

熊雪,史慎奎,朱国芬,等.不同丛枝菌根真菌对紫花苜蓿耐盐性的影响[J].江苏农业科学,2025,53(6):225-230.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.06.029

不同丛枝菌根真菌对紫花苜蓿耐盐性的影响

熊雪^{1,2},史慎奎^{1,2},朱国芬^{1,2},董建新^{1,2},王雨¹,赵雅婷¹

(1.河北民族师范学院,河北承德 067000; 2.植物学国家民委重点实验室,河北承德 067000)

摘要:为了探究不同丛枝菌根真菌(AMF)对盐胁迫下紫花苜蓿的影响,筛选出提高紫花苜蓿耐盐性较好的 AMF 菌株。采用室内控制试验,以 7 种不同的 AMF 菌剂进行紫花苜蓿侵染接种,分别施加 0、200 mmol/L NaCl 处理,测定盐胁迫下不同 AMF 对紫花苜蓿生长情况、叶绿素含量、MDA 含量及 Na⁺、K⁺ 含量等指标的影响,探究不同 AMF 种类对紫花苜蓿盐害的缓解作用。结果表明,与 0 mmol/L NaCl 处理相比,紫花苜蓿在盐胁迫下生长速率和生物量显著降低,生理活动受到抑制。与未接种 AMF 的处理相比,接种 AMF 能够减少盐胁迫对紫花苜蓿造成的伤害,表现为生物量增加、叶绿素含量升高,MDA 含量降低,维持较高的 K⁺ 含量和较低的 Na⁺ 含量,且不同 AMF 菌株的作用效果存在较大差异。为了更好地评价不同 AMF 菌株的作用效果,利用隶属函数法对 7 种 AMF 菌株进行评价,得出各指标的隶属函数平均值在 0.207~0.884 之间,不同 AMF 菌株提高紫花苜蓿耐盐性由强到弱依次为 NM03F>XJ01>HK01>BJ09>HEB07D>XJ03C>BJ04A。由上述研究结果可以得出,幼套近明球囊霉中的 NM03F 和摩西斗管囊霉中的 XJ01、HK01 提高紫花苜蓿耐盐性的效果较好。

关键词:AMF;紫花苜蓿;盐胁迫;生长速率;生物量;综合评价

中图分类号:S541⁺.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)06-0225-06

土壤盐碱化问题对植物的生长和产量会产生严重影响^[1]。提高植物耐盐性,探索盐碱地的开发

和利用势在必行。土壤中的微生物与植物之间存在密切关系,利用与植物共生的土壤微生物为植物抵抗盐胁迫提供了新的途径。其中,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能够与多数高等植物的营养根系形成共生联合体,为寄主植物提供营养并从寄主处获得生长所需的碳源^[2]。近年来,利用 AMF 提高植物对盐胁迫的耐性以维持植株正

收稿日期:2024-03-13

基金项目:承德市应用技术与开发暨可持续发展议程创新示范区专项科技计划(编号:202205B079)。

作者简介:熊雪(1986—),女,河北承德人,博士,副教授,主要从事草地生态管理、植物抗逆生理等方面的研究。E-mail: xiongxe1987@126.com。

Chemistry, 2020, 323:126822.

[20]郑海英,张冬青,赵晓丹.代谢组学法研究转录因子 SINAC4 对番茄果实代谢产物的影响[J].食品科学,2019,40(10):36-42.

[21]Guan D, Zhao Y, Zhao X D, et al. Metabolomics study of the effect of transcription factor NOR-like1 on flavonoids in tomato at different stages of maturity using UPLC-MS/MS[J]. Foods, 2023, 12(24):4445.

[22]Jia C P, Guo B, Wang B K, et al. Integrated metabolomic and transcriptomic analysis reveals the role of phenylpropanoid biosynthesis pathway in tomato roots during salt stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1023696.

[23]Yang T X, Ali M, Lin L H, et al. Recoloring tomato fruit by CRISPR/Cas9-mediated multiplex gene editing[J]. Horticulture Research, 2023, 10(1):uhac214.

[24]王同林,叶红霞,郑积荣,等.番茄果实中主要风味物质研究进展[J].浙江农业学报,2020,32(8):1513-1522.

