称取 1 kg 干土,与草炭按添加比例混合均匀,置于口径为 15 cm 塑料盆中,加 250 mL 去离子水造墒,室温下放置两周。紫花苜蓿种子经 24 h 恒温催芽后,均匀地播种于塑料盆中,播种深度为 1~1.5 cm,每盆 20 粒,播种 14 d 后,间苗,每盆留苗 10 棵,开始测量其相关指标。

1.3 测量指标与方法

利用直尺测量作物的自然高度,播种 14 d 后开始观测生长高度,作为株高背景值。收获时用剪刀将紫花苜蓿出土点剪断,分为地上部和地下部。地上部和地下部取出后,用清水洗净表面,而后用去离子水冲洗,并用吸水纸吸干表面水分,测定鲜重。随后将植株样本放入烘箱,65 ℃烘干,室温下回潮,105 ℃杀青 30 min,调温至 70 ℃,烘干至恒重,测定干重。叶片超氧化物歧化酶(SOD)酶活,采用氮蓝四唑染色法测定;叶片过氧化物酶(POD)酶活,采用愈创木酚染色法测定;叶片过氧化氢酶(CAT)酶活,采用紫外吸收

法测定;叶绿素含量采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定;可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝法测定;细胞膜透性采用电导法测定^[8-10]。

1.4 统计分析

利用 Excel 2010 和 SAS 9.2 统计软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 草炭对紫花苜蓿生长性能的影响

2.1.1 草炭对紫花苜蓿株高的影响

植株高度在一定程度上反映了该植物的生长状况,也是反映该植物最为显著的生长特征值,同时还可以反映植物的生产力状况^[11]。由图 1 可知,各处理中紫花苜蓿株高的动态积累随生育期的推进呈 S 型曲线增长。这种特性是由牧草的生物学特性决定的,苜蓿的株高在生育期内的变化呈 S 型增长曲线,符合限制密度下的种群 Logistic 增长模型^[11-13]。

本文从紫花苜蓿出苗后第 14 d 进行观察,在出苗后第 14~28 d 属于紫花苜蓿的苗期,在这一期间株高增长曲线较为平缓;出苗后第 28~56 d 进入紫花苜蓿分枝期,植株的株高呈现较快增长,进入对数增长期;出苗后第 56 d 紫花苜蓿开始进入现蕾期,植株高度增长缓慢,株高达到最大值。将不同处理紫花苜蓿的株高生长动态用 Logistic 模型进行拟合,拟合参数

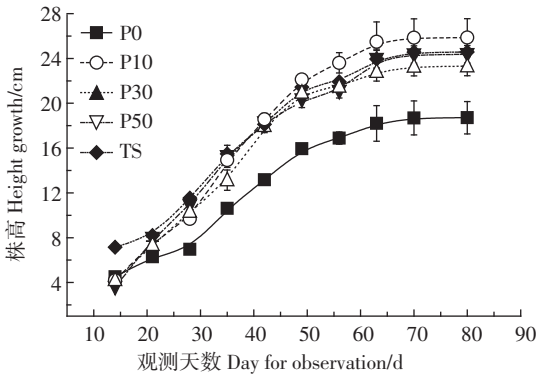


图 1 紫花苜蓿株高变化曲线

Figure 1 Height growth curve of *Medicago sativa*

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 The soil physical and chemical properties

样品 Sample	碱解氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	全氮 Total N /g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	pH 值 pH	质地 Soil texture
供试材料	11.41	27.77	380.33	0.33	10.11	8.52	重黏土
当地表土	51.26	98.03	202	2.81	48.79	7.71	粉砂土
草炭	—	13.2	70.01	9.08	212.15	6.44	—

见表 2,拟合关系均达到极显著水平。各处理中植株最大生长潜力(K)的顺序为:P10>P50>P30>TS>P0。P10 处理中株高最大生长潜力值为 25.98 cm,其值分别是 P0、TS 处理的 1.52 倍、1.13 倍,说明加入草炭对供试材料具有较好的改良效果,其株高增长潜力高于当地表土处理,草炭加入量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干土)时株高达最大值。

