

丛枝菌根化枫香幼苗对盐胁迫的生长生理响应^{*}

叶振标¹ 钟雨庭² 钟耀金¹ 邹国岳²

(1. 紫金县绿林营林服务有限公司, 广东 紫金 517400; 2. 紫金县林业科学研究所, 广东 紫金 517400)

摘要 通过菌根接种技术, 以枫香 *Liquidambar formosana* 为试验材料, 探究盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗生长生理指标的变化规律, 以期揭示菌根对枫香幼苗耐盐性的影响, 为沿海涂滩地区枫香高效造林技术集成和推广种植提供试验依据。结果表明, 在盐胁迫条件下, 与未接种丛枝菌根 (AM) 幼苗相比, 丛枝菌根化幼苗的存活率、苗高、地径与生物量均呈显著增加趋势, 且苗木地上部分叶片生物量分配比例加大, 植株根茎比减小。同时, 接种 AM 提升了苗木叶片净光合速率 (Pn) 与水分利用效率 (WUE), 提高了植株中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度, 降低了 Na^{+} 浓度。这表明接种丛枝菌根能有效改善盐胁迫下枫香幼苗的生长状况, 提升植株光合能力和水分养分吸收利用效率, 调整苗木体内离子平衡状态, 使其抵御盐胁迫的能力得到增强。

关键词 盐胁迫; 丛枝菌根; 枫香; 生长; 生理

中图分类号: S792 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 02-0067-07

Responses of Growth and Physiology in *Liquidambar formosana* Seedlings Colonized by Arbuscular Mycorrhizal to Salt Stress

YE Zhenbiao¹ ZHONG Yuting² ZHONG Yaojin¹ ZOU Guoyue²

(1. Zijin Greenwood Forest Service Co. Ltd., Zijin, Guangdong 517400, China; 2. Zijin Forestry Research Institute, Zijin, Guangdong 517400 China)

Abstract This paper aimed to reveal the effect of mycorrhiza on salt tolerance of *Liquidambar formosana* seedlings, and provide references for planting *L. formosana* in saline regions. The changes in growth and physiology were investigated in *L. formosana* seedlings colonized by arbuscular mycorrhizal (AM) under salt stress using AM inoculation. Results showed that survival rate, height, caliper and biomass of seedlings colonized by AM were all significantly increased. The leaf biomass accounting for the percentage of the total plant biomass enhanced, and the ratio of root to stem biomass reduced in comparison to that of seedlings without AM inoculation under salt stress. In addition, AM inoculation resulted in increases in Pn, WUE, and the concentration of Mg^{2+} and Ca^{2+} , while a decrease in Na^{+} concentration. This indicated that AM inoculation would be able to effectively improve seedling growth, strengthen photosynthetic capacity and the utilization efficiency of water and nutrients, and optimize the balanced state of ions in *L. formosana* seedlings. which contribute to the ability to tolerate salt stress in *L. formosana* seedlings.

Key words salt stress; arbuscular mycorrhiza; *Liquidambar formosana*; growth; physiology

^{*} 第一作者: 叶振标 (1976—), 男, 工程师, 主要从事森林培育、景观绿化等研究, E-mail: zhenbiaoye76@163.com。

通信作者: 钟雨庭 (1975—), 男, 高级工程师, 主要从事林业技术推广、林木良种种苗培育等研究, E-mail: zjlypx@sina.com。

枫香 *Liquidambar formosana* 为金缕梅科枫香属树种,生态适应性强,地理分布范围广,是一种优良的抗逆树种^[1],其生长速度快,树干挺直,作为我国常用的乡土优良彩叶造林树种,在沿海地区防护林建设和城镇绿化中发挥了重要作用。盐分是影响植物正常生长发育的重要环境因子之一^[2],而枫香幼苗对盐胁迫较为敏感^[3],这在一定程度上制约了该树种在我国沿海滩涂的大面积推广栽培。大力开展耐盐枫香品种培育与利用,是进一步提高沿海防护林体系生态效益的重要途径。但由于林木耐盐性受基因多效性影响和控制,加之育种周期长^[4],因此当前林木耐盐分子育种仍然进展缓慢,面临许多技术瓶颈。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)是土壤中的菌根真菌与高等植物的根系形成的一种联合体,广泛存在于自然界中。研究表明,菌根能够促进植物生长,增强植物的抗逆性^[5-6]。AM接种技术为菌根化育苗造林,有效提升植物抗逆性开辟了一条重要途径。目前国内关于利用菌根技术提高枫香幼苗耐盐性方面的研究仍鲜见报道。鉴于此,本试验利用菌根接种技术,以枫香为研究对象,解析盐胁迫下菌根化枫香幼苗生长生理指标的变化,旨在探索菌根对枫香幼苗耐盐能力的影响,以期为沿海地区枫香高效造林技术集成和推广种植提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试种子为市售广东种源枫香种子。使用的AM真菌菌剂为摩西球囊霉GM(BGC NM01A,约300孢子/20g)和地表球囊霉GV(BGC GD01C,约1000个孢子/20g)的混合物,两种真菌均由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所提供。供试育苗基质为黄壤土+10%河沙+0.5%过磷酸钙混合改良而成,其中速效氮、速效磷、速效钾和有机质含量分别为0.064‰、0.038‰、0.074‰和5.53‰,pH值为6.8。