[25]郭精桐,赵圆,孙玉敬.番茄果实风味及其影响因素的研究进

展[J].食品科学,2023,44(17):169-177.

[26]姚国新,陈刚,卢勇,等.3,4-二甲氧基苯乙酸的合成新工艺[J].中国医药工业杂志,2010,41(10):730-731.

[27]周俊萍,徐玉娟,温靖,等.γ-氨基丁酸(GABA)的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(5):393-401.

[28]霍冬敖,田瑞丰,任永权,等.基于 UPLC-MS/MS 技术的野生及栽培韭菜籽的代谢组学研究[J].广西植物,2022,42(12):1995-2006.

[29]Pinela J, Montoya C, Carvalho A M, et al. Phenolic composition and antioxidant properties of ex-situ conserved tomato (*Solanum lycopersicum* L.) germplasm[J]. Food Research International, 2019, 125:108545.

[30]宿子文,蔡志翔,孙朦,等.植物中绿原酸生物合成研究进展[J].江苏农业学报,2023,39(6):1414-1426.

[31]Klepacka J, Gujska E, Michalak J. Phenolic compounds as cultivar- and variety-distinguishing factors in some plant products[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2011, 66(1):64-69.

常生长发育的研究越来越受到关注。例如,在盐胁迫下接种 AMF 的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)与未接种的相比,表现出更好的生长和生理活性,缓解了盐胁迫对植物生物量和营养元素吸收的抑制作用^[3]。接种 AMF 的番茄(*Solanum lycopersicum*)可以延缓盐分对番茄生理活性的抑制,提升植株的耐盐性^[4]。盐胁迫下接种 AMF 的棉花(*Gossypium hirsutum*)与未接种的处理相比,其株高、地上部分及根的干重分别提高了 26.3%、74.2% 和 11.4%^[5]。

AMF 具有丰富的物种多样性、遗传多样性和功能多样性。虽然 AMF 可以对寄主植物产生有益效应,但其作用效果受到植物基因型和 AMF 类型的共同影响^[6]。对于同一个寄主植物,不同的 AMF 菌株其耐盐性结果会存在一定差异^[7-8]。当前,逆境条件下不同 AMF 类型对植物影响的综合评价研究相对较少。

紫花苜蓿为豆科苜蓿属多年生宿根草本植物,素有“牧草之王”的美称,在全球范围内种植广泛,抗旱耐寒且具有一定的耐盐碱性^[9]。在盐碱地等边际土地发展苜蓿种植可以缓解优质土地不足,作为后备资源补充耕地面积^[10]。且随着全球范围内土壤盐碱化问题的不断加深,现有的多数紫花苜蓿生长和种植的地区也受到盐渍化的影响。提高紫花苜蓿的耐盐性,对探索盐碱地的开发具有重要意义。

综上所述,本研究在盐胁迫下对紫花苜蓿接种 7 种不同的 AMF 菌株,通过测定紫花苜蓿的生长情况、叶绿素含量、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量以及 Na⁺、K⁺ 含量等指标,并采用隶属函数法进行综合评价,以筛选出提高紫花苜蓿耐盐性效果较好的 AMF 优势菌株。

1 材料与方法

1.1 试验材料及幼苗培养

供试紫花苜蓿品种为 WL343HQ,所用 AMF 菌种类型详见表 1,购自北京农林科学院植物营养与资源研究所。选取均匀一致的紫花苜蓿种子经消毒处理后育苗,出苗后挑选生长整齐一致的幼苗置于低浓度营养液中培养 8 d。

1.2 试验处理

1.2.1 接种 AMF 选取长势一致的紫花苜蓿幼苗进行移栽和接种 AMF 处理。移栽前基质过 2 mm 筛,高压高温下灭菌 1 h,以 48 h 为间隔共灭菌 2 次。

