

# NaCl 胁迫对接种 AMF 费菜生长和 叶绿素含量及荧光参数的影响

王一鸣, 唐 剑, 龙胜举, 赵英鹏, 贺忠群

(四川农业大学园艺学院, 四川 成都 61130)

**摘要:** 试验以费菜 (*Sedum aizoon* L.) 为材料, 研究了不同浓度 NaCl (0、8、12、16、20 g·kg<sup>-1</sup>) 处理下接种 GMH、GMA 28 d 费菜幼苗的生长、叶绿素含量及叶绿素荧光参数变化。结果表明, 当 NaCl 浓度在 0~8 g·kg<sup>-1</sup> 时, 随着盐处理浓度的增大, 费菜叶绿素含量增加, 初始荧光 ( $F_0$ ) 增大, 盐害指数增大, 最大荧光 ( $F_m$ )、光系统 II (PSII) 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 下降、实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 减小, 非光化学猝灭 ( $NPQ$ ) 上升, 叶片通过调节热耗散维持较高的光化光能量分配; 光化学猝灭 ( $qP$ ) 与 PSII 电子传递速率 ( $ETR$ ) 降低, 电子传递受到抑制。NaCl 浓度超过 8 g·kg<sup>-1</sup> 时, 光保护机制作用遭到破坏。接种 AMF 费菜根长、株高、根冠比、根系活力与对照 CK 相比均有显著增加。接种 AMF 植株的  $F_v/F_m$  得到明显提高, 减轻了盐害对费菜电子传递速率和光能转化效率的影响, 并配合通过增加热耗散来降低过剩激发能对 PSII 的伤害, 同时维持尽量多的能量参与光化学反应, 提高了费菜的光合能力, 增强了费菜的盐耐受程度, 但当 NaCl 浓度超过 12 g·kg<sup>-1</sup> 时, 盐害同样也伤害费菜的 PSII。同时, 接种 GMA 提高费菜耐盐性的效果高于接种 GMH。

**关键词:** NaCl 胁迫; 费菜; AMF; 叶绿素; 荧光参数; 盐害指数

**中图分类号:** S647 **文献标志码:** A

## Effect of AMF on growth and chlorophyll II fluorescence parameters of *Sedum aizoon* L. seedlings under NaCl stress

WANG Yi-ming, TANG Jian, LONG Sheng-ju, ZHAO Ying-peng, HE Zhong-qun

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 61130, China)

**Abstract:** *Sedum aizoon* L. seedlings were treated with NaCl (0, 8, 12, 16, 20 g·kg<sup>-1</sup>) in plastic pots with soil. We studied the effects of NaCl on growth, chlorophyll content and chlorophyll II fluorescence parameters after 28 days. The results indicated that with the increase of NaCl concentration in the range of 0 g·kg<sup>-1</sup> to 8 g·kg<sup>-1</sup>, Chlorophyll content, minimal fluorescence ( $F_0$ ), and the salt injury index increased, while maximum fluorescence ( $F_m$ ), photochemical maximum efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ), actual photochemical efficiency ( $\Phi_{PSII}$ ), non-photochemical quenching coefficient ( $NPQ$ ), and the ability of leaves to transform energy decreased compared with the control. In addition, photochemical quenching coefficient ( $qP$ ) and electron transport rate ( $ETR$ ) decreased. Treatment of 8 g·kg<sup>-1</sup> NaCl caused damage of photo-protective mechanisms. After inoculation with different AMF, the root length, plant height, root-shoot ratio, root activity were significantly increased compared with the control.  $F_v/F_m$  was significantly increased under the stress by inoculated with AMF. Inoculation with AMF reduced the damage of electron transfer rate, light energy conversion efficiency, the damage to PSII resulted from the excess excitation energy by increasing thermal dissipation, and maintain as much as energy to participate in photochemical reactions. It improved the photosynthetic ability of *Sedum aizoon* L. and eventually enhanced plant resistance to salt stress. However, when the concentration exceeded 12 g·kg<sup>-1</sup>, PSII also suffered from damages. Compared with GMH, GMA can improve the salt tolerance of *Sedum aizoon* L.