表 2 不同处理紫花苜蓿株高生长模拟方程

Table 2 The growth simulation eqution of *Medicago sativa* height for different treatment

处理 Treatment	K/cm	R^2	株高生长方程 The growth simulation eqution
P0	17.11	0.905	$Y=17.11/(1+e^{2.1167-0.0492x})$
P10	25.98	0.973 5	$Y=25.98/(1+e^{3.5676-0.1147x})$
P30	23.51	0.984 7	$Y=23.51/(1+e^{3.0294-0.1016x})$
P50	25.08	0.972 7	$Y=25.08/(1+e^{2.6207-0.083x})$
TS	22.89	0.915	$Y=22.89/(1+e^{2.3694-0.0827x})$

注: k 值的计算是根据实测值,采用三点法求得。

2.1.2 草炭对紫花苜蓿生长率的影响

生长率表示植株高度变化的快慢,它在一定程度上反映了紫花苜蓿生长能力的强弱,并决定着其生物产量^[13]。由于植株的株高变化规律符合 Logistic 模型,对其求一阶导数,即可得到植株的生长速率。图 2 是紫花苜蓿的日均生长率曲线,可以看出,5 个处理条件下紫花苜蓿的日均生长率曲线皆呈单峰曲线。

对 Logistic 模型求二阶导数,令该值等于零可求得植物生长过程中植株的最大生长速率($V_{\max}$),及对应的时间(t_0),计算结果列于表 3。由表 3 可知,紫花苜蓿在测试的生长期,各处理植株最大生长速率($V_{\max}$)的顺序为 P10>P30>P50>TS>P0,植株最大生长速率对应的时间(t_0)的先后顺序为 TS>P30>P10>

P50>P0,即 TS 处理植株最大生长速率出现的最早。对 Logistic 模型求三阶导数,并令该值等于零可求得植株最快生长的起止时间及快速生长持续的天数(Δt),计算结果列于表 3。由表 3 可知,紫花苜蓿进入快速生长持续天数(Δt)的长短顺序为 P0>P50=TS>P30>P10。P10 处理中植株进入快速生长持续的天数最短,表明添加草炭可以有效提高紫花苜蓿的生长速度并可以缩短紫花苜蓿的生长天数,草炭的最佳添加量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干土)。

表 3 不同处理紫花苜蓿生长速度的特征参数

Table 3 The parameters for *Medicago sativa* growth

处理/Treatment	$V_{\max}/\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$	t_0/d	$\Delta t/\text{d}$
P0	0.18	43	61
P10	0.72	31	22
P30	0.59	30	25
P50	0.51	32	31
TS	0.46	29	31

2.1.3 草炭对紫花苜蓿生物量的影响

紫花苜蓿的生物量是衡量其生长适宜性的重要指标。分别测定紫花苜蓿地上植株及地下根系两部分的鲜重、干重及风干重,借此说明不同处理对紫花苜蓿生物量的影响。不同处理条件下,紫花苜蓿地上部分生物量情况见图 3,可以看出,不同处理间地上部分的鲜重具有显著性差异($P<0.05$),其中 TS 处理的地上部分的鲜重明显高于其他处理,分别是 P10 处理的 1.12 倍、P30 处理的 1.26 倍、P50 处理的 1.18 倍、P0 处理的 2.21 倍。地上部分植株的风干重与鲜重具有较高的一致性,TS 处理的地上部分的风干重显著高于其他处理,分别是 P10 处理的 1.64 倍、P30 处理的 1.71 倍、P50 处理的 3.6 倍、P0 处理的 7.2 倍。地上部分干重方面,TS 处理也显著高于其他处理,分别是