表 1 不同 AMF 菌种类型

序号	菌种名称		BCC 编号
	中文名称	拉丁名	
1	根内根孢囊霉	<i>Rhizophagus intraradices</i>	BJ09
2	根内根孢囊霉	<i>Rhizophagus intraradices</i>	HEB07D
3	幼套近明球囊霉	<i>Claroideoglomus etunicatum</i>	XJ03C
4	幼套近明球囊霉	<i>Claroideoglomus etunicatum</i>	NM03F
5	摩西斗管囊霉	<i>Funneliformis mosseae</i>	XJ01
6	摩西斗管囊霉	<i>Funneliformis mosseae</i>	BJ04A
7	摩西斗管囊霉	<i>Funneliformis mosseae</i>	HK01

每盆中装入灭菌基质(土壤、沙子体积比为 1 : 1) 1.2 kg。接种 AMF 的处理,将 AMF 菌剂直接添加于紫花苜蓿根系附近,每个盆中根据不同菌株的孢子密度分别接种 30 ~ 50 g AMF 菌剂。未接种 AMF 的处理加入同等重量的灭菌菌剂,同时每盆中加入等量的 AMF 菌剂滤液以还原微生物群落。

1.2.2 盐胁迫处理 移栽接菌后的紫花苜蓿保证正常的水分供应,每周每盆中分别浇入 100 mL 减磷营养液。在光照培养室中继续培养 15 d 后,分别施加 0、200 mmol/L NaCl 进行处理。为避免盐分振荡,盐浓度逐渐增加直至 4 d 后达到最终处理浓度。

试验共分为 7 个菌种,进行 2 个接种处理、2 个盐胁迫处理,每个处理 3 盆重复,每盆移栽 6 株紫花苜蓿幼苗,共 84 盆。试验期间所有植物均置于光照度为 8 000 lx 的光照培养室中,设置光照/黑暗为 14 h/10 h,温度为 20 ~ 25 ℃。盐胁迫处理 15 d 后分别对植物的地上部分和根系进行取样,测定相关指标。

1.3 指标测定

1.3.1 菌根侵染率测定 将新鲜的根切成 1 cm 左右根段,处理染色后在显微镜下观察记录菌根侵染情况并计算菌根侵染率。

1.3.2 生长指标的测定 采用常规烘干法测定植株地上部干重;以胁迫前后紫花苜蓿主茎的高度差计算植物生长速率。

1.3.3 叶绿素含量的测定 采用丙酮和乙醇提取法测定并计算叶绿素含量。

1.3.4 丙二醛含量的测定 参考硫代巴比妥酸法^[11]进行丙二醛含量的测定。

1.3.5 叶片 Na⁺、K⁺ 含量的测定 分别称取各处理下紫花苜蓿叶片干样品 0.2 g,经酸化和消解后用电感耦合等离子体发射光谱仪测定植物组织中的离子浓度。

1.4 数据分析

采用 SPSS 27.0 对获得的数据进行单因素方差分析。利用隶属函数法对不同 AMF 菌株耐盐性的效应进行排序。隶属函数分析方法如下:

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}); \quad (1)$$

$$Y_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})。 \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 表示*i*品种*j*指标的隶属函数值; X_{ij} 表示*i*品种*j*指标的均值; X_{jmax} 和 X_{jmin} 分别表示各品种*j*指标均值的最大和最小值。若*j*指标与抗盐性呈正相关,用公式(1);若*j*指标与抗盐性呈负相关,用公式(2)。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

不同处理下 AMF 菌根的侵染情况如表 2 所示,未接种 AMF 的紫花苜蓿植株根系中菌根侵染率为 0。无盐胁迫下接种不同 AMF 类型的菌根侵染率为 17.25%~46.63%,其中 HEB07D 的侵染率显著高于其他 AMF 类型,其次为 BJ09 和 XJ01,均显著高于其余 4 个菌株类型。200 mmol/L NaCl 处理下接

种不同 AMF 类型的菌根侵染率间差异较小,分别为 18.39%~26.25%,与 0 mmol/L NaCl 处理相比,BJ09、HEB07D 和 XJ01 的菌根侵染率显著降低($P<0.05$)。

