

Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and the Total Flavonoids of *Caragana microphylla* Lam. under Salt Stress^{*}

Hua Zhang¹, Yuying Bao^{1#}, Buqin Te²

¹College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot

²Inner Mongolia Medical University, Hohhot

Email: zhanghua-007@163.com, #ndbyy@imu.edu.cn

Received: May 14th, 2013; revised: Jun. 19th, 2013; accepted: Jul. 6th, 2013

Copyright © 2013 Hua Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A pot experiment was conducted to test the effect of *Glomus mosseae* on the growth and the total flavonoids of *Caragana microphylla* Lam. under different NaCl salt treatments. The result indicated that: 1) The inoculation of *G. mosseae* promoted the growth of *C. microphylla* under natural grown conditions. The dry weight of the overground part, underground part and the total were increased by 17.9%, 29.4%, 20.0% respectively and the flavonoids content in leaves, stems and roots were increased by 9.0%, 0.9%, 11.7% respectively than non-inoculated plants. Among them, they have a significant difference ($P < 0.05$) in addition to the total flavonoids content of stems compare to non-inoculated. 2) The biomass and total flavonoids content of *C. microphylla* significantly reduced under NaCl Stress, and remarkably aggravated with the increasing of the salt stress degree. 3) AMF further promoted the growth of *C. microphylla* under salt-stress. The total dry weight and the flavonoids content were higher in inoculated plant than non-inoculated plants. The mycorrhizal infection rate and mycorrhizal dependence of *C. microphylla* were also affected by NaCl. NaCl and AMF have significant ($P < 0.05$) interaction effect on the dry weight and the flavonoids content in leaves and roots. AMF not only can improve the growth ability but also can reduce the loss of plant production caused by salt-stress and increase its flavonoids content. It plays an important role to promote the development and utilization of the regional plant resources in saline.

Keywords: *Caragana microphylla* Lam.; NaCl Stress; Mycorrhizal Infection Rate; Mycorrhizal Dependence; Flavonoids

盐胁迫下接种丛枝菌根真菌(AMF)对小叶锦鸡儿的生长及总黄酮含量的影响^{*}

张 华¹, 包玉英^{1#}, 特布沁²

¹内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特

²内蒙古医科大学, 呼和浩特

Email: zhanghua-007@163.com, #ndbyy@imu.edu.cn

收稿日期: 2013年5月14日; 修回日期: 2013年6月19日; 录用日期: 2013年7月6日

摘 要: 本文利用盆栽试验, 研究不同 NaCl 盐浓度条件下, 接种摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)对小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)生物量及总黄酮含量的影响。结果显示: 1) 在正常生长条件下, 与不接种(对照)相比, 接种 *G. mosseae* 小叶锦鸡儿地上部干重、地下部干重和总干重分别增加了 17.9%、29.4%和 20.0%; 叶、茎

^{*}基金项目: 国家自然科学基金研究项目(210013); 内蒙古自治区自然科学基金研究项目(207104)。

[#]通讯作者。

和根中总黄酮含量分别提高了 9.0%、0.9%和 11.7%，其中，除茎中的总黄酮差异性不显著外，其余指标与对照差异均达到显著性水平($P < 0.05$)。2) NaCl 盐胁迫下，小叶锦鸡儿的生长受到明显的抑制，其生物量和总黄酮含量显著降低，并随盐浓度的增加而加剧。3) 盐胁迫下接种 *G. mosseae* 显著促进了小叶锦鸡儿的生长，植物干重和总黄酮含量均比未接菌植株高。同时，NaCl 盐胁迫也影响小叶锦鸡儿的菌根侵染率和菌根依赖性。盐处理和 AMF 对生物量干重、叶和根中总黄酮含量的交互作用显著($P < 0.05$)。表明 AMF 不仅能提高小叶锦鸡儿在盐碱地中的生长能力并减轻盐胁迫对植物造成的产量损失，同时也增加了它的黄酮含量，对于推动 AMF 在盐碱地区植物资源生产与开发利用中具有重要的意义。