**Keywords:** NaCl stress; *Sedum aizoon* L.; arbuscular mycorrhizal fungus; chlorophyll; fluorescence parameters; salt injury index

费菜 (*Sedum aizoon* L.), 别名景天三七、养心菜, 景天科, 是一种既可食用也可药用的多年生草本开花植物, 可以作为野菜食用, 具有清热凉血、滋养肝脏的功能, 尤其是对心脏病有特殊疗效, 同时也可作为园林绿化、公路绿化植物, 成为近年来的重要研究对象<sup>[1]</sup>。

土壤盐渍化已经成为许多国家阻碍农业发展的重要因素, 根据联合国粮食及农业组织记录资料显示, 地球盐碱土面积已经达到  $9.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 其中有  $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$  土地因为土壤盐渍化已无法耕种<sup>[2]</sup>。当前, 随着工农业的发展, 土地越来越稀缺, 盐渍土复垦投资持续增加<sup>[3]</sup>, 盐碱地改造已经开始被高度重视。

丛枝菌根真菌与植物根系可以共生, 它一方面直接影响植物的生理机能, 另一方面也可以影响宿主植物的生长<sup>[4]</sup>。近年来, 试验发现丛枝菌根真菌能提高大部分植物耐盐性, 将 AMF 应用到盐碱地改良是创新性的解决方案, 如 AMF 和植物根系的共生体菌根 (AM) 可以修复有机污染土壤和重金属土壤<sup>[4-5]</sup>。另外, 农业生产利用 AMF 还可以降低化学复合肥料的使用<sup>[6]</sup>。因此探索 AMF 对费菜的影响无论是对于推广费菜还是改良盐碱地都尤为重要。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试费菜由四川农业大学实践教学基地提供。试验使用基质为粘土、腐叶土、河沙按体积比 1:1:1 混合配置的营养土。

试验使用的丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae* (GMA) 和 *Glomus mosseae*-3 (GMH) 由中国农业科学院蔬菜研究所提供, 各菌剂内 AMF 孢子含量约为 312 个孢子/20 g 菌剂。

### 1.2 方法

1.2.1 试验设计 2016 年 5 月选取一年生费菜近地端 4~5 cm 长且粗细一致的茎, 带 3~4 个节, 采用 800 倍的多菌灵溶液进行灭菌处理, 灭菌后备用。供试基质过 10 目筛, 高温消毒, 冷却后备用。营养钵的规格为  $\Phi 12 \text{ cm}$ , 用 75% 的酒精灭菌。其它接种工具均使用 75% 的酒精擦拭灭菌。在营养钵底部装入 100 g 灭菌基质, 均匀撒入 100 g 菌剂, 上层再覆盖基质 150 g。CK、GMH、GMA 各接种 110 钵, CK 为接种灭菌菌剂 100 g。扦插费菜枝条, 每钵 3 株, 浇透水, 使用托盘对渗出水进行回收, 避免菌剂流失。通过浇灌 1/2 霍格兰营养液进行常规管理。扦插接菌 50 d 后, 进行 NaCl 处理。试验设置 5 个 NaCl 浓度梯度, 分别为 0、8、12、16、20  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 按照干土

重量配成盐溶液分别处理接有 GMA、GMH 和 CK 的费菜, 共计 15 个处理, 每个处理 20 钵。

#### 1.2.2 项目测定及方法

(1) AMF 侵染率测定: 扦插接菌 45 d 时对 AMF 侵染率进行测定, 将土壤置于水中, 取出费菜的根系, 用水洗净, 剪成长约 1 cm 的根段, 置于 FAA 溶液中固定 24 h, 采用曲利苯蓝染色法<sup>[7]</sup>观察菌根侵染情况, 统计菌根侵染率。

菌根侵染率 (%) = 丛枝菌根侵染根段长度 / 观察根段长度  $\times 100\%$

(2) 盐害指数测定: 处理 28 d 参照秦红艳<sup>[8]</sup>的方法, 观察不同 NaCl 浓度处理下叶片形态、色泽的变化。受害分级标准: 0 级: 叶片伸展, 生长正常; 1 级: 少量叶片边缘干枯或黄化; 2 级: 50% 叶片及少量茎段干枯或黄化; 3 级: 80% 以上叶片黄化, 50% 以上茎段干枯; 4 级: 完全死亡。盐害指数 (%) =  $\sum$  (代表级数  $\times$  株数) / (最高级值  $\times$  总株数)  $\times 100\%$ 。

(3) 叶绿素含量测定: 处理第 28 d 测定, 叶绿素含量测定参考张以顺<sup>[9]</sup>的实验方法, 选取自顶向下第 3~5 片叶, 计算出叶绿素含量。

(4) 叶绿素荧光参数测定: 盐处理后 28 d, 选取各处理费菜自顶部向下第 3 片完全展开叶, 采用 PAM-2500 荧光仪 (Walz, Effeltrich, Germany), 利用 2030-B 叶夹测定叶绿素荧光参数。首先将叶片暗适应 30 min, 参照 Cuddy<sup>[10]</sup>的方法测定荧光诱导曲线的慢速下降动力学并进行淬灭分析。得到  $F_m'$ 、 $F_o'$ 、 $ETR$ , 继而算出  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $NPQ$ 、 $qP$ 。每处理测定重复 3 次。