2.2 植物生长状况

如表 3 所示,0 mmol/L NaCl 处理下 7 种不同的 AMF 对接种后的紫花苜蓿生长状况产生不同影响。其中,接种 HEB07D 的紫花苜蓿生长速率提高了 17.35%,达到了显著水平($P<0.05$)。接种 BJ09、NM03F 和 XJ01 的紫花苜蓿生物量显著增加,分别提高了 25.10%、37.59%和 34.94%。与对照(0-AMF)相比,紫花苜蓿在盐胁迫(200-AMF)下表现为生长速率和生物量的显著降低($P<0.05$),接种 AMF 可以在一定范围内缓解盐胁迫对紫花苜蓿生长的抑制作用。其中,200+AMF 处理下接种 NM03F 和 XJ01 的生长速率分别是 200-AMF 处理的 1.96 倍和 1.58 倍,生物量分别是 200-AMF 处理的 1.46 倍和 1.27 倍,效果最为明显。

表 2 紫花苜蓿接种与未接种不同 AMF 在盐胁迫下的丛枝菌根侵染情况

AMF	AMF 侵染率(%)			
	0-AMF	0+AMF	200-AMF	200+AMF
BJ09	0.00f	39.25±3.48b	0.00f	25.25±2.93c
HEB07D	0.00f	46.63±3.50a	0.00f	26.25±2.78c
XJ03C	0.00f	17.25±1.53e	0.00f	18.39±1.04de
NM03F	0.00f	24.13±0.99cd	0.00f	24.75±1.53c
XJ01	0.00f	41.38±5.03b	0.00f	22.63±1.60cde
BJ04A	0.00f	21.88±1.91cde	0.00f	20.88±2.17cde
BJ04A	0.00f	22.25±2.47cde	0.00f	24.50±2.79c

注:数据后不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);0-AMF 表示 0 mmol/L NaCl 处理下未接种 AMF 处理,0+AMF 表示 0 mmol/L NaCl 处理下接种 AMF 处理,200-AMF 表示 200 mmol/L NaCl 处理下未接种 AMF 处理,200+AMF 表示 200 mmol/L NaCl 处理下接种 AMF 处理,下同。

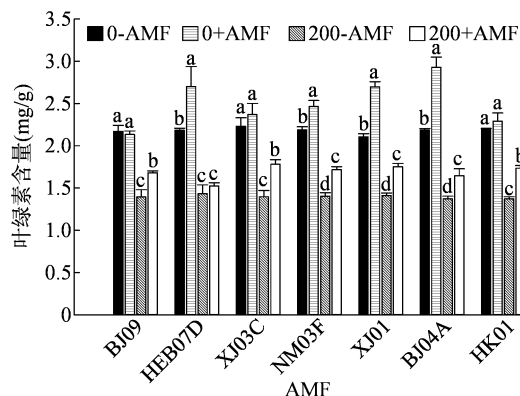
表 3 不同 AMF 对盐胁迫下紫花苜蓿生长速率及生物量的影响

AMF	植物生长速率(mm/d)				生物量(g)			
	0-AMF	0+AMF	200-AMF	200+AMF	0-AMF	0+AMF	200-AMF	200+AMF
BJ09	9.39±0.64a	9.64±0.61a	1.32±0.05b	1.42±0.03b	0.247±0.031b	0.309±0.020a	0.155±0.015c	0.161±0.010c
HEB07D	10.80±0.94b	12.67±0.81a	1.64±0.13c	1.96±0.16c	0.244±0.024a	0.252±0.034a	0.151±0.015b	0.182±0.019ab
XJ03C	9.50±0.82a	9.37±0.39a	1.68±0.12b	1.75±0.16b	0.248±0.028a	0.219±0.016ab	0.168±0.008b	0.170±0.012b
NM03F	10.93±0.97a	11.40±0.98a	1.67±0.11b	3.27±0.38b	0.266±0.031b	0.366±0.039a	0.167±0.003c	0.244±0.004b
XJ01	9.66±0.44a	9.81±0.57a	1.60±0.10b	2.52±0.38b	0.249±0.029b	0.336±0.043a	0.157±0.013c	0.200±0.026bc
BJ04A	10.33±0.53a	11.59±0.85a	1.62±0.07b	1.70±0.08b	0.250±0.028a	0.243±0.017a	0.166±0.019b	0.179±0.014b
BJ04A	10.60±0.74a	10.66±0.80a	1.45±0.14b	1.81±0.28b	0.248±0.015a	0.238±0.020a	0.166±0.013b	0.184±0.009b