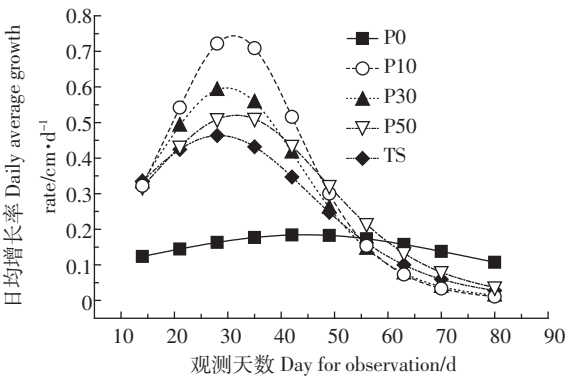


图 2 紫花苜蓿日均生长率曲线

Figure 2 Average daily growth rate of *Medicago sativa*

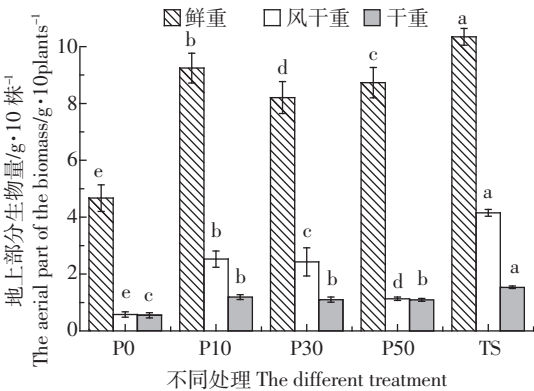


图 3 紫花苜蓿地上部分生物量

Figure 3 The overground parts biomass of *Medicago sativa*

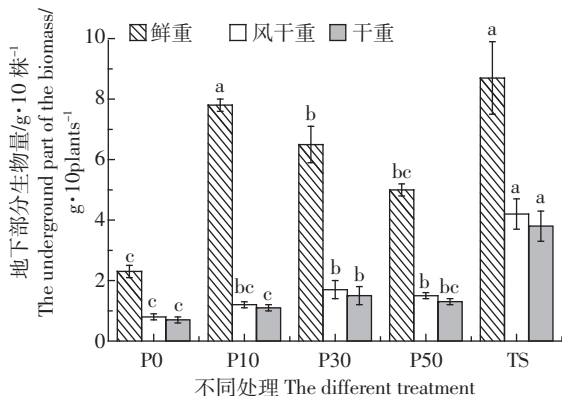


图4 紫花苜蓿地下部分生物量

Figure 4 The underground parts biomass of *Medicago sativa*

P10 处理的 1.28 倍、P30 处理的 1.39 倍、P50 处理的 1.40 倍、P0 处理的 2.78 倍。3 组添加草炭的处理中,当草炭添加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土) 时与当地表土处理的地上部分的生物量最为接近,紫花苜蓿植株的鲜重、干重及风干重也呈现出较高一致性。不同处理条件下,紫花苜蓿地下部分生物量情况见图 4,5 组处理中地下部分生物量由高到低的顺序为 $\text{TS} > \text{P10} > \text{P30} > \text{P50} > \text{P0}$ 。3 组添加草炭的处理中,当草炭添加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土) 时与当地表土处理地下部分的生物量最为接近。

2.2 草炭对紫花苜蓿生理指标的影响

2.2.1 草炭对紫花苜蓿叶片 SPAD 值的影响

植物叶片叶绿素是植物光合作用重要色素,其含量是表征植物品质的重要生理指标之一。叶片色素含量高低,直接影响着作物光合作用的光能利用效率,并最终影响作物生长及品质。叶绿素含量的消长规律是反映叶片生理活性变化的重要手段之一^[14]。图 5 描述了不同处理条件下紫花苜蓿叶片的 SPAD 值随生长发育进程的变化规律,在整个测试期呈“帽形”