(5) SOD 的测定: 采用氮蓝四唑发测定 (NBT 法), 选取自顶部向下第 3 片完全展开叶进行测定。

(6) 生长及形态指标测定: 每处理取 10 株完整植株进行根长、株高、干重的测定, 其中采用游标卡尺测定最长根和最长茎的长度, 干重采用烘干称重法。依据根干重和地上部分干重算出根冠比 = 根干重 / 地上部分干重。处理第 28 d 测定。

### 1.3 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据统计及绘图, 用 SPSS 软件计算试验数据的平均值和标准差, 采用最小显著差异法 (LSD) 进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 AMF 对费菜的侵染情况

由表 1 可以看出, GMH 和 GMA 对费菜都有较高的侵染率, 接种 GMA 的侵染率高于接种 GMH 植株且有显著性差异, 说明丛枝菌根真菌与费菜具有

较好的共生关系,可以进一步探索 AMF 对费菜耐盐性的影响。

表 1 AMF 对费菜的侵染率

Table 1 The AMF colonization of *Sedum aizoon* L.

AMF 处理 AMF Treatment	侵染率/% Infection rate
GMH	77.31 ± 2.36b
	15.758 ± 0.21cde
	16.269 ± 0.638abc
	15.041 ± 0.236f
	15.033 ± 0.461f
GMA	89.18 ± 1.98a
	16.462 ± 0.092ab
	16.519 ± 0.604ab
	15.300 ± 0.265ef
	15.300 ± 0.090ef

注:不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Different letters index indicate significant difference at 5% level.

## 2.2 NaCl 胁迫下费菜接菌苗的盐害指数

由表 2 分析可知,CK 处理在 NaCl 处理浓度为  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时即有盐害迹象,但盐害指数较低,随着盐浓度升高,盐害指数逐渐增加,在 NaCl 处理浓度为  $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,植株在第 14 d 即枯萎。接种 AMF 的费菜与 CK 处理相比,明显增强了植株对盐胁迫的耐受性,在  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  才有较小的盐害指数,超过这一浓度盐害指数也大幅上升。在相同处理条件下,接种 GMA 的费菜表现出比接种 GMH 的费菜更低的盐害指数,说明 GMA 与 GMH 相比,提高费菜耐盐性的能力更强。

## 2.3 NaCl 胁迫下 AMF 对费菜生长的影响

由图 1 可知,费菜根长随盐胁迫浓度升高而呈先增后减的趋势。在接种 GMH 和 GMA 条件下,费菜根长在 NaCl 处理浓度为  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到峰值。在盐浓度低于  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的处理下,接种 GMH、GMA

费菜根长均小于同浓度条件下的 CK 植株。在浓度大于  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 NaCl 胁迫条件下,随着盐处理浓度升高,CK 植株的根长逐渐低于接种 AMF 的费菜根长,说明在较高的盐胁迫下,AMF 可以在一定程度上缓解盐胁迫对植株根系的伤害,且接种 GMA 的费菜根系表现出更强的耐盐性。

表 2 NaCl 胁迫下费菜的盐害指数/%

Table 2 The salt injury index of *Sedum aizoon* L. under NaCl stress

接种处理 Treatment	NaCl 处理浓度/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) NaCl concentration				
	0	8	12	16	20
CK	0	30.17	67.51	81.38	100
GMH	0	0	21.38	66.87	73.68
GMA	0	0	11.37	47.36	68.59

植株的株高变化与根长相似,也基本呈现出先升高后降低的趋势,同时接种 AMF 的费菜的株高显著高于 CK 处理。其中接种 GMH 的费菜株高在  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到最大值,相比 CK 提高了 29.79%,接种 GMA 的费菜株高在  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到最大值,相比 CK 提高了 42.13%。说明 AMF 对植株的生长具有促进作用,同时可提高费菜的耐盐性,且 GMA 更有优势。

由图 2 可知,在不同 NaCl 处理浓度下,盐浓度越大,根系受到伤害越大,根冠比越小。CK 和 GMH 的根冠比峰值出现在  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理浓度,接种 GMA 的费菜根冠比在处理浓度为  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到峰值。在未受到盐胁迫时,接种了 GMA 的费菜根系活力比 CK 高 78%,接种 GMH 的根系活力比 CK 高 16%。随着 NaCl 浓度升高,根系活力呈现先升高后降低的趋势,其中 CK 在  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时根系活力最强,接种 AMF 的费菜在  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时根系活力最强。其中接种 GMA 的根系活力均显著高出 GMH 和 CK,说明接种 GMA 可显著提高费菜的根系活力。

