

赵霞, 叶林, 纳学伟, 等. 盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿渗透调节物质及抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 782-787.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.04.009

## 盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿渗透调节物质及抗氧化能力的影响

赵霞, 叶林, 纳学伟, 李国昌

(宁夏大学, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 本研究旨在探讨盐碱胁迫下接种丛枝菌根真菌 (AMF) 对苜蓿幼苗耐盐碱性的影响。以紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 为试验材料, 研究接种摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 对苜蓿幼苗渗透调节物质及抗氧化系统的影响。结果表明, 盐碱胁迫下, 与未接菌处理相比, 接种 AMF 处理的苜蓿叶片超氧阴离子 ( $O_2^{\cdot-}$ ) 含量、过氧化氢 ( $H_2O_2$ ) 含量和丙二醛 (MDA) 含量以及电解质透出率较低, 分别降低了 27.05%、40.29%、24.55% 和 45.06%, 其超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性和过氧化氢酶 (CAT) 活性较高, 分别提高了 10.18%、6.77% 和 19.16%, 渗透调节物质可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量较高, 分别提高了 23.33%、10.64% 和 32.38%。说明, 在盐碱胁迫下接种 AMF 可有效提高渗透调节物质可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和游离脯氨酸含量, 增强 SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性, 减少  $O_2^{\cdot-}$  含量、 $H_2O_2$  含量和 MDA 的含量及电解质渗出率, 降低活性氧 (ROS) 水平, 减轻膜脂过氧化伤害, 提高苜蓿耐盐碱胁迫的能力。

**关键词:** 盐碱胁迫; 苜蓿; 渗透调节; 抗氧化

中图分类号: S551<sup>+</sup>.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)04-0782-06

## Influence of arbuscular mycorrhizal fungus on the osmotic adjustment substance and antioxidant system of *Medicago sativa* under salt-alkaline stress

ZHAO Xia, YE Lin, NA Xue-wei, LI Guo-chang

(Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** To determine the influence of *Glomus mosseae*, a kind of arbuscular mycorrhizal fungus (AMF), on the salt tolerance of *Medicago sativa* cv. Gannong No.3 seedlings under salt-alkaline stress, the content of osmotic adjustment substance and the activity of antioxidant system of *M. sativa* were studied. AMF decreased the contents of superoxide anion ( $O_2^{\cdot-}$ ), hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) and malondialdehyde (MDA) and electrolyte leakage rate by 27.05%, 40.29%, 24.55% and 45.06%, respectively, but increased the activities of catalase (CAT), peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) by 10.18%, 19.16% and 6.77%, respectively, compared to control (no AMF inoculation). The AMF also improved the accumulations of soluble sugar, soluble protein and free proline of *M. sativa* seedlings by 23.33%, 10.64%

and 32.38%, respectively. Taken together, the AMF reduced the accumulation of reactive oxygen species (ROS), lowered the contents of  $O_2^{\cdot-}$ ,  $H_2O_2$ , and MDA, and boosted the accumulation of osmotic adjustment substances, thereby improving the tolerance of *M. sativa* seedlings to salt-alkaline stress.

**Key words:** salt-alkaline stress; *Medicago sativa*; osmotic adjustment; antioxidant system

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 宁夏大学自然科学基金项目 (ZR15034; ZR1252); 宁夏自然科学基金项目 (NZ1112); 宁夏中部干旱带特色优势作物品种引选项目 (hzyz201406)

作者简介: 赵霞 (1979-), 女, 山西朔州人, 硕士, 讲师, 主要从事草地资源与生态研究。 (E-mail) zhao\_x2088881@126.com

通讯作者: 叶林, (Email) yelin.3993@163.com

据统计,全球盐渍化土地约  $1.0 \times 10^9 \text{ hm}^2$ , 占陆地总面积的 7%, 中国盐渍化土地约  $3.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占现有耕地的 25%<sup>[1-2]</sup>, 土壤盐渍化面积不断扩大已经成为一个世界性的问题<sup>[3]</sup>。目前, 由于人为不合理灌溉、过度使用化肥、滥砍滥伐破坏植被以及温室效应等原因, 土壤盐渍化问题在中国日趋严重, 已成为中国生态环境和农业可持续发展的限制因素之一<sup>[4]</sup>。紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 属于中等耐盐碱植物, 素有牧草之王的美誉, 并且具有调节土壤酸碱性<sup>[5]</sup>、降低土壤容重、提高土壤孔隙度、增加土壤有机质含量<sup>[6]</sup> 和改善土壤理化性质的作用。紫花苜蓿作为一种优良牧草, 还具有适口性好和营养价值丰富等优点, 在中国各地区广泛种植。综上所述, 在盐碱地区种植紫花苜蓿, 对盐碱地的合理开发利用、生态环境的改善以及牧草业的可持续发展均具有重要意义。