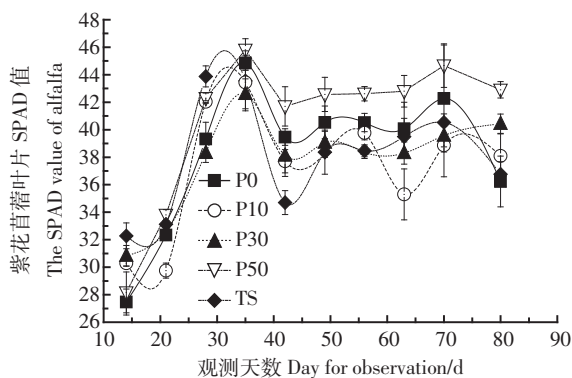


图5 紫花苜蓿叶片 SPAD 值变化曲线

Figure 5 The SPAD value curve of *Medicago sativa*

曲线。整条曲线以分枝期为界限,大致可以分成苗期—分枝期叶片的 SPAD 值逐步上升,分枝期—现蕾期叶片的 SPAD 值不断下降,在现蕾期叶片的 SPAD 值达到平衡状态。紫花苜蓿出苗后第 35 d 左右叶片的 SPAD 值达到峰值,此时,叶片 SPAD 值由高到低的顺序为 $\text{TS} > \text{P10} > \text{P30} > \text{P0} > \text{P50}$,即 TS 处理叶片 SPAD 值最高。从出苗后第 42 d 开始,叶片的 SPAD 值进入平衡期,与紫花苜蓿的株高相比,其叶片 SPAD 值进入平衡期的时间较早,其原因在于植物叶片的叶绿素含量与光照条件有直接关系。由于试验中紫花苜蓿的播种时间在 9 月下旬,随着太阳高度角的变化,光照强度及环境温度都有所下降,导致叶片的 SPAD 值进入平衡期的时间提前。在 5 组处理中,TS 处理的叶片 SPAD 值始终显著高于其他处理,添加草炭处理叶片 SPAD 值明显高于未添加草炭的处理,其中当添加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土) 时,叶片 SPAD 值显著高于其他添加量。

2.2.2 草炭对紫花苜蓿叶片细胞膜透性的影响

生理学上用电导率测定值表示植物组织受伤害的程度,植物叶片的相对电导率越大,说明细胞膜的选择透过性受损越大^[15-16]。图 6 描述了不同处理条件下,紫花苜蓿在 3 个不同生长期叶片细胞膜透性的变化趋势。由图 6 可知,各处理条件下紫花苜蓿叶片的细胞膜透性均呈现先降低后上升的趋势,在紫花苜蓿生长最旺盛的时期即分枝期叶片的细胞膜透性最低;随着生长过程的进行,植株进入现蕾期后,叶片逐渐衰老,其相对电导率增大,细胞膜透性受损,植株的抗逆性减弱。因此,本文主要选择苗期及分枝期不同处理对植株的影响作为评定作物抗逆性的主要依据。随着生长进程的推进,添加草炭的处理表现出较大优势,叶片细胞膜透性显著低于对照(P0)及当地表土

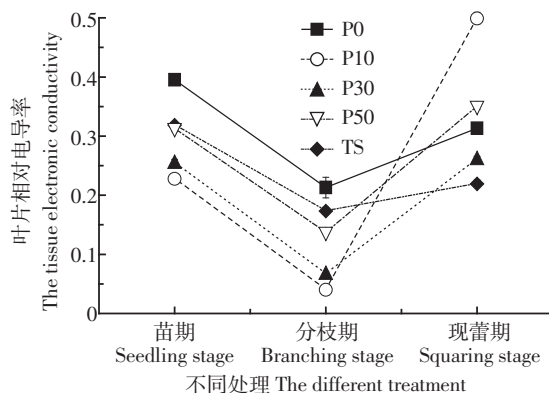


图6 紫花苜蓿叶片不同生长期细胞膜透性的变化趋势

Figure 6 Cell membrane permeability curve of *Medicago sativa*

(TS)处理。当草炭添加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土) 时效果最佳, 叶片的相对电导率最低, 该处理中叶片的细胞膜较为稳定, 这在抵御外界不良环境时将会表现出较大优势。

2.2.3 草炭对紫花苜蓿叶片 SOD、CAT 活性的影响

叶片的 SOD、CAT 酶等作为抗氧化酶对防御活性氧毒害具有重要作用, 它们可以清除植物体内的超氧根阴离子, 增强膜的稳定性^[17-18]。图 7 描述了不同处理条件下, 紫花苜蓿在不同生长时期叶片 SOD 酶活性的变化趋势。由图 7 可以看出, 各处理条件下紫花苜蓿叶片 SOD 酶活性随着植株生长发育过程的进行呈现单峰趋势, 叶片 SOD 酶活性的峰值均出现在植株的分枝期。添加草炭的处理与当地表土处理叶片的 SOD 酶活性始终高于未添加草炭的处理, 其中 P10 及 P30 处理叶片的 SOD 酶活性又始终高于当地表土处理, 说明添加草炭可以有效增加紫花苜蓿叶片的 SOD 酶活性。当草炭添加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土) 时, 叶片的 SOD 酶活性最高。