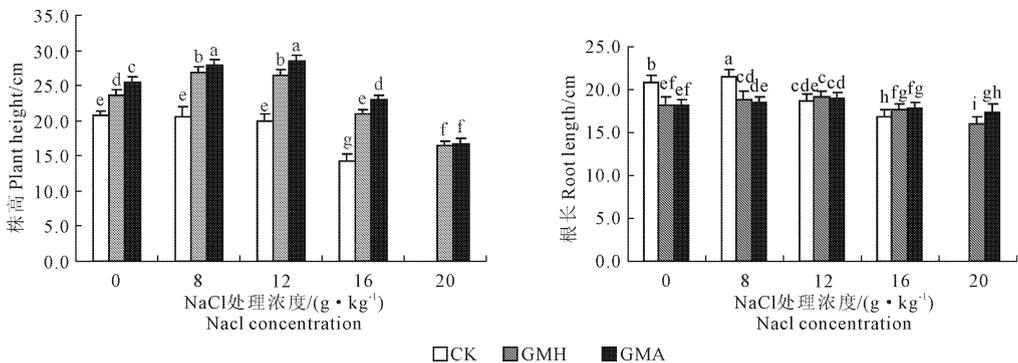


图 1 NaCl 胁迫下 AMF 对费菜株高和根长的影响

Fig. 1 Effects of AMF on plant height and root length of *Sedum aizoon* L. under NaCl stress

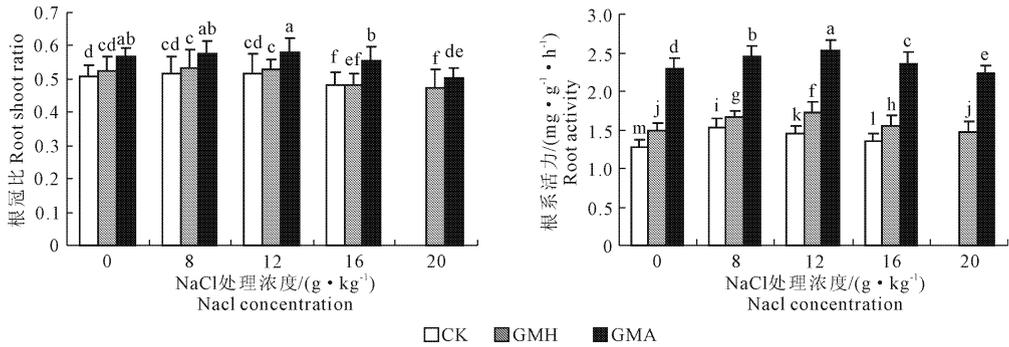


图2 NaCl胁迫下AMF对费菜根冠比和根系活力的影响

Fig.2 Effects of AMF on activity of *Sedum aizoon* L. root and its root/shoot ratio

#### 2.4 NaCl胁迫下AMF对费菜叶绿素荧光参数的影响

$F_0$ 为充分暗适应的光合机构的初始荧光强度,是PS II处于完全开放时的荧光产量,PS II天线热耗散的增加常导致 $F_0$ 的降低,PS II反应中心的破坏或者可逆失活则引起 $F_0$ 的增加<sup>[11]</sup>。 $F_m$ 为暗适应叶片最大荧光产量,是PS II处于完全关闭时的荧光产量,可以反映通过PS II的电子传递情况<sup>[12]</sup>。 $F_v/F_m$ 是充分暗适应的光合机构潜在的PS II光化学效率,其大小可以反映光抑制的程度<sup>[13]</sup>。

研究发现(图3),随着盐处理浓度的增加, $F_0$ 先增大后减小,CK的 $F_0$ 峰值出现在 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而接种了GMH或者GMA的 $F_0$ 峰值出现在 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$ 均呈现出一个下降的趋势,当到达 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,CK植株枯萎,接种AMF的植株的各项参数均在一个较低的水平处理,表明PS II反应中心随着盐胁迫程度的加重开始发生可逆失活或者被破坏,光合电子传递活性遭到抑制。并且随着盐胁迫程度的增加,实际光化学效率 $\Phi_{PS II}$ 的下降幅度要大于最大光化学效率 $F_v/F_m$ 的下降幅度,表明光抑制现象从NaCl处理浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时就已经产生。

光化学淬灭( $qP$ )代表PS II原初电子受体QA的氧化还原状态和PS II开放中心的数目,其值越大,PS II的电子传递活性越高<sup>[15]</sup>。非光化学淬灭( $NPQ$ )是通过调节性光保护机制耗散为热的能量与被耗散为热量和发出荧光的能量的比值,代表着叶片热耗散功能的强弱及光合机构的损伤程度。随着盐胁迫程度的加重, $qP$ 表现出逐渐下降, $NPQ$ 则是先上升(图3),NaCl处理浓度为 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到峰值后开始下降。表明随着盐胁迫程度的加重,会导致 $qP$ 的显著下降,对费菜PS II反应中心的电子传递活性造成严重的影响。同时 $NPQ$ 的先上升后下降,表明植株通过增加热耗散来缓解盐胁迫对光合作用的影响,当盐胁迫进一步加重,达到 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$