注:同行同一指标数据后不同小写字母代表不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.3 叶绿素含量

由图 1 可知,200 mmol/L NaCl 处理下紫花苜蓿的叶绿素含量显著降低,与未接种(200-AMF)的处理相比,接种不同类型 AMF(200+AMF)处理的紫花苜蓿叶片中叶绿素含量均表现为不同程度的升高,除 HEB07D 外,其他 6 个 AMF 菌株处理均达到显著水平($P < 0.05$),提高了 19.85%~27.46%,其中,XJ03C 和 HK01 效果最明显。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
图1 不同 AMF 对盐胁迫下紫花苜蓿叶绿素含量的影响

2.4 丙二醛含量

如图 2 所示,紫花苜蓿的 MDA 含量在盐胁迫下显著升高,但与未接种 AMF 的处理相比,盐胁迫下接种不同 AMF 处理的紫花苜蓿 MDA 含量表现出不同程度的降低,均达到了显著水平($P < 0.05$)。其中,菌株 NM03F 和 HK01 侵染的紫花苜蓿的 MDA 含量分别降低了 24.20% 和 17.79%,效果最明显。

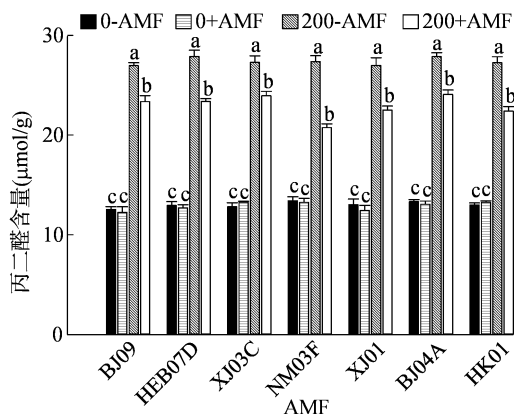


图2 不同 AMF 对盐胁迫下紫花苜蓿丙二醛含量的影响

2.5 钠离子(Na^+)含量

无盐处理下,接种与未接种 AMF 的紫花苜蓿叶片中 Na^+ 含量无显著差异。200 mmol/L NaCl 处理显著提高了紫花苜蓿叶片中的 Na^+ 含量($P < 0.05$)。盐胁迫下接种 AMF 可以显著降低紫花苜蓿叶片中的 Na^+ 含量,不同 AMF 菌株下降的幅度有所

差异。其中,菌株 HK01 和 NM03F 效果较好,分别下降了 27.48% 和 24.52%,菌株 HEB07D 下降幅度较小,仅为 8.68% (图 3)。

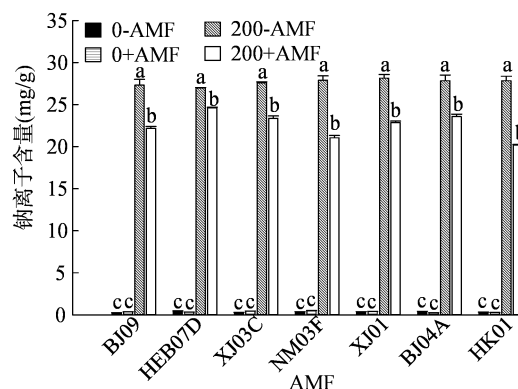


图3 不同 AMF 对盐胁迫下紫花苜蓿叶片中 Na^+ 含量的影响

2.6 钾离子(K^+)含量

如图 4 所示,0 mmol/L NaCl 处理下紫花苜蓿叶片中的 K^+ 含量维持在一定水平,接种 AMF 后除 HEB07D 和 HK01 处理外,其余 AMF 菌株可以进一步显著提高紫花苜蓿的 K^+ 含量。200 mmol/L NaCl 处理使紫花苜蓿的 K^+ 含量显著降低,接种 7 种不同的 AMF 均显著提高了盐胁迫下紫花苜蓿的 K^+ 含量($P < 0.05$),其作用效果存在一定的差异。其中,接种 XJ01、HK01 和 NM03F 的 K^+ 含量提高幅度较大,分别提高了 26.30%、22.39% 和 21.04%。