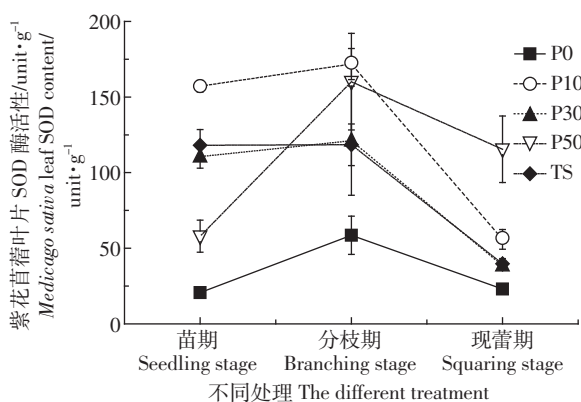


图 7 紫花苜蓿叶片不同生长期 SOD 活性的变化趋势

Figure 7 SOD activity curve of *Medicago sativa*

当叶片的 CAT 酶活性较低时, 表明叶片易衰老死亡。图 8 描述了不同处理条件下, 紫花苜蓿在不同生长时期叶片 CAT 活性的变化趋势。由图 8 可以看出, 只有未添加草炭处理的叶片 CAT 酶活性为单峰趋势, 其他处理的叶片 CAT 酶活性都随着生长进程的推进不断降低, 与当地表土处理相比, P10 处理的效果较好, 在紫花苜蓿的 3 个生长期内叶片的 CAT 酶活性始终较高。

2.2.4 草炭对紫花苜蓿叶片 POD 活性的影响

POD 酶是植株体内重要的抗氧化酶, 可以防止植物细胞内过量活性氧簇对生物大分子与质膜的破坏。此外, 叶片 POD 酶活性又与植物细胞衰老密切相

关。因此, 评价 POD 酶活性的高低与植物生长的关系应与植物生长的特定环境以及植物的生育时期相结合^[19]。图 9 描述了不同处理条件下紫花苜蓿在不同生长时期叶片 POD 酶活性的变化趋势, 5 种处理条件下叶片 POD 酶活性随着植株生长发育过程的进行呈逐步上升趋势, P10 及 P50 处理在植株的不同生理时期叶片 POD 酶活性始终高于当地表土与未添加草炭处理, 表明添加草炭可以增加紫花苜蓿叶片 POD 酶活性, 增强叶片细胞的抗逆性。

2.2.5 草炭对紫花苜蓿叶片可溶性蛋白含量的影响

图 10 描述了不同处理条件下, 紫花苜蓿在不同生长时期叶片可溶性蛋白含量的变化趋势, 5 种处理中叶片可溶性蛋白含量随着植株生长发育过程的进行呈现单峰趋势, 与叶片的 SOD 酶活的变化趋势一致, 并且可溶性蛋白含量均在植株的分枝期达最大值, 进入现蕾期后随着叶片逐渐衰老, 叶片的可溶性蛋白大量丧失。3 个生长期除苗期外, 添加草炭对紫花苜蓿叶片的可溶性蛋白具有显著影响, 分枝期与现