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhiza, AMF) 是陆地生态系统中分布最广泛、最重要的互惠共生体之一。菌根真菌存在于大约 90% 的陆生植物中, 在改善土壤结构和促进植物生长、营养元素吸收、生物循环以及陆地生态系统结构与功能构建等方面具有重要作用<sup>[7]</sup>。

AMF 对提高植物抗逆性、修复污染环境、维持生态系统稳定的作用显著。大量研究结果表明, 丛枝菌根真菌有促进植物生长, 提高植株对矿物质的吸收量, 提高寄主的抗病性、抗逆性和对水分的利用率, 进而促进植物生长发育的作用<sup>[8-10]</sup>。

近年来, 有关盐碱对苜蓿生长发育影响的研究较多, 然而大多数研究主要集中在盐碱胁迫对苜蓿生理特征、根系特征、叶绿素荧光特性、水分利用影响等方面<sup>[11-15]</sup>, 也有学者发现在盐碱胁迫条件下, 接种 AMF 能够改变紫花苜蓿体内酚酸的含量, 积累渗透调节物质, 促进紫花苜蓿自身的生长, 从而提高其耐盐碱性的能力<sup>[16]</sup>。而关于混合盐, 尤其是盐碱胁迫下, 接种 AMF 对苜蓿抗氧化能力影响的研究较少。盐碱胁迫与盐渍化土壤的真实状况更为接近, 模拟该条件进行研究, 对改良土壤盐渍化和促进牧草发展的实际指导作用更强。

中国西北地区的盐渍化土地多为复合型盐碱地, 盐碱成分复杂, 既含有 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等中性盐, 又含有  $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等碱性盐<sup>[17]</sup>, 盐化与碱化作用往往相伴发生。这种由不同盐类混合而引起的混合盐碱胁迫对植物生长的破坏作用比单一盐

类 (如 NaCl) 引起的盐害可能更严重。

本试验拟接种丛枝菌根真菌, 研究其在盐碱胁迫条件下对苜蓿渗透调节物质含量及抗氧化能力的影响, 以期对牧草生产、盐碱地改良等方面提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试紫花苜蓿为甘农三号 (*Medicago sativa* L. cv. Gannong No.3), 由甘肃农业大学草业学院提供。

供试丛枝菌根真菌为摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*; GM), BGC 编号为 BGCHB07B, 国家微生物资源平台编号为 1511C0001BGCAM0049, 由北京农林科学院植物营养与资源研究所丛枝菌根真菌种质资源库提供。

### 1.2 试验设计

试验于 2016 年 3-7 月在宁夏银川西夏区贺兰山军马场日光温室中进行。采用双因素试验设计, 共 4 个处理: 未接种 AMF 未盐碱胁迫对照 (CK)、接种 AMF 未盐碱胁迫处理 (M)、未接种 AMF 盐碱胁迫处理 (S)、接种 AMF 盐碱胁迫处理 (MS)。盐碱混合溶液浓度为 75 mmol/L, 其配方为: 将 NaCl、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  4 种盐按 1:9:9:1 复配混合, pH 值为 9.17<sup>[18]</sup>, 未胁迫处理只浇清水。每个处理 10 盆, 每盆 20 株, 3 次重复, 随机区组排列, 共计 120 盆。

播种前挑选籽粒饱满一致的苜蓿种子, 用 75% 的酒精将其浸泡 1 min, 然后用蒸馏水冲洗。采用塑料花盆 (22.5 cm×20.0 cm) 进行播种, 塑料花盆用 75% 的酒精预先擦洗消毒, 将灭菌的河沙装入塑料花盆中, 每盆约装入 4 kg 河沙。每盆接种 AMF 菌剂 10 g (约含 720 个孢子), 未接菌处理接种等量的灭菌菌剂。每盆播种 30 粒种子, 出苗后间苗到 20 株。生长室温控制在 15~25℃。