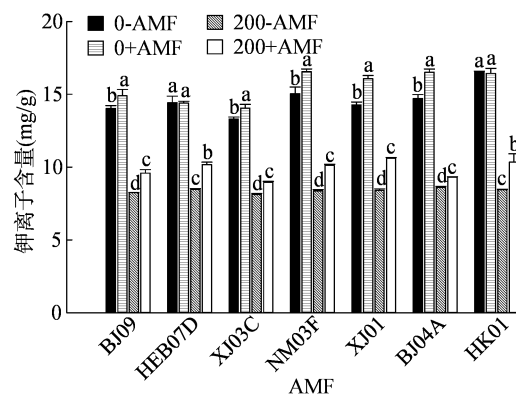


图4 不同 AMF 对盐胁迫下紫花苜蓿叶片中 K^+ 含量的影响

2.7 隶属函数综合评价

为了更好地反映不同 AMF 菌株提高盐胁迫下紫花苜蓿耐盐性的作用效果,本研究利用盐胁迫下接种 AMF 与未接种 AMF 处理各指标的相对值计算隶属函数值并进行排序。如表 4 所示,7 个不同 AMF 菌株提高紫花苜蓿耐盐性由强到弱依次为 NM03F > XJ01 > HK01 > BJ09 > HEB07D > XJ03C > BJ04A。说明幼套近明球囊霉中的 NM03F 和摩西

表 4 不同 AMF 菌株提高紫花苜蓿耐盐性综合评价

AMF	隶属函数值						平均值	排序
	生长速率	生物量	叶绿素含量	丙二醛含量	Na ⁺ 含量	K ⁺ 含量		
BJ09	0.043	0.054	0.670	0.094	0.542	0.451	0.309	4
HEB07D	0.162	0.432	0.000	0.323	0.000	0.654	0.262	5
XJ03C	0.000	0.000	1.000	0.000	0.352	0.109	0.243	6
NM03F	1.000	1.000	0.753	1.000	0.843	0.711	0.884	1
XJ01	0.581	0.572	0.842	0.361	0.533	1.000	0.648	2
BJ04A	0.009	0.133	0.638	0.111	0.353	0.000	0.207	7
HK01	0.225	0.214	0.947	0.464	1.000	0.785	0.606	3

斗管囊霉中的 XJ01、HK01 提高紫花苜蓿耐盐性的效果较好。

3 讨论

AMF 能够与大多数陆地植物形成共生关系,对植物的生长发育产生促进作用,提高植物抵抗盐碱、干旱、重金属等逆境胁迫的能力,在保护生态环境、生物防治等方面发挥着重要作用^[12-13]。AMF 具有丰富的物种多样性,且与寄主植物之间存在选择性,不同 AMF 类型对同一寄主植物产生的作用效果存在差异^[14]。如赵华等对番茄的研究发现,从 4 种 AMF 中初筛得到的地表多样孢囊霉和幼套近明球囊霉能够提高番茄对盐胁迫的适应性,并筛选出最佳促生菌种地表多样孢囊霉用于番茄的规模化生产^[15]。张淑彬等对露天煤矿区回填土壤中 8 种 AMF 生态适应能力的研究发现,摩西斗管囊霉的综合分值最高,对斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)的作用效果最好^[16]。当 AMF 侵染植物后,能够促进植物生长发育和提高抵抗胁迫能力的 AMF 可视为优势菌株,本研究的目的就在于筛选出盐胁迫下提高紫花苜蓿耐盐性效果较好的 AMF 优势菌株。

本研究发现,无盐处理下接种不同 AMF 对紫花苜蓿的生长状况会产生不同的影响,其中 HEB07D、BJ09、NM03F 和 XJ01 表现较好,可能与这些菌株在无盐处理下具有较高的菌根侵染率有关。而盐胁迫显著降低了紫花苜蓿的生长速率和生物量,接种 AMF 可以在一定范围内降低盐胁迫对紫花苜蓿生长的抑制作用,这与谭英等的研究结果^[17]相似。不同 AMF 对于盐胁迫下紫花苜蓿生长抑制的缓解作用存在差异,可以将其作用效果作为评价 AMF 提高紫花苜蓿耐盐性效应的评价指标之一。