1.2 试验方法

1.2.1 菌剂接种 参照郑启钢^[7]的方法培育种子苗,盆土移栽15天后,筛选生长状况一致的苗木进行AM菌剂接种处理。设置未接种处理和接种处理,每处理200盆。盆中装满育苗基质,将菌剂均匀撒施于盆中基质表面下方10cm处(每盆

25g菌剂)。未接种组则不加任何菌剂。将苗木种植于基质中,保持苗木根部与菌剂接触即可。每盆装基质3kg。盆为底部有排水孔的塑料盆,高22cm,盆口直径35cm,置于浅壁托盘上。试验温室条件为昼夜温度 $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$ / $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度70%~80%,自然采光;试验开始后每周喷洒Hoagland营养液300mL/盆。

1.2.2 胁迫处理 依据前人^[8-9]研究结果,枫香耐盐性不强,本文作者通过预实验进一步证明,7g/L的NaCl浓度会对本试验研究中供试枫香幼苗造成显著影响,大于7g/L的NaCl浓度甚至会造成幼苗死亡。本试验选择临界NaCl浓度7g/L进行处理。接种菌剂2个月后,采用酸性品红染色,取一段侧根通过感染长度确定菌根感染情况^[10]。使用以Hoagland营养液为溶剂配制的质量浓度7g/L的海盐溶液,对幼苗进行盐胁迫处理(150mL/盆),每隔3d喷淋1次,直至试验结束。未接种苗木和接种菌剂苗木均分别设置NaCl溶液(盐胁迫)和Hoagland营养液(对照)两组处理,即本试验共4个处理:CK(未接种菌剂+Hoagland营养液)、SA(接种菌剂+NaCl溶液)、S(未接种菌剂+NaCl溶液)、A(接种菌剂+Hoagland营养液),每处理80盆。

1.2.3 指标测定 当幼苗胁迫处理后,进行生长与生理指标的测定。

幼苗存活率:在胁迫开始后的第1、5、10、20、25、30天,分别统计各处理存活苗木数量。

生长测定:胁迫处理30天后测定苗高和地径。

生物量测定:在胁迫处理30天后,将不同处理的植株冲洗干净,然后分根茎叶置于牛皮纸袋中,放入105℃的烘箱中杀青20min后,维持在85℃烘干至恒重,称量其干质量。

叶绿素含量测定:胁迫开始后的第1、5、10、20、30天,采用美国LICORW公司生产的CCM220便携式叶绿素速测仪测定。

光合作用参数测定:胁迫处理30天后,采用英国PP-Systems公司生产的CIRAS-I型光合作用仪测定。

K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 测定:胁迫30天时,用自来水冲洗苗木根部,使植株保持完整,然后用吸水纸吸干,在80℃的烘箱内烘干至衡重。称取烘干样0.25g,放入100mL凯氏瓶中,用水润样,加8mL浓硫酸,放置过夜,加10滴双氧水,