苜蓿经过 AMF 侵染 35 d 后, 开始对苜蓿进行盐碱胁迫处理, 每 3 d 浇 1 次盐碱溶液, 共浇 5 次, 处理 15 d, 然后取植株生长点以下第二叶位的叶片进行相关指标测定, 每个处理取 10 株, 重复 3 次。

### 1.3 试验测定指标及方法

株高用直尺测量, 生物量用称质量法测定, 超氧阴离子自由基 ( $\text{O}_2^-$ ) 采用对氨基苯磺酸法测定, 过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 采用碘化钾比色法测定, 丙二醛

(MAD)采用硫代巴比妥酸法测定,电解质渗透率采用电导仪测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定,过氧化氢酶(CAT)活性测定采用高锰酸钾滴定法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法<sup>[19-20]</sup>测定。

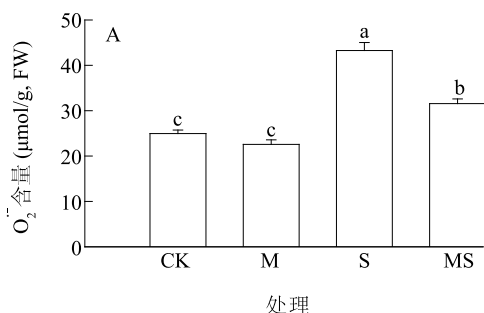
#### 1.4 数据统计分析

试验数据用 Excel 2007 软件进行初步记录和整理,采用 SPSS17.0 软件进行方差分析,用 Sigma-plot10.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿生长的影响

表 1 显示,与 CK 相比,S 处理苜蓿的株高、分蘖数、鲜质量和干质量都有大幅降低,分别下降了 24.83%、21.31%、14.02% 和 5.20%。在盐碱胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿的株高、鲜质量和干质量都有显著提高,分别提高了 23.94%、10.18% 和 4.79%。在未盐碱胁迫条件下, M 处理与 CK 相比, M 处理下苜蓿的株高、分蘖数、鲜质量和干质量都大幅提高,分别提高了 17.22%、21.56%、13.01% 和 2.84%。



CK、M、S、MS 见表 1 注。

图 1 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

Fig.1 Effect of AMF on O<sub>2</sub><sup>-</sup> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> contents of *M. sativa* leaves under salt-alkaline stress

### 2.3 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片 MDA 含量和电解质透出率的影响

图 2 显示,与 CK 相比,S 处理苜蓿叶片的 MDA 含量和电解质透出率显著提高,分别提高了 43.47% 和 116.38%。在盐碱胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的 MDA 含量和电解质透出率显著下降,分别降低了 24.55% 和

表 1 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿生长的影响

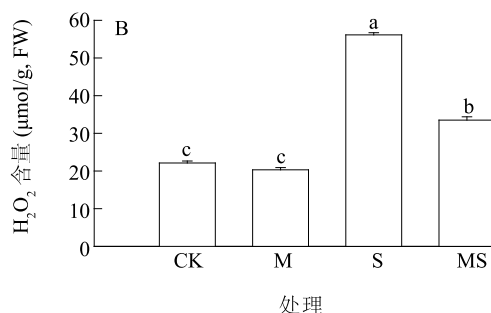
Table 1 Effect of arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) on the growth of *Medicago sativa* seedling under salt-alkaline stress

处理	株高 (cm)	分蘖数 (个)	鲜质量 (g/m <sup>2</sup> )	干质量 (g/m <sup>2</sup> )
CK	28.51b	8.07b	1 903.56b	701.21b
M	33.42a	9.81a	2 151.13a	721.15a
S	21.43c	6.35c	1 636.60d	664.74c
MS	26.56b	7.79bc	803.24c	696.58b

CK:未接种 AMF 未盐碱胁迫对照;M:接种 AMF 未盐碱胁迫处理;S:未接种 AMF 盐碱胁迫处理;MS:接种 AMF 盐碱胁迫处理。同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