时, $NPQ$ 开始降低,表明此时PS II遭到了严重破坏,导致热耗散能力开始降低。

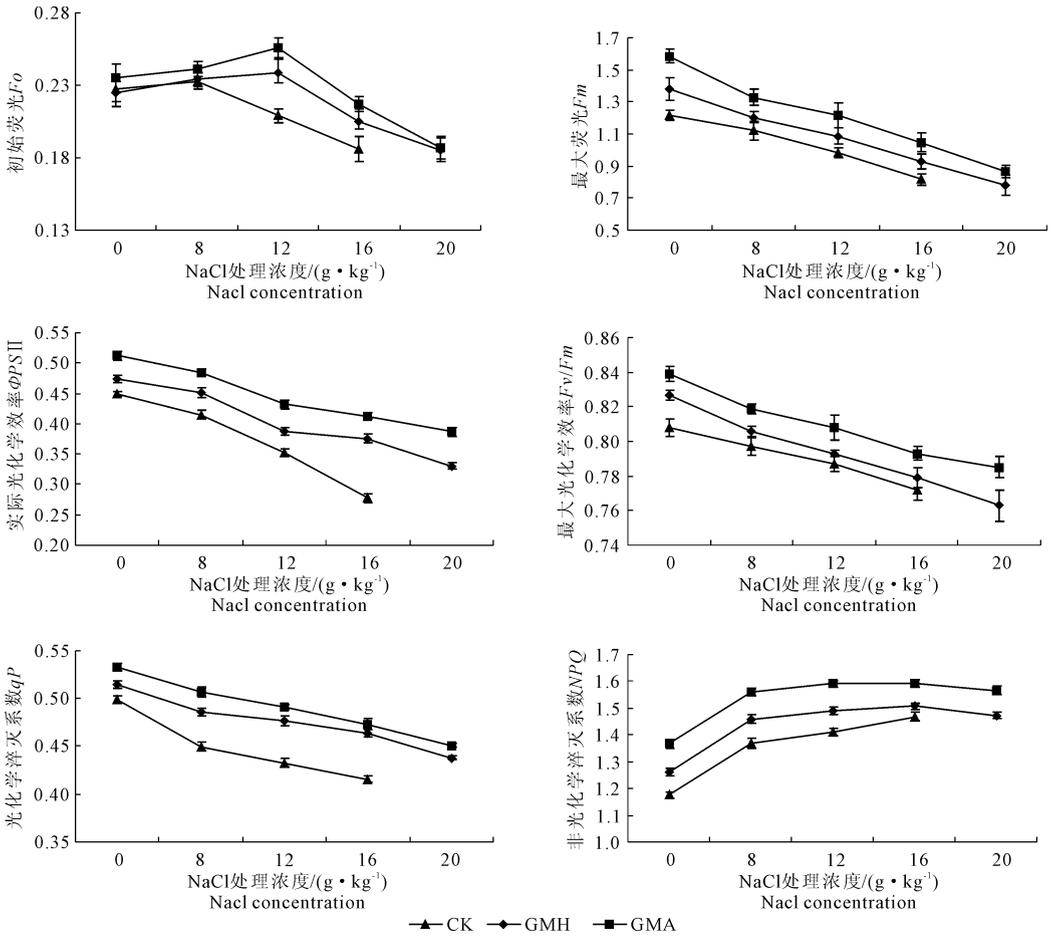
而接种AMF的植株的各项参数在相同的盐浓度下均要显著高于CK处理,说明接种AMF对于提高植株的光合能力、增加植株的热耗散能力以及在盐胁迫的条件下保护植株的光合机构具有一定的作用。

#### 2.5 NaCl胁迫下AMF对费菜电子传递速率的影响

$E_{TR}$ (电子传递速率)反映了电子传递活性的高低。研究发现(图4),在未受到盐胁迫时,接种AMF的费菜 $E_{TR}$ 均明显高于CK,表明AMF对于植株的生长具有促进作用,增加了植物对养分的吸收能力。当受到盐胁迫时 $E_{TR}$ 下降,并且这种趋势随着处理浓度的升高而增大。当NaCl处理浓度为 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,CK较未受到胁迫时 $E_{TR}$ 下降46%,GMH较未受到胁迫时 $E_{TR}$ 下降29.4%,GMA较未受到胁迫时 $E_{TR}$ 下降29.2%。相同盐处理浓度下,三处理 $E_{TR}$ 有下列大小关系:GMA > GMH > CK,表明在盐胁迫的过程中AMF对于植株具有一定的缓解作用。