进行消煮，待消煮液变为无色透明时转入 100 mL 容量瓶中。吸取消煮液，于等离子体发射光谱仪上测定。

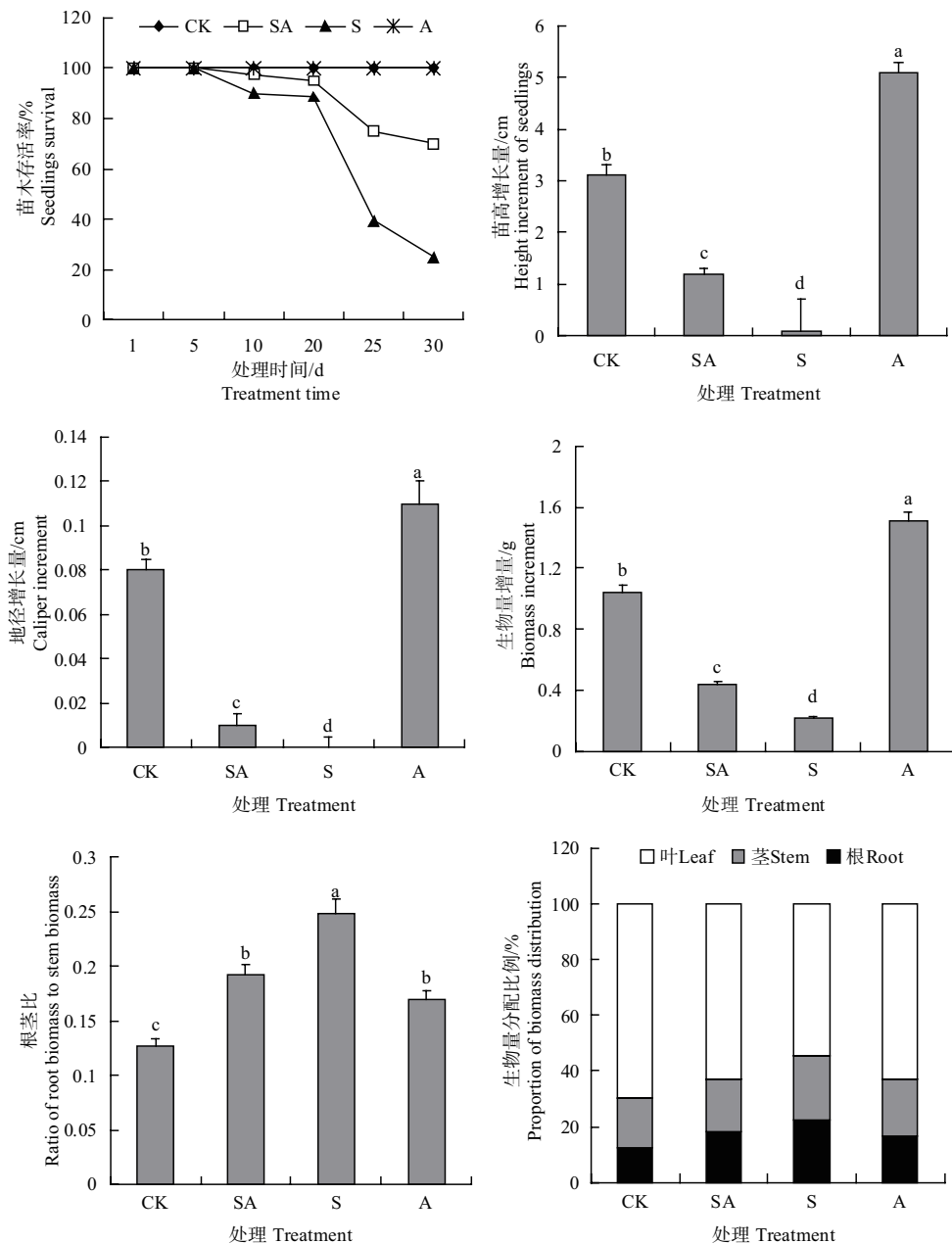
1.3 数据处理

应用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS19.0 统计分析软件对数据进行统计、方差分析，以及处理间的差异性检验，运用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗的生长变化

由图 1 可知，整个试验期间，无论接种菌剂与否，正常生长条件下（CK、A 处理），供试幼苗存活率均为 100%，而在盐胁迫下，随着胁迫时间增加，供试幼苗存活率均呈下降趋势。其中，在盐胁迫 30 天时，未接种菌剂处理（S）幼苗存活率降至 25%，而接种菌剂处理（SA）则为 70%。



注：小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平不同处理间显著性差异。

Note: the lowercase letters indicate significant differences among different salt treatments at $\alpha=0.05$.