图 1 显示,与 CK 相比,S 处理苜蓿叶片的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著提高,分别提高了 73.32% 和 153.70%。在盐碱胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量均显著下降,分别下降了 27.05% 和 40.29%。在未盐碱胁迫条件下, M 处理与 CK 相比, M 处理苜蓿叶片的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量均无显著差异。



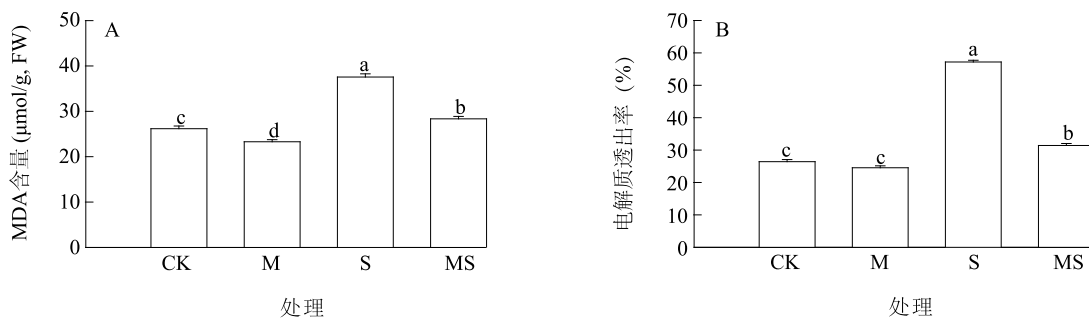
45.06%。在未盐碱胁迫条件下, M 处理与 CK 相比, M 处理苜蓿叶片的 MDA 含量下降了 11.04%, 而 M 处理苜蓿叶片的电解质透出率无显著变化。

### 2.4 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片抗氧化酶的影响

图 3 显示,与 CK 相比,S 处理苜蓿叶片的 SOD 活性显著提高了 37.73%, CAT 活性显著提高了 104.73%, POD 活性显著提高了 34.84%。在盐碱

胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的 *SOD* 活性显著提高了 10.18%,*CAT* 活性显著提高了 19.16%,*POD* 活性显著提高了 6.77%。

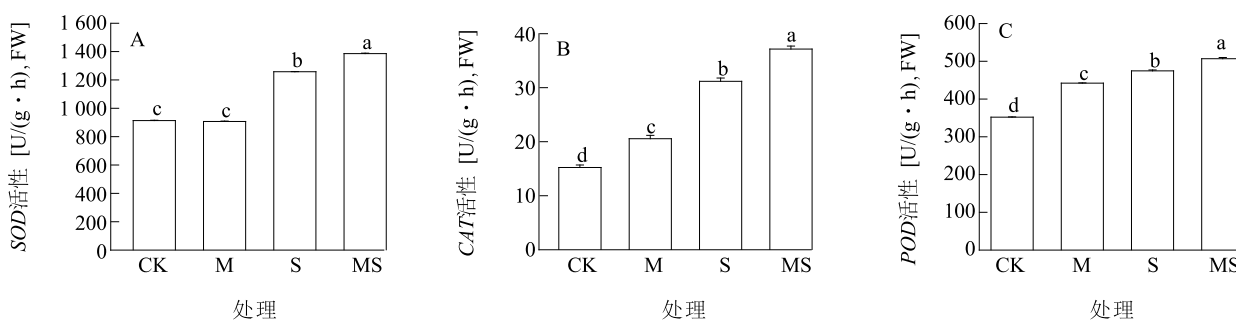
在未盐碱胁迫条件下,M 处理与 CK 相比,M 处理苜蓿叶片的 *SOD* 活性无显著变化,*CAT* 活性显著提高了 34.93%,*POD* 活性显著提高了 25.60%。



CK、M、S、MS 见表 1 注。

图 2 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片 MDA 含量和电解质透出率的影响

Fig.2 Effect of AMF on MDA content and electrolyte leakage rate of *M. sativa* leaves under salt-alkaline stress



CK、M、S、MS 见表 1 注。

图 3 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片 *SOD*、*CAT* 和 *POD* 活性的影响

Fig.3 Effect of AMF on *CAT*, *POD* and *SOD* activities of *M. sativa* leaves under salt-alkaline stress