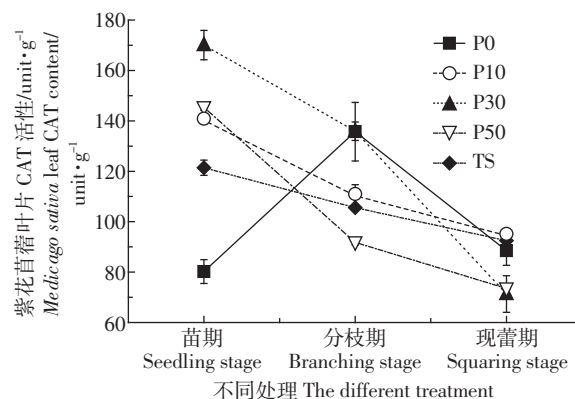


图 8 紫花苜蓿叶片不同生长期 CAT 活性的变化趋势

Figure 8 CAT activity curve of *Medicago sativa*

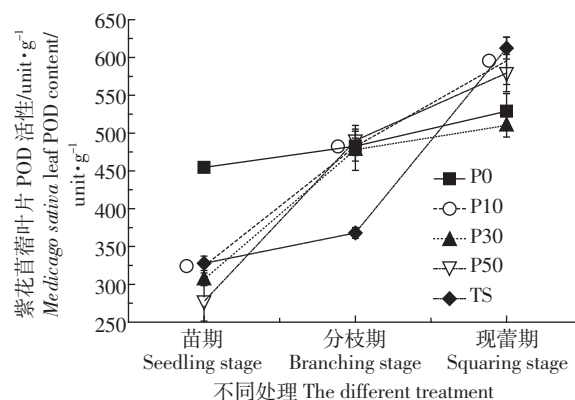


图 9 紫花苜蓿叶片不同生长期 POD 活性的变化趋势

Figure 9 POD activity curve of *Medicago sativa*

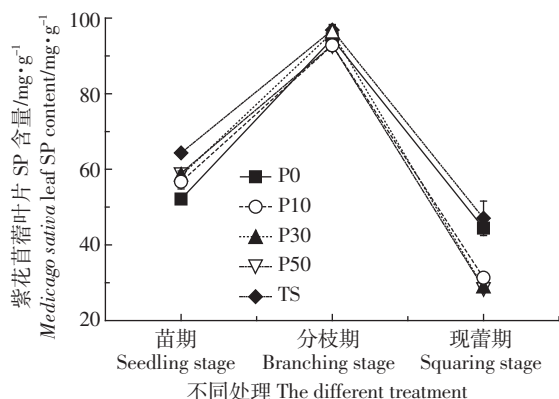


图 10 紫花苜蓿叶片不同生长期可溶性蛋白含量的变化趋势

Figure 10 Soluble protein curve of *Medicago sativa*

蕾期紫花苜蓿叶片的可溶性蛋白含量高于当地表土与未添加草炭的处理。

3 讨论

3.1 添加草炭可提高紫花苜蓿生长性能

通过对紫花苜蓿株高每 7 d 的变化情况的研究,发现其株高的动态积累随生育期的推进符合 Logistic 增长模型,添加草炭后植株的株高得到显著提高,株高的最大生长潜力是未添加草炭处理的 1.52 倍,同时植株的生长速率高于未添加草炭处理,且生长期显著降低,植株地上及地下部分生物量高于空白处理。其原因在于草炭具有改善土壤理化性状、保水保肥性;同时,富含黏粒、有机质等一些植物生长调节剂,能促进植物的生长发育等特点^[20]。由于草炭自身的特性,它不仅可以增加土壤的水分和养分,而且还可以有效提高灌溉水分和化肥的利用率。土壤增施草炭后,草炭中的腐植酸与 NH_4^+ 发生了极其复杂的反应,显著提高了土壤对氮、磷的吸附能力,而氮、磷是植株生长所需的大量营养元素,对植株生长有明显的促进作用;同时,土壤施加草炭可以活跃土壤微生物,减少肥料氮素的损失,提高氮的利用率,延长肥效期,以至于植株的各生长性能得到显著提高。这与张轶婷等研究草炭复配基质可以显著提高黄瓜、番茄、辣椒幼苗生物量、根系活力及叶绿素含量的结果一致^[21-22]。

3.2 添加草炭可提高紫花苜蓿抗逆性能

通过对紫花苜蓿 3 个生长期叶片的细胞膜透性、SOD 酶、CAT 酶、POD 酶活性及可溶性蛋白质含量试验结果的分析,发现添加草炭可以有效提高植株的抗逆性能。植株叶片 SOD 酶、CAT 酶、POD 酶活性及可溶性蛋白质主要由 C、H、O、N 等元素组成,其中 C、H、O 元素可以通过植株的光合作用获得,而 N 元素