图 1 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗的生长变化

Fig.1 Variations for growth of *Liquidambar formosana* seedlings colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress

这说明,盐胁迫下供试幼苗出现不同程度的死亡,但相对而言,菌根化幼苗存活率较高,适应性好,可初步确定在供试盐浓度处理下,菌根化幼苗耐盐能力增强。

盐胁迫 30 天时,各处理间幼苗苗高、地径、生物量增长量的差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。整体上,均呈 $A > CK > SA > S$ 趋势。这说明,接种 AM 能显著提升枫香幼苗的生长量及其耐盐性。从生物量分配来看,供试幼苗各器官生物量占植株总生物量比例的大小顺序为:叶片 > 根、茎。与未胁迫处理 (CK、A) 相比,盐胁迫处理 (SA、S) 叶片生物量占幼苗植株总生物量百分比下降,根系生物量所占百分比上升,且菌根化幼苗叶片生物量 (SA) 高于未接种处理 (S)。从反映地上、地下部分生物量比值的根茎比大小来看,盐胁迫下幼苗根茎比最大 (S),但菌根化后根茎比降低 (SA) 并与未胁迫处理 (A) 无明显差异。这表明,盐胁迫显著抑制了供试幼苗地上部分的生长,但通过菌根化可以改善地上部分的生长情况,增加生物量积累。

2.2 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗光合能力变化

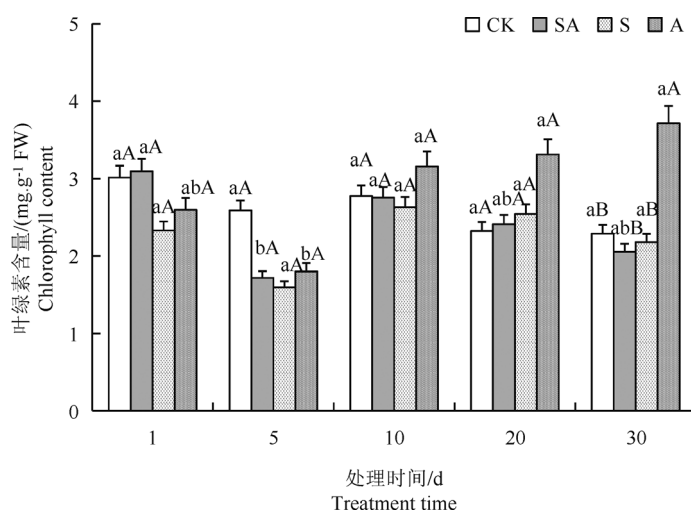
2.2.1 盐胁迫下叶绿素含量的变化 从图 2 可知,正常生长情况下 (CK),叶绿素含量在整个试验期无明显变化,但菌根化苗生长 30 天后叶绿素含量有所增加 (A)。盐胁迫下,未接种 AM 处理 (S) 的叶绿素含量无明显变化趋势,而接种 AM 处理

(AS) 的叶绿素含量在盐胁迫 5 天时明显降低,之后又呈上升趋势。除胁迫 30 天时,在 1~20 天胁迫期间,供试 4 个处理间叶绿素含量均无显著差异。由此说明,接种 AM 能提升枫香幼苗叶绿素的合成与盐胁迫下的自我修复能力。

2.2.2 盐胁迫下光合参数的变化 由表 1 可以看出,供试 4 个处理间幼苗叶片的净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr)、水分利用效率 (WUE)、气孔导度 (Gs) 及叶肉细胞胞间二氧化碳浓度 (Ci) 等指标差异显著 ($P < 0.05$),各指标大小排序分别为, Pn: $A > CK > SA > S$, Tr: $CK > SA > S > A$, WUE: $A > CK > SA > S$, Gs: $CK > SA > S > A$, Ci: $CK > SA > S > A$ 。这说明,与对照 CK 相比,接种 AM 后幼苗 Gs、Ci、Tr 降低,而 Pn 与 WUE 显著增加 (A); 盐胁迫下,枫香幼苗 Pn、Tr、WUE 与 Gs 降低 (S),但接种 AM 后 (SA) Pn、WUE 较 S 处理增加了 138%~209%。

2.3 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗离子浓度变化

图 3 反映了盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度的变化。根据差异分析结果,供试 4 个处理间枫香幼苗植株中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度均达差异显著水平。整体上看,盐胁迫降低了植株中 K^+ 、 Mg^{2+} 浓度,增加了 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度。接种 AM 后,盐胁迫下植株中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度增加, Na^+ 浓度降低, K^+ 无明显变化。



注:小写、大写字母分别表示在 $\alpha=0.05$ 水平同一处理不同处理时间间显著性差异和同一处理时间不同处理间显著性差异。
Note: the lowercase and uppercase letters respectively indicate significant differences among different treatment time within a salt treatment, and significant differences among different salt treatments within the same treatment time at $\alpha=0.05$.