#### 2.6 NaCl胁迫下费菜叶绿素含量与SOD的变化

分析图5可知,随着NaCl处理浓度的升高,费菜叶绿素总量呈现先上升后下降的趋势,SOD则表现出持续上升的趋势,但是CK处理在大于 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的NaCl处理浓度后SOD的含量开始下降。表明随着盐胁迫的加重,超氧化物大量产生,光合机构开始受到损伤,为了保护光合机构免遭破坏,植株通过增加叶片内叶绿素的含量,以应对NaCl胁迫带来的生理紊乱。当处理浓度超过 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后,SOD含量继续上升,但是上升幅度显著下降,表明SOD已无法及时清除大量产生的超氧化物,外在表现则是叶绿素含量的显著下降。在相同浓度处理中,接种AMF的费菜各项指标均显著高于CK处理,说明接种AMF可降低费菜叶绿素在盐胁迫下被破坏的程度,提高费菜的耐盐能力。



注:初始荧光  $F_o$ : Changes of minimal fluorescence; 最大荧光  $F_m$ : Maximal fluorescence; 实际光化学效率  $\Phi PS II$ : Actual photochemical efficiency; 最大光化学效率  $F_v/F_m$ : Maximal photochemical efficiency; 光化学猝灭系数  $qP$ : Photochemical quenching; 非光化学猝灭系数  $NPQ$ : Non photochemical quenching

图 3 NaCl 胁迫下 AMF 对费菜  $F_o$ 、 $F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $F_v/F_m$ 、 $qP$ 、 $NPQ$  的影响

Fig.3 Effects of AMF on  $F_o$ ,  $F_m$ ,  $\Phi PS II$ ,  $F_v/F_m$ ,  $qP$  and  $NPQ$  of *Sedum aizoon* L. under NaCl stress

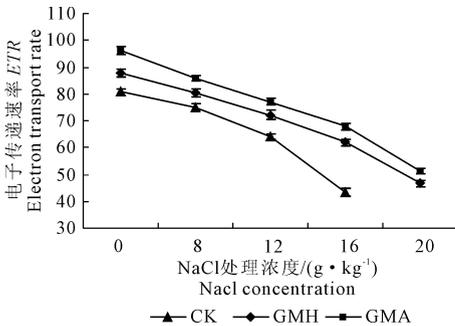


图 4 NaCl 胁迫下 AMF 对费菜 ETR 的影响

Fig.4 Effect of AMF on ETR of *Sedum aizoon* L. under NaCl stress

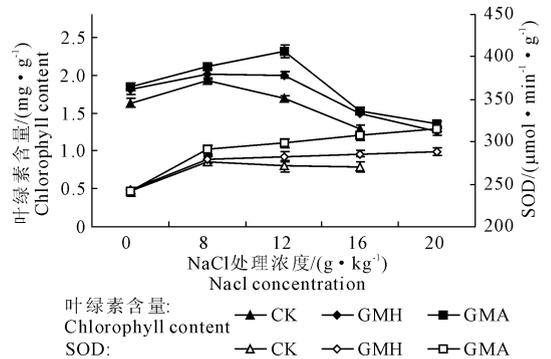


图 5 NaCl 胁迫下费菜叶绿素含量和 SOD 的变化

Fig.5 Change between chlorophyll, Minimal fluorescence and SOD of *Sedum aizoon* L. under NaCl stress

### 3 讨论

对盐碱地改造以及如何提高植物耐盐性一直是人们研究的重点。丛枝菌根真菌通过与植物形成共

生关系,可以增强植物的耐盐能力。许多研究表明接种 AMF 对植物的生长均有不同程度的促进作用,在植株干物重、株高、叶面积、叶绿素等方面均有一定体现,且不同菌种间差异很大<sup>[15]</sup>。本实验所使用

的丛枝菌根真菌属于球囊霉属下的两个种,而球囊霉属的菌种分布广泛,在所有的生态系统中均有分布<sup>[16]</sup>。实验结果表明,GMA比GMH对费菜有更高的侵染率,且接种AMF后,费菜根长、株高、根冠比与CK相比均有显著增加,这与曹岩坡<sup>[17]</sup>用AMF对盐胁迫下芦笋幼苗生长影响的结果相一致。在NaCl处理浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,接种GMH和GMA费菜的株高与同浓度CK处理相比分别提高了29.7%和35.2%。在 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的NaCl处理浓度下,接种GMH和GMA费菜的盐害指数与同浓度的CK处理相比降低了46.13%和56.14%。这表明AMF可以在一定程度上缓解盐胁迫对植物造成的伤害,提高植物的耐盐性,其中以GMA的效果最为明显。