的缺失将影响 SOD 酶、CAT 酶、POD 酶的合成及可溶性蛋白质的含量。本文供试土壤中碱解氮及全氮含量较低且质地黏重,当紫花苜蓿进入分枝期即生长旺盛期,供试土壤对植株氮等元素供应不足,使植株蛋白合成受到一定干扰,影响酶系统的分子结构、空间结构,进而影响紫花苜蓿叶片 SOD 酶、CAT 酶、POD 酶活性。添加草炭的处理明显提高了叶片 SOD 酶、CAT 酶、POD 酶的活性,并使之高于对照。这可能就是因为添加草炭使供试土壤营养元素及土壤透气性得到显著改善,促进了植株对氮素的吸收。同时,草炭中富含的腐植酸其自由基属于半醌结构,具有较高的生物活性和生理刺激作用,在植物体的氧化还原反应中发挥重要作用,可使活性氧清除酶系统(SOD、CAT、POD 等)为了维持活性氧的代谢平衡而表现特殊性变化。叶片细胞中 SOD 酶、CAT 酶、POD 酶等活性的增加,能清除植物体内的超氧根阴离子、过量活性氧簇,增强细胞膜的稳定性,减少细胞内部组分电介质外渗,使叶片细胞的相对电导率降低。这有助于减少各种不良环境因素对细胞的影响,可以增强植株的抗旱、抗病、抗低温、抗盐渍能力^[23]。

4 结论

(1)紫花苜蓿株高的动态积累随生育期的推进符合 Logistic 增长模型;草炭的加入可以有效提高紫花苜蓿的生长速率、地上及地下部分的生物量。

(2)草炭对露天矿排土场表土替代材料进行改良,对紫花苜蓿叶片 SPAD 值、细胞膜透性、SOD 活性、CAT 活性、POD 活性、可溶性蛋白等抗逆性能具有较好的改良效用。

(3)草炭施用量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土)时,紫花苜蓿的株高、生长率、地上及地下部分的生物量、叶片 SPAD 峰值均高于其他草炭处理,叶片细胞膜透性、SOD 活性、CAT 活性、POD 活性、可溶性蛋白等抗逆性指标显著优于其他处理。

参考文献:

- [1] 刘春雷,王金满,白中科,等.干旱区草原露天煤矿土地复垦技术分析[J].金属矿山,2011(5):154-157.
LIU Chun-lei, WANG Jin-man, BAI Zhong-ke, et al. Analysis of land reclamation technologies for surface coal mine in arid grassland [J]. Metal Mine, 2011(5): 154-157.
- [2] 台培东,孙铁珩,贾宏宇,等.草原地区露天矿排土场土地复垦技术研究[J].水土保持学报,2002,16(3):90-93.
TAI Pei-dong, SUN Tie-heng, JIA Hong-yu, et al. Restoration for refuse dump of open-cast mine in steppe region [J]. Journal of Soil and