图 2 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗叶绿素含量的变化

Fig.2 Variations for chlorophyll content in leaves of *Liquidambar formosana* seedlings colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress

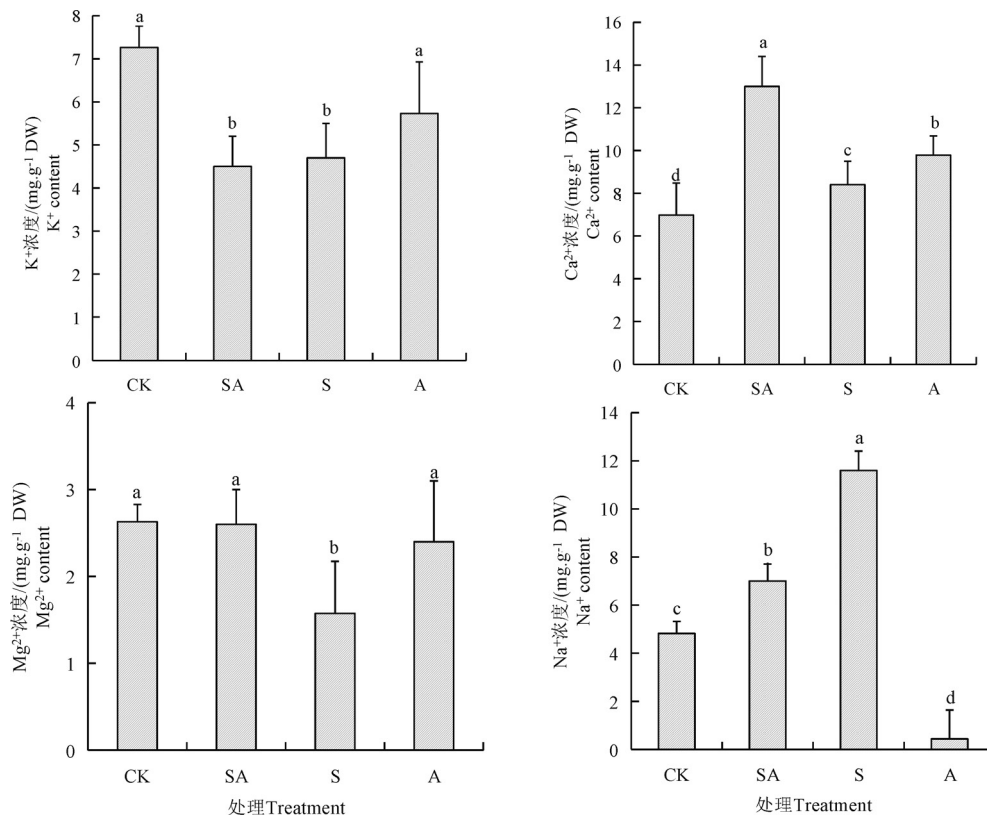
表 1 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗光合能力的变化

Tab.1 Variations for photosynthetic capacity of *Liquidambar formosana* seedlings colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress

处理 Treatment	光合参数 Photosynthetic parameters				
	Pn/ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Tr/ ($\mu\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	WUE/ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)	Gs/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Ci/ ($\mu\text{L} \cdot \text{l}^{-1}$)
CK	2.60 ± 0.23b	3.31 ± 0.24a	0.80 ± 0.13b	72.33 ± 6.56a	310.12 ± 4.61a
SA	1.33 ± 0.03c	1.01 ± 0.49b	0.88 ± 0.06b	31.33 ± 9.06b	291.24 ± 4.93a
S	0.43 ± 0.24d	1.48 ± 0.26b	0.37 ± 0.25c	32.33 ± 4.66b	315.33 ± 9.27a
A	4.13 ± 0.38a	0.74 ± 0.04c	5.64 ± 0.81a	27.02 ± 1.52b	247.66 ± 55.71b

注：同列不同小写字母表示每一个光合参数在 $\alpha=0.05$ 水平处理间差异显著。

Note: the lowercase letters in the same column indicate significant differences among four treatments for each photosynthetic parameter.



注：小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平不同处理间显著性差异。

Note: the lowercase letters indicate significant differences among different salt treatments at $\alpha=0.05$.