## 2.5 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片渗透调节物质含量的影响

图 4 显示,与 CK 相比,S 处理苜蓿叶片的可溶性糖含量显著提高了 71.43%,可溶性蛋白含量显著提高了 25.25%,脯氨酸含量显著提高了 77.55%。在盐碱胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的可溶性糖含量显著提高了 23.33%,可溶性蛋白含量显著提高了 10.64%,脯氨酸含量显著提高了 32.38%。在未胁迫条件下,M 处理与 CK 相比,M 处理苜蓿叶片的可溶性糖含量无显著变化,可溶性蛋白含量显著提高了 4.90%,脯氨酸含量显著提高了 9.24%。

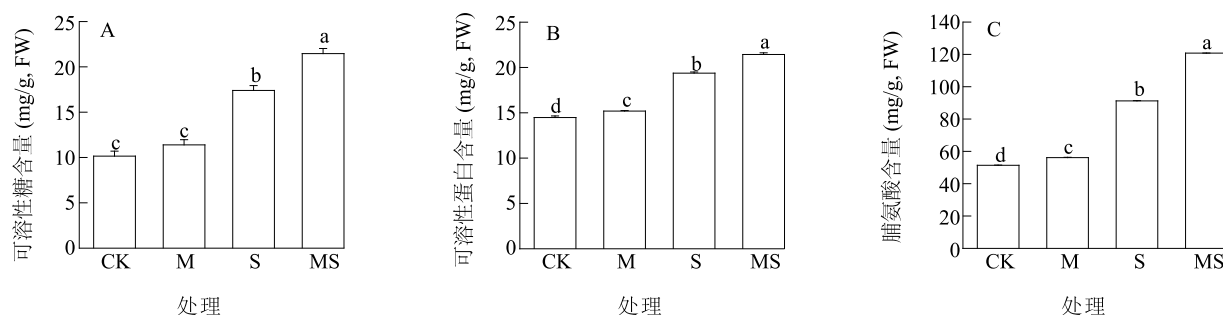
## 3 讨论

AMF 与其宿主植物形成共生关系后,对宿主植

物非常有利。大量研究结果表明,AMF 能够提高宿主植物的光合作用能力,从而促进其生长,增加生物量<sup>[21-22]</sup>,这与本研究结果类似。与对照相比,S 处理下苜蓿的株高、分蘖数、鲜质量和干质量都有大幅降低,表明盐碱胁迫对植株生长的抑制效应显著。在未盐碱胁迫条件下,M 处理与对照相比,M 处理下苜蓿的株高、分蘖数、鲜质量和干质量都有大幅提高;在盐碱胁迫条件下,MS 处理与 S 处理相比,MS 处理苜蓿的株高、鲜质量和干质量都有显著提高,表明无论胁迫与否,接种 AMF 对苜蓿植株均有明显促进生长的作用,利于植株生长,从而提高了苜蓿的耐盐碱性,这与赵琦等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

植物遇到逆境时,会通过一系列生理生化反应来适应逆境,从而减轻逆境对自身的伤害,盐碱胁迫可能会造成牧草减产,是牧草重要的非生物胁迫之





CK、M、S、MS 见表 1 注。

图 4 盐碱胁迫下 AMF 对苜蓿叶片可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量的影响

Fig.4 Effect of AMF on proline, soluble sugar and soluble protein contents of *M. sativa* leaves under salt-alkaline stress

—<sup>[23]</sup>。在逆境下,植物为了维持细胞的膨压,降低细胞内水势,保护细胞免受伤害,会通过增加渗透调节物质的积累量来促进水分及矿物营养元素的吸收,从而稳定蛋白质和酶的活性<sup>[24]</sup>。胁迫会导致植物叶片气孔关闭,过度还原光电子传递链,促使植物细胞线粒体和叶绿体产生许多 ROS,从而氧化伤害植物。 $O_2^{\cdot-}$ 和  $H_2O_2$  的产生使得膜脂中不饱和脂肪酸过氧化,MDA 等过氧化物积累,而 MDA 含量的多少可反映植物细胞质膜的伤害程度<sup>[25-27]</sup>。植物为了自我保护,避免氧化伤害,会开启自身防御保护系统,其中渗透调节系统和抗氧化系统就是植物 2 个重要的抗逆系统<sup>[18]</sup>。