- Water Conservation*, 2002, 16(3):90-93.
- [3] 马彦卿, 李小平, 冯杰, 等. 粉煤灰在矿山复垦中用于土壤改良的试验研究[J]. 矿冶, 2000, 9(3):15-19.
MA Yan-qing, LI Xiao-ping, FENG Jie, et al. Research on application of fly ash in soil amelioration in mine land reclamation[J]. *Mining & Metallurgy*, 2000, 9(3):15-19.
- [4] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6):617-618.
HU Zhen-qi. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6):617-618.
- [5] 杨青川. 苜蓿生产与管理指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003:6-68.
YANG Qing-chuan. Guide of alfalfa production and manage[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2003:6-68.
- [6] 王树会, 高家合. 不同草炭处理对植烟土壤理化性状及烟叶产质影响研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12):377-379.
WANG Shu-hui, GAO Jia-he. The effect of different peat levels on soil physical and chemical traits and tobacco leaf yield and quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(12):377-379.
- [7] 刘国顺, 刘韶松, 贾新成, 等. 烟田施用有机肥对土壤理化性状和烟叶香气成分含量的影响[J]. 中国烟草学报, 2005, 11(3):29-33.
LIU Guo-shun, LIU Shao-song, JIA Xin-cheng, et al. Influence of physico-chemical property of soil and the tobacco aroma composition by using organic fertilizer in the tobacco farmland[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2005, 11(3):29-33.
- [8] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P, et al. Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields[J]. *Biore-source Technology*, 2004, 93(2):145-153.
- [9] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003:213-214.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-jing. Plant physiology experiment guidance [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003:213-214.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000:165-184.
LI He-sheng. The experiment principle and technology of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:165-184.
- [11] 徐春明, 贾志宽, 韩清芳. 巨人 201+Z 苜蓿地上部分生长特性的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(3):481-484.
XU Chun-ming, JIA Zhi-kuan, HAN Qing-fang. Study on growth characteristics of above ground part of *Ameristand* 201+Z *Medicago sativa*[J]. *Acta Botanica Boreali-occident Sinica*, 2003, 23(3):481-484.
- [12] 王庆锁. 苜蓿生长和营养物质动态研究[J]. 草地学报, 2004, 12(4):265-267.
WANG Qing-suo. Dynamics of *Medicago sativa* growth and nutrient in the growing period[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(4):265-267.
- [13] 吴佳. 紫花苜蓿叶片生长动态特征及影响环境因素分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
WU Jia. Analysis of growing dynamic of *Medicago sativa* leaves and affected environmental factors[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [14] 童淑媛, 宋凤斌, 徐洪文. 玉米不同叶位叶片 SPAD 值的变化及其与生物量的相关性[J]. 核农学报, 2008, 22(6):869-874.
TONG Shu-yuan, SONG Feng-bin, XU Hong-wen. Correlation between variation of SPAD value of leaf at different position and biomass of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(6):869-874.
- [15] 苗战霞, 黄占斌, 侯利伟, 等. 再生水灌溉对玉米和大豆抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1338-1342.
MIAO Zhan-xia, HUANG Zhan-bin, HOU Li-wei, et al. Influence of irrigation with reclaimed water on maize and soybean antioxidant system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1338-1342.
- [16] 马晓娣, 王丽, 汪矛, 等. 不同耐热性小麦品种在热锻炼和热胁迫下叶片相对电导率及超微结构的差异[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(5):4-8.
MA Xiao-di, WANG Li, WANG Mao, et al. Difference in relative conductivity and ultrastructure of leaf between two wheat cultivars with different thermotolerance under heat acclimation and heat stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(5):4-8.
- [17] Lee D H, Lee C B. Chilling stress-induced changes of antioxidant enzymes in the leaves of cucumber: In gel enzyme activity assays[J]. *Plant Science*, 2000, 159(1):75-85.
- [18] 王启明. 干旱胁迫对大豆苗期叶片保护酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):918-921.
WANG Qi-ming. Effects of drought stress on protective enzymes activities and membrane lipid peroxidation in leaves of soybean seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):918-921.
- [19] 孙志梅, 薛世川, 梁文举, 等. 不同用量腐植酸复合肥在辣椒上的施用效应及其抗衰老增产机理研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1):81-84.
SUN Zhi-mei, XUE Shi-chuan, LIANG Wen-ju, et al. Effects of different application rates of humic acid compound fertilizer on pepper and its mechanism of anti-senility and incremental yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):81-84.
- [20] 秦玲, 魏钦平, 李嘉瑞, 等. 草炭对砂质土壤保水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10):51-54.
QIN Ling, WEI Qin-ping, LI Jia-rui, et al. Effects of peat on water conserving properties of sandy soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10):51-54.
- [21] 秦玲, 康文怀, 李嘉瑞, 等. 草炭及其改良土壤对氮、磷、钾的吸附特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(1):20-24.
QIN Ling, KANG Wen-huai, LI Jia-rui, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium adsorption characteristics of peat, sandy soil, loamy soil and their mixture[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2009, 29(1):20-24.
- [22] 张铁婷, 崔世茂, 张晓梅, 等. 草炭复配基质特性及对黄瓜、番茄、辣椒幼苗生长的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2):123-128.
ZHANG Yi-ting, CUI Shi-mao, ZHANG Xiao-mei, et al. Characteristic of peat compound substrate and effect on growth of cucumber, tomato and hot pepper seedlings[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2011, 32(2):123-128.
- [23] 孟宪民. 我国泥炭资源的储量、特征与保护利用对策[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4):567-574.
MENG Xian-min. The deposit, characteristic and exploitation strategy of peat resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4):567-574.