叶绿素是光合作用光能捕获的物质基础,起到吸收、转移、转换光能的作用<sup>[18]</sup>。在本试验中接种了GMA和GMH的费菜在各个盐胁迫浓度下的叶绿素总含量均显著高于CK,且伴随NaCl处理浓度的升高,叶绿素含量先增加后减小,与荧光参数 $F_o$ 的变化相一致,同时伴随着SOD含量的升高,说明低浓度NaCl( $\leq 8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )处理,植物PSⅡ反应中心以可逆性失活耗散过剩光能和增加SOD含量来清除超氧化物达到保护光合机构免受破坏,同时促进了费菜叶绿素合成来缓解NaCl胁迫带来的生理紊乱。高浓度NaCl胁迫处理导致叶绿素遭到破坏,有可能是因为胁迫使植物叶绿素酶活性增强分解了叶绿素的缘故<sup>[19]</sup>。这表明AMF可以增加费菜叶绿素的含量来缓解盐胁迫对植株造成的损伤。

叶绿素荧光参数的测定可以更好地反映出光合作用“内在性”的变化特点。目前叶绿素荧光已经被较多地应用于探测逆境胁迫下对植物光合作用的影响与机理<sup>[20-21]</sup>。但是对于费菜的研究目前还较少。本研究发现,随着盐胁迫程度的增加,光化学淬灭( $qP$ )逐渐降低,实际光化学效率 $\Phi PSⅡ$ 的下降幅度大于最大光化学效率 $F_v/F_m$ 的下降幅度,初始荧光 $F_o$ 在 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的NaCl处理浓度之前呈现上升趋势,表明光抑制现象从NaCl处理浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时就已经产生,同时PSⅡ反应中心开始出现可逆失活,以及伴随非光化学淬灭( $NPQ$ )的升高,增加热耗散以减少PSⅡ反应中心过剩的光能积累,保护光合机构免受破坏。接种AMF的植株在NaCl处理浓度超过 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, $F_o$ 开始显著降低,同时非光化学淬灭( $NPQ$ )进一步上升,在处理浓度为 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大而后开始降低,表明随着盐胁迫的加重,叶片的PSⅡ反应中心开始受到破坏,热耗散能力受到抑制,光合机构遭到破坏,这与总叶绿素

含量的变化趋势相符合。而CK处理在处理浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 $F_o$ 便开始显著降低。电子传递速率( $ETR$ )随着盐浓度的升高逐渐降低,这也进一步表明植物叶片通过热耗散、光抑制以及PSⅡ反应中心的可逆失活来应对盐胁迫下对光合机构的破坏。本试验中,NaCl胁迫可导致叶绿素荧光参数(除初始荧光 $F_o$ )各项指标的降低,接种AMF的植株(特别是GMA)各项指标均显著高于CK处理。表明AMF能显著减轻盐害对费菜光合机构的破坏、反应中心的光合电子传递活性的抑制,从而提高费菜的光合能力以及对盐害的抗性。

综上所述,费菜在NaCl处理浓度超过 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,受到严重的盐胁迫,盐害指数达到67.51%,接种GMH、GMA可使该浓度下的盐害指数下降46.13%和56.14%,这表明AMF可以保护植物光合机构免受严重破坏并促进植株光合作用和植株的生长,以提高费菜对于盐胁迫的耐受性。因此,将AMF用于费菜生产与园林绿化中将大大提高其对土壤盐环境的适应性。

#### 参考文献:

- [1] 郭素华,黄建福,郑连梅,等.养心草及其制剂的研究[J].福建中医学院学报,2001,11(4):35-38.
- [2] Zverev N E, Tsukanova S K. Experience of halophyte cultivation on saline soils [R]. Ashgabat: Ministry of nature protection of turkmenistan national institute of deserts, flora and fauna, 2009.
- [3] 李永智,单凤翔.土壤盐渍化危害及治理途径浅析[J].西部探矿工程,2008(8):85-88.
- [4] 吴金平,顾玉成.丛枝菌根真菌(AMF)在土壤修复中的生态应用[J].中国农学通报,2009,25(7):243-245.
- [5] 李秋玲,凌婉婷,高彦征,等.丛枝菌根对有机污染土壤的修复作用及机理[J].应用生态学报,2006,17(11):2217-2221.
- [6] 张勇,曾明,熊丙全,等.丛枝菌根(AM)生物技术现代农业体系中的生态意义[J].应用生态学报,2003,14(4):613-617.
- [7] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British mycological Society, 1970,55(1):118-158.
- [8] 秦红艳,艾军,李昌禹,等.山葡萄组培苗盐害指数和耐盐指数主成分分析[J].北方园艺,2013,(16):18-21.
- [9] 张以顺,黄霞,陈云凤.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2009:181.
- [10] Cuddy W S, Summerell B A, Gehringer M M, et al. Nostoc, microcoleus and leptolyngbya inoculums are detrimental to the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress[J]. Plant and Soil, 2013,370(1-2):317-332.
- [11] 裴斌,张光灿,张淑勇,等.土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1386-1395.