本研究结果显示,盐碱胁迫下,S 处理苜蓿叶片的  $O_2^{\cdot-}$  含量、 $H_2O_2$  含量、MDA 含量和电解质透出率均显著提高,而与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的  $O_2^{\cdot-}$  含量和  $H_2O_2$  含量显著下降,表明盐碱逆境下接种丛枝菌根真菌可有效降低苜蓿叶片细胞  $O_2^{\cdot-}$  和  $H_2O_2$  的含量,抑制膜的过氧化,使细胞维持正常的结构,保证植物正常代谢的进行,这与韩冰<sup>[28]</sup>、吴强盛<sup>[29]</sup>等的研究结果一致。盐碱胁迫下,与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的 MDA 含量和电解质透出率显著下降,降幅达 24.55% 和 45.06%,表明盐碱胁迫下,接种丛枝菌根真菌有效降低了 MDA 含量和电解质透出率,从而减轻膜脂过氧化。这与前人在玉米<sup>[30]</sup>和杨树<sup>[31]</sup>上的研究结果一致。

在逆境胁迫下,植物体内 ROS 水平会明显提高,ROS 积累过多会导致膜脂过氧化,致使植物细胞质和细胞器中生物大分子蛋白质结构改变,功能遭到破坏。植物可依靠体内的抗氧化酶和抗氧化剂

来清除 ROS,减轻其对细胞的伤害<sup>[32]</sup>。本研究结果显示,在盐碱胁迫下,与 S 处理相比,MS 处理苜蓿叶片的 SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性均有显著提高,表明接种 AMF 有效提高了苜蓿体内的 SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性,增强了对氧自由基的清除能力,从而增强了苜蓿的耐盐碱性。

在逆境下,植物对水分的吸收和利用情况直接影响植物的生长发育,盐碱胁迫下植物会产生和积累一些有机渗透调节物质,以此来缓解胁迫对植物造成的伤害并降低胞内渗透势,维持体内水分平衡以及各种生理生化过程的正常进行<sup>[33-34]</sup>。本研究结果表明,与 CK 相比,M 处理苜蓿叶片的可溶性蛋白含量和脯氨酸含量显著提高,而可溶性糖含量无显著变化。在盐碱胁迫下,MS 处理可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量均高于 S 处理,表明盐碱胁迫下,接种 AMF 提高了苜蓿可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和游离脯氨酸含量,促进了其水分及矿质营养元素的吸收,从而维持细胞膨压,降低细胞内水势,稳定蛋白质和酶的活性,保护细胞免受逆境的伤害,提高了苜蓿耐盐碱的能力。这与前人在番茄<sup>[35]</sup>、羊草<sup>[36]</sup>上的研究结果一致。赵琦<sup>[16]</sup>研究发现,盐碱胁迫条件下接种 AMF 后,紫花苜蓿的可溶性蛋白含量和脯氨酸含量明显高于未接种植株,与本试验结果一致。

#### 参考文献:

- [1] 杜利霞,董宽虎,杨桂英,等.不同盐碱化草地对披碱草光合生理特性的影响[J].草业学报,2011,20(5):49-56.
- [2] TESTER M, DAVENPORT R.  $Na^+$  tolerance and  $Na^+$  transport in higher plants[J]. Annals of Botany, 2003, 91(5):503-527.