图 3 盐胁迫下丛枝菌根化枫香幼苗的离子浓度变化

Fig.3 Variations for ion concentration in *Liquidambar formosana* seedlings colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress

3 结论与讨论

逆境中植株生长状况能直观反映其抗性的强弱^[11]。本试验研究结果发现，枫香幼苗在 7 g/L NaCl 溶液喷淋处理下，幼苗苗高和地径生长受到抑制，地上部分生物量明显降低，说明枫香具有

较强的盐敏感性。徐呈祥等^[12]、裘丽珍等^[13]和尉秋实等^[14]研究发现，在胁迫条件下，植物地上部分与地下部分生长比例发生改变，植物生物量分配的改变有助于树木适应环境的变化，因此植物地下部分与地上部分生物量比率的大小反应植物对环境因子需求和竞争能力的强弱，比值越大，

表明植物对养分的需求或竞争能力越强。本试验中枫香幼苗叶片对盐胁迫的应激性最为明显,表现为叶片生物量减少,而幼苗根茎比最大,反映了在盐胁迫下植株对养分需求的明显增加;而接种AM后,其根茎比降低,与未胁迫处理相比无明显差异,且均高于未接种AM和未胁迫的对照处理,这可能暗示了接种AM能提升枫香幼苗的环境竞争力,抗逆性得到增强。

植物光合能力与生长密切相关。叶绿体是植物进行光合作用的重要场所,是对逆境胁迫较为敏感的细胞器之一^[15]。通常,植物在遭到逆境胁迫时,叶肉细胞中叶绿体结构的完整性受到破坏,叶绿体发生降解,进而导致叶绿素含量的降低。在本试验期间,盐胁迫并未导致枫香幼苗叶片的叶绿素含量显著下降,但接种AM会增强叶绿素的合成与积累。光合作用是植物最主要的生理活动,它能直接影响植物的生长与发育^[16-19]。逆境胁迫会破坏叶绿体合成,引起气孔导度降低,进而导致净光合速率、蒸腾速率与水分利用效率下降,光合效率差。其中,净光合速率直接体现植物通过光合作用产生同化物的能力,而水分利用效率是指植物消耗单位水量所产生的同化量,反映植物生产过程中的能量转化效率,也是评价逆境胁迫下植物抗逆性的综合指标之一^[20-21]。本试验结果表明,盐胁迫降低了枫香幼苗叶片的净光合速率和水分利用效率,但接种AM后二者均显著提高,从而说明接种AM能有效增加枫香幼苗叶片的光合能力和水分利用效率,进而提升其耐盐性。

盐胁迫对植物的影响主要包括两方面,一是单盐毒害,即过量有毒的 Na^+ 导致细胞膜透性增大,电解质外渗,细胞代谢失调;二是相对较高浓度的 Na^+ 干扰了植物对营养元素的吸收,造成植物体内营养元素亏缺,影响正常生长发育^[22-24]。本试验通过对植株中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度定量分析发现,盐胁迫显著增加了枫香幼苗植株中 Na^+ 浓度,进而造成 K^+ 、 Mg^{2+} 浓度减少,而通过接种AM则降低了 Na^+ 浓度、增加了 Mg^{2+} 浓度。 K^+ 与 Na^+ 的离子半径和水合能相似,盐胁迫会使植株体内积累过多的 Na^+ 而导致吸收 K^+ 困难,对生长造成不利影响^[25]。 Mg 是叶绿体重要组成部分,与植物光合能力密切相关^[26],植株体内积累 Mg^{2+} 有助于维持较低的细胞渗透势,促进

根系吸水^[27]。由此说明,通过接种AM,使枫香幼苗对 Na^+ 吸收量降低从而保障了对 K^+ 的正常吸收,不但降低了 Na^+ 对植株的伤害,还避免了营养元素缺乏对苗木生长造成不利影响;同时,植株中 Mg^{2+} 浓度增大促进了枫香幼苗光合能力增强和地上部分生物量增加,提高了苗木对水分的吸收效率,这也在很大程度上增强了植株对盐胁迫的抵御能力。此外,值得关注的是,在接种AM或盐胁迫处理下, Ca^{2+} 浓度均高于对照CK处理,且接种AM能显著提升盐胁迫下植株中 Ca^{2+} 浓度。 Ca^{2+} 积累在保持细胞膜的完整性和稳定性方面发挥重要作用^[27],维持稳定的 Ca^{2+} 水平有助于植物根系在高盐环境下进行渗透调节、缓解 Na^+ 毒害和维持正常生理功能的作用^[25]。同时, Ca^{2+} 是植物多种生理代谢过程中的第二信使,是植物生长发育的中心调控因子^[28],因此推测接种AM可能提高了 Ca^{2+} 的活跃性,高浓度 Ca^{2+} 可作为判断枫香幼苗受到盐害的早期指标之一。