MDA 是用于评估植物胁迫条件下受氧化损伤程度的重要指标,通常情况下,MDA 含量较高时,表

明植物受到损伤的程度较大^[18]。叶绿素含量的高低与叶绿体活性有关,盐胁迫会抑制叶绿素的合成,导致叶片中的叶绿素含量显著下降^[19]。本研究中,紫花苜蓿在受到盐胁迫后表现为 MDA 含量升高、叶绿素含量降低的现象,接种 AMF 可以提高盐胁迫下紫花苜蓿的叶绿素含量,降低 MDA 的积累,表明 AMF 可以缓解盐胁迫对植物光合能力和细胞膜的损伤^[20-21]。不同 AMF 菌株类型的作用效果不同,耐盐性较强的 AMF 菌株其叶绿素含量下降幅度相对较小,反之则较大。

盐碱土中较高的 Na⁺ 浓度会使植物细胞中 Na⁺ 大量积累,破坏原有的离子平衡,产生离子毒害。同时,Na⁺ 还会导致植物根系对 K⁺、Ca²⁺ 等其他离子的吸收受阻,致使植物必需营养元素摄入不足^[22]。本研究发现,盐胁迫使紫花苜蓿叶片中的 Na⁺ 含量显著增加,同时伴随着 K⁺ 含量显著下降,为了有效抵抗盐胁迫造成的伤害,降低植物对 Na⁺ 的吸收以及减少地上部分 Na⁺ 的积累至关重要。在盐胁迫下接种 AMF 可以缓解 Na⁺ 在叶片中的积累,这与前人对阿月浑子(*Pistacia vera*)^[23]、海枣(*Phoenix dactylifera*)^[24]的研究相一致。而 K⁺ 是蛋白质生物合成的关键因素,对于植物参与渗透平衡十分重要^[25]。本研究中不同 AMF 菌株均可以显著提高盐胁迫下紫花苜蓿的 K⁺ 含量,维持离子平衡。其中,菌株 HK01 和 NM03F 对于保持紫花苜蓿叶片中较高的 K⁺ 含量,降低 Na⁺ 含量效果较好。

植物在经历盐碱胁迫后,会产生多种应答反应,机制复杂^[26-27],选择单一指标评价植物耐盐性存在一定的片面性,可以结合多项指标通过隶属函数法进行耐盐性综合测评,以提高结果的准确性和可靠性^[28-29]。本研究得出不同 AMF 作用于紫花苜蓿后各指标的隶属函数值在 0.207~0.884 之间,对盐胁迫的作用效果存在较大差异,不同 AMF 菌株提

高紫花苜蓿耐盐性由强到弱依次为 NM03F > XJ01 > HK01 > BJ09 > HEB07D > XJ03C > BJ04A。

4 结论

盐胁迫下紫花苜蓿接种 AMF 可以缓解植物受到的伤害,表现为生物量增加、叶绿素含量升高,MDA 含量降低,维持较高的 K^+ 含量和较低的 Na^+ 含量,且不同 AMF 菌株的作用效果存在较大差异。通过综合评价得出,幼套近明球囊霉中的 NM03F 和摩西斗管囊霉中的 XJ01、HK01 对提高紫花苜蓿的耐盐性效果较好。

参考文献:

- [1] Guiza M, Benabdelrahim M A, Brini F, et al. Assessment of alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars for salt tolerance based on yield, growth, physiological, and biochemical traits [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(8): 3117–3126.
- [2] Smith S E, Read D. The symbionts forming arbuscular mycorrhizas [M]// *Mycorrhizal symbiosis*. Amsterdam: Elsevier, 2008: 13–41.
- [3] Liang S C, Jiang Y, Li M B, et al. Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition from salt stress using AMF in alfalfa seedlings [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, 14(1): 482–491.
- [4] 曹磊, 李逸雯, 凌康杰, 等. 盐渍化胁迫下接种不同丛枝菌根真菌对番茄耐盐性的影响 [J]. *福建农业学报*, 2022, 37(2): 188–196.
- [5] Zhang D J, Tong C L, Wang Q S, et al. Mycorrhizas affect physiological performance, antioxidant system, photosynthesis, endogenous hormones, and water content in cotton under salt stress [J]. *Plants*, 2024, 13(6): 805.
- [6] 张金莲, 李铭燕, 康贻豪, 等. 14 种 AM 真菌对枳生长的影响 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(11): 3278–3283.
- [7] Chandrasekaran M, Chanratana M, Kim K, et al. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis, water status, and gas exchange of plants under salt stress: a meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 457.
- [8] Klinsukon C, Lumyong S, Kuyper T W, et al. Colonization by arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of *Eucalyptus* (*Eucalyptus camaldulensis*) seedlings [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 4362.
- [9] 初建香, 张立中. 紫花苜蓿的品质特性及其在动物生产中的应用 [J]. *中国饲料*, 2022(11): 91–95.
- [10] 毛庆莲, 王胜. 国内盐碱地治理趋势探究浅析 [J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(增刊 1): 302–306.
- [11] Song L L, Ding W, Zhao M G, et al. Nitric oxide protects against oxidative stress under heat stress in the calluses from two ecotypes of reed [J]. *Plant Science*, 2006, 171(4): 449–458.
- [12] 李娇娇, 曾明. 丛枝菌根对植物根际逆境的生态学意义 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3216–3226.
- [13] 刘宇乐, 姜宛彤, 苏文欣, 等. 丛枝菌根真菌调控植物耐盐碱机制研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(19): 9–17.
- [14] 阮仕琴, 陶刚, 娄璇, 等. 丛枝菌根真菌生态功能及其与共生植物互作机理 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 237–244.
- [15] 赵华, 任晴雯, 王熙予, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下番茄抗氧化酶活性和光合特性的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(11): 2075–2084.
- [16] 张淑彬, 纪晶晶, 王幼珊, 等. 内蒙古露天煤矿区回填土壤具生态适应能力丛枝菌根真菌的筛选 [J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3729–3736.
- [17] 谭英, 尹豪. 盐胁迫下根施 AMF 和褪黑素对紫花苜蓿生长、光合特征以及抗氧化系统的影响 [J]. *草业学报*, 2024, 33(6): 64–75.
- [18] 温琦, 赵文博, 张幽静, 等. 植物干旱胁迫响应的研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(12): 11–15.
- [18] 夏华美, 曹志坚, 于铭玥, 等. 30 份草地早熟禾苗期耐盐性综合评价 [J]. *草业科学*, 2023, 40(12): 3124–3137.
- [20] Qin W J, Yan H Y, Zou B Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate salinity stress in peanut: evidence from pot-grown and field experiments [J]. *Food and Energy Security*, 2021, 10(4): e314.
- [21] 龚远博, 胡吉怀, 胡丁猛, 等. 丛枝菌根真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2022, 42(8): 1320–1329.
- [22] 胡爱双, 张小栋, 郭文静, 等. 盐胁迫下八棱海棠株系的离子吸收、运输与分配 [J]. *植物生理学报*, 2021, 57(9): 1829–1838.
- [23] Abbaspour H, Pour F S N, Abdel-Wahhab M A. Arbuscular mycorrhizal symbiosis regulates the physiological responses, ion distribution and relevant gene expression to trigger salt stress tolerance in pistachio [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2021, 27(8): 1765–1778.
- [24] Ait-El-Mokhtar M, Baslam M, Ben-Laouane R, et al. Alleviation of detrimental effects of salt stress on date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by the application of arbuscular mycorrhizal fungi and/or compost [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 131.
- [25] Tomar N S, Agarwal R M. Influence of treatment of *Jatropha curcas* L. leachates and potassium on growth and phytochemical constituents of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2013, 4(5): 1134–1150.
- [26] Liang W J, Ma X L, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: a review [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2018, 495(1): 286–291.
- [27] 余忆, 汪伟, 万何平, 等. 盐胁迫下氮素对生菜形态建成及生理生化特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(17): 165–170.
- [28] 熊雪, 桂维阳, 刘沫含, 等. 不同紫花苜蓿品种在均匀与不均匀盐胁迫下的耐盐性评价 [J]. *草业学报*, 2018, 27(9): 67–76.
- [29] 向雪纯, 张云玲, 李培英. 4 种藜科植物萌发期耐盐性 [J]. *草业科学*, 2022, 39(10): 2151–2159.