- [3] CINATL J, MORGENSTERN B, BAUER G, et al. Glycyrrhizin, an active component of liquor rice roots, and replication of SARS-associated coronavirus [J]. *The Lancet*, 2003, 361( 9374 ): 2045-2046.
- [4] 王善仙,刘宛,李培军,等. 盐碱土植物改良研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27( 24 ): 1-7.
- [5] 张国盛,黄高宝,张仁陟,等. 种植苜蓿对黄绵土表土理化性质的影响[J]. *草业学报*, 2003, 12( 5 ): 88-93.
- [6] 王继和,杨自辉,胡明贵,等. 干旱区盐渍化土地综合治理技术研究[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9( 1 ): 64-66.
- [7] WANG B, QIU Y L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants[J]. *Mycorrhiza*, 2006, 16: 299-363.
- [8] BONFANTE P, GENRE A. Mechanism underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis [J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 48.
- [9] LATEF A A H A, CHAOXING H. Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33( 4 ): 1217-1225.
- [10] AMBO P B N, ETHIOPIA E A, SERFOJI P, et al. Management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* on tomato cv Pusa Ruby. by using vermicompost, AM fungus, *Glomus aggregatum* and mycorrhiza helper bacterium, *Bacillus coagulans* [J]. *Journal of Agricultural Technology*, 2010, 6( 1 ): 37-45.
- [11] 张永峰,殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *草业学报*, 2009, 18( 1 ): 46-50.
- [12] 张永峰,梁正伟,隋丽,等. 盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2009, 18( 4 ): 230-235.
- [13] 张晓磊,刘晓静,齐敏兴,等. 混合盐碱对紫花苜蓿苗期根系特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21( 3 ): 340-346.
- [14] 张晓磊,刘晓静,齐敏兴,等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿苗期生长特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2013, 33( 1 ): 16-20.
- [15] 刘晓静,张晓磊,齐敏兴,等. 混合盐碱对紫花苜蓿种子萌发及幼苗期叶绿素荧光特性的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21( 3 ): 501-507.
- [16] 赵琦,包玉英. 混合盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长及2种酚酸含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2015, 35( 9 ): 1829-1836.
- [17] HASEGAWA P M, BRESSAN R A, ZHU J K, et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2000, 51( 1 ): 463-499.
- [18] HU X, ZHANG Y, SHI Y, et al. Effect of exogenous spermidine on polyamine content and metabolism in tomato exposed to salinity-alkalinity mixed stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57: 200-209.
- [19] 李合生,孙群,赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [20] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [21] 张璐,张倩,叶宝兴. 盐胁迫下丛枝菌根真菌(AMF)对紫花苜蓿生长的影响[J]. *山东农业科学*, 2010( 3 ): 32-37.
- [22] AASAMAA K, HEINSOO K, HOLM B. Biomass production, water use and photosynthesis of *Salix* clones grown in a wastewater purification system [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34( 6 ): 897-905.
- [23] 范苏鲁,苑兆和,冯立娟,等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22( 3 ): 651-657.
- [24] HENDERSON D E, JOSE S. Biomass production potential of three short rotation woody crop species under varying nitrogen and water availability [J]. *Agroforestry Systems*, 2010, 80( 2 ): 259-273.
- [25] 逢洪波,谷思雨,马纯艳,等. 盐胁迫对欧洲千里光幼苗生理生化特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43( 12 ): 274-276.
- [26] 刘婷. 丛枝菌根真菌(AMF)调控杨树生长及干旱响应机制的研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2014.
- [27] 韩金龙,李慧,蔺经,等. 核黄素对盐胁迫下杜梨叶片抗氧化系统的影响[J]. *江苏农业学报*, 2015, 31( 4 ): 893-898.
- [28] 韩冰,贺超兴,闫妍,等. AMF对低温胁迫下黄瓜幼苗生长和叶片抗氧化系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44( 8 ): 1646-1653.
- [29] 吴强盛,邹英宁,夏仁学. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对红橘叶片活性氧代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18( 4 ): 825-830.
- [30] SHENG M, TANG M, ZHANG F F, et al. Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress [J]. *Mycorrhiza*, 2011, 21( 5 ): 423-430.
- [31] 刘婷,唐明. 丛枝菌根真菌对杨树生长、气孔和木质部微观结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38( 9 ): 1001-1007.
- [32] GONG M, TANG M, CHEN H, et al. Effects of two *Glomus* species on the growth and physiological performance of *Sophora davidii* seedlings under water stress [J]. *New Forests*, 2013, 44( 3 ): 399-408.
- [33] 陈万超. 三种经济植物抗碱生理机制研究[D]. 长春:东北师范大学,2011.
- [34] 梁新华,刘凤敏. NaCl和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫对甘草幼苗渗透调节物质含量的影响[J]. *农业科学研究*, 2006, 27( 2 ): 96-98.
- [35] WANG X, GENG S, RI Y J, et al. Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130( 1 ): 248-255.
- [36] 刘滨硕,康春莉,王鑫,等. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30( 23 ): 166-173.

(责任编辑:王妮)