参考文献

- [1] 潘雪玉,孙海菁,袁志林. 3株滨麦内生镰刀菌毒素积累及对北美枫香幼苗生长和耐盐性的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(5): 64-73.
- [2] 刘德浩,廖文莉,邓仿东,等. 盐胁迫对苦郎树种子萌发特性的影响[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 68-72.
- [3] MIYAMOTO S, MARTINEZ I, PADILLA M, et al. Landscape plant lists for salt tolerance assessment[R]. El Paso: Texas A & M University Agricultural Research and Extension Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2004.
- [4] COLEMAN-DERR D, TRINGE S G. Building the crops of tomorrow: advantages of symbiont-based approaches to improving abiotic stress tolerance[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 6: 283.
- [5] 李元敬,刘智蕾,何兴元,等. 丛枝菌根共生体中碳、氮代谢及其相互关系[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 903-910.
- [6] 罗倩,何颖,宋卓达,等. 接种ERM的杜鹃在高温胁迫下生理指标变化[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(1): 41-46.
- [7] 郑启钢. 枫香苗木培育及造林技术[J]. 中国林副特产, 2019 (4): 44-45.
- [8] 陈顺伟,高智慧,岳春雷,等. 盐雾胁迫下杜英等树种生理特性的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(5): 11-14.
- [9] 何庆海,杨少宗,李因刚,等. 不同枫香种群种子萌发特

- 性分析[J]. 种子, 2018, 37(5): 21-27.
- [10] 高俊风. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 宋秀华, 王秀峰, 魏氓, 等. 沸石添加对NaCl胁迫下黄瓜幼苗生长及离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 259-263.
- [12] 徐呈祥, 马艳萍, 胡恒康, 等. 硅对盐胁迫下金丝小枣生长与生理的效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 142-146.
- [13] 裘丽珍, 黄有军, 黄坚钦, 等. 不同耐盐性植物在盐胁迫下的生长与生理特性比较研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(4): 420-427.
- [14] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 等. 不同土壤水分胁迫下沙漠藏的生长及生物量的分配特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 7-12.
- [15] 夏阳, 孙明高, 李国雷, 等. 盐胁迫对四园林绿化树种叶片中叶绿素含量动态变化的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(1): 30-34.
- [16] FUNGL E, WANG S E, ALTMAN A. Effect of NaCl on growth, photosynthesis, ion and water relations of four poplar genotypes[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 107: 135-146.
- [17] 王丽燕, 赵可夫. NaCl胁迫对海蓬子离子区室化、光合作用和生长的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(1): 94-98.
- [18] 张淑红, 张恩平, 庞金安, 等. NaCl胁迫对黄瓜幼苗光合特性及水分利用率的影响[J]. 中国蔬菜, 2005(1): 11-13.
- [19] 王丽燕. NaCl胁迫对植物光合作用的影响[J]. 德州学院学报, 2005, 21(4): 12-15.
- [20] 张淑红, 张恩平, 司龙亨, 等. 盐胁迫对黄瓜幼苗渗透调节物质含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2005(12): 30-31.
- [21] 赵凤君, 高荣孚, 沈应柏, 等. 水分胁迫下美洲黑杨不同无性系间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 36-41.
- [22] 徐锡增, 徐呈祥. 硅对盐胁迫下枣树根尖离子微域分布的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(2): 55-55.
- [23] BLUMWALD E, AHARON G S, APSE M P. Na^+ transport in plant cells[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2000, 1465: 140-151.
- [24] CHEN S L, LI J K, WANG S S. Sodium and chloride distribution in roots and transport in three poplar genotypes under increasing NaCl stress[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168: 217-230.
- [25] 陆嘉惠, 吕新, 梁永超, 等. 新疆胀果甘草幼苗耐盐性及对NaCl胁迫的离子响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 839-850.
- [26] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [27] KOPITTKE P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352: 353-362.
- [28] HEPLER P K. Calcium: a central regulator of plant growth and development[J]. Plant Cell, 2005, 17: 2142-2155.