- [20] Lilley R M, Walker D A. An improved spectrophotometric assay for ribulose biphosphate carboxylase[J]. *Biochimica Biophysica Acta*, 1974, 358:226-229.
- [21] 马跃,张蕾,李元源,等.‘寒富’苹果二倍体及其同源四倍体叶片超微结构和叶绿素荧光参数特征[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(3):0477-0483.
- [22] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutase in higher plants[J]. *Plant Physiol*, 1977, 59:309-314.
- [23] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22:867-880.
- [24] Schaedle M, Bassham J A. Chloroplast glutathione reductase[J]. *Plant Physiol*, 1977, 59:1011-1012.
- [25] Rao M V, Paliyath G, Omrod D P. Ultraviolet-B- and ozone induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110:125-136.
- [26] Arakawa N, Tsutsumi K, Sanceda N G, et al. A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline[J]. *Agric Biol Chem*, 1981, 45(5):1289-1290.
- [27] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. *Anal Biochem*, 1980, 106:207-212.
- [28] Jiang M Y, Zhang J H. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings[J]. *Plant Cell Physiol*, 2001, 11:1265-1273.
- [29] Blum A, Ebercon A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat[J]. *Crop Sci*, 1981, 21:43-47.
- [30] Romero-Puertas M C, Rodriguez-Serrano M, Corpas F J, et al. Cadmium-induced subcellular accumulation of  $O_2^-$  and  $H_2O_2$  in pea leaves[J]. *Plant Cell Environ*, 2004, 27:1122-1134.
- [31] Hogewoning S W, Jeong S W, Ieperen W V. Responses of supplemental blue light on flowering and stem extension growth of cut chrysanthemum[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 165:69-74.
- [32] 徐克章,唐树延.人参光生理研究 I. 光质对人参植株形态、叶绿素含量和叶片结构的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 1987, 9(3):1-5.
- [33] Casierra-Posada F, Matallana-Diaz Y A, Zapata-Casierra E. Growth of bell pepper plants (*Capsicum annuum*) affected by coloured covers[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2014, 66(4):149-155.
- [34] Fabian A, Giacomo S, Giovanni M, et al. Growth, photosynthetic efficiency, and biochemical composition of tetraselmis suecica F&M-M33 grown with LEDs of different colors[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, 111(5):956-964.
- [35] 王悦琳,宗晓娟,李德全.转玉米 ZmMPK7 基因烟草响应高盐胁迫的光合特性和抗氧化酶系统分析[J]. *核农学报*, 2010, 24(5):1086-1092.
- [36] 周艳虹,黄黎锋,喻景权.持续低温弱光对黄瓜叶片气体交换、叶绿素荧光猝灭和吸收光能分配的影响[J]. *植物生理与分子生物学报*, 2004, 30(2):153-160.
- [37] 徐凯,郭延平,张上隆.不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2):369-375.
- [38] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社,2008:63-64.
- [39] 王虹,姜玉萍,师恺,等.光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3):529-534.

(上接第 139 页)

- [12] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 16(4):444-448.
- [13] Xu D Q, Zhang Y Z, Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1992, 28(4):237-243.
- [14] Gilmore A M, Yamamoto H Y. Zeaxanthin formation and energy dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts under artificially mediated linear and cyclic electron transport[J]. *Plant Physiol*, 1991, 96(2):635-643.
- [15] 贺忠群,贺超兴,张志斌,等.不同丛枝菌根真菌对番茄生长及相关生理因素的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3):308-312.
- [16] 刘润进,焦惠,李岩,等.丛枝菌根真菌物种多样性研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9):2301-2307.
- [17] 曹岩坡,代鹏,戴素英,等.丛枝菌根真菌(AMF)对盐胁迫下芦笋幼苗生长及体内  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量和分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6):1699-1704.
- [18] 曹刚,张国斌,郁继华,等.不同光质 LED 光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6):1297-1304.
- [19] 刘会超,贾文庆.盐胁迫对白三叶幼苗叶片叶绿素含量和细胞膜透性的影响[J]. *广东农业科学*, 2008, (12):58-60.
- [20] Massacci A, Nabiev S M, Pietrosanti L, et al. Response of photosynthesis apparatus of cotton to the onset of drought stress under field conditions by gas change analysis and chlorophyll fluorescence imaging[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, 46(2):189-195.
- [21] Efeoglu B, Ekmekci Y, Cicek N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. *South African Journal of Botany*, 2009, 75(1):34-42.