关键词：小叶锦鸡儿；NaCl 胁迫；菌根侵染率；菌根依赖性；总黄酮

1. 引言

盐渍化是自然界中广泛存在的一种胁迫环境，并且在世界许多地方正逐年增加，特别是在干旱半干旱地区^[1]。截止 2010 年内蒙古盐渍化土地面积已达 4745 万亩，盐渍化土地已经成为制约内蒙古农牧业发展的主要瓶颈，因此治理改良盐碱地已势在必行。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)是广泛存在于各种生态环境的一种真菌，与大多数植物的根系共生形成菌根，能显著影响植物的生长和发育，促进矿物质的吸收，增强植物的抗逆性(抗旱、抗盐、抗病等)，影响植物的次生代谢过程，提高产量和品质等^[2-5]。摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)是一类对环境适应能力强、应用范围广的一类丛枝菌根真菌。研究发现，锦鸡儿根际 AMF 多样性中，摩西球囊霉为优势种^[6]。

小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)，为豆科锦鸡儿属植物，别名为柠条。主要分布于内蒙古中西部，是干旱草原、荒漠草原地带的先锋树种，广泛应用于水土保持和固沙治沙之中。小叶锦鸡儿不仅是优良的牧草，也是重要的药用植物^[7]。它不仅有很强的抗旱能力，也有较强的耐盐能力，但在盐碱地较重的土壤中仍然存在幼苗成活率低、植物生长受阻等问题。另外，由于牧草具有产量大、原料容易获得、残渣仍可作为饲料等优点，从牧草中提取黄酮类物质以提高牧草经济附加值的研究已成为新的研究课题^[8]。而且小叶锦鸡儿富含黄酮类化合物，是一种具有很大潜力的黄酮类化合物提取资源植物^[9]。但在盐胁迫下 AMF 对小叶锦鸡儿生长及总黄酮含量的影响，至今未见报道。

本文以摩西球囊霉为接种剂，一是研究不同盐浓

度下，小叶锦鸡儿与 AMF 的共生关系及耐盐性，以便进一步探索提高小叶锦鸡儿耐盐能力的途径和方法，对于提高其产量、改善盐碱地环境等具有重要的现实意义。二是研究不同盐浓度下 AMF 对小叶锦鸡儿总黄酮含量的影响，以明确总黄酮在其各器官中的分布，确定其适宜的采收部位，增加其在盐胁迫下产量，为其总黄酮的可持续利用提供科学依据。

2. 试验材料与方法

2.1. 材料

小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)由内蒙古呼和浩特林业种站提供。供试菌种为摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)(国家资源平台编号 1511C0001 BGCAM0023)由北京市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”(BGC)提供，接种剂是经高粱扩繁后含有孢子(160 个/g)、菌丝和侵染根段等混合的根际土。芦丁(购自生工生物工程(上海)有限公司)。

河沙，高温高压(121°，14 kPa)灭菌 2 h，以确保基质中不含任何土著 AMF。pH 为 7.76(1:5)，全 N: 0.561 g/kg，全 P: 1.27 g/kg，NaCl 含量 0.05 g/kg，每盆栽土 2 kg。

2.2. 试验方法

2.2.1. 试验设计

试验采用双因子(AMF 和 NaCl 盐分含量)设计。因子一有两个处理：接种 AMF(采用层播法，将接种土壤装入塑料盆至 2/3 处，添加菌剂，接种处理每盆施 10 g 菌剂)和不接种(不接种处理每盆施 10 g 灭菌接种物和 10 ml 不灭菌接种物的水滤液，以保持微生物

区系一致性); 因子二有 4 个盐水平, 如表 1, 双因子设计共 10 个处理组合, 每个处理重复 3 次, 共 30 个盆钵, 随机排列。

种子用 1%NaClO 消毒 10 分钟, 用蒸馏水反复冲洗残余 NaClO, 将消毒的种子播入 12 × 13 × 15 CM³ 盆(用 70%酒精浸泡 1 h, 用自来水冲洗干净, 晾干备用)中, 每盆接种 10 粒, 出苗整齐后及时定苗, 从中挑选生长状况基本一致的幼苗(苗高相当), 每盆留苗 3 株。在温室内培养, 播种 50 d 后开始对小叶锦鸡儿植株进行 NaCl 盐处理, 按处理分别浇 0、2.4、4.8、7.2 和 9.6 g/L 的盐溶液 200 ml, 两天浇一次, 共浇 5 次。隔 3 天浇一次水, 每次每盆浇水 100 ml, 每周浇一次 1/10 的 Hoagland 营养液, 四周后收获植物。

2.2.2. 标准曲线的绘制

精确称取在 105℃干燥恒重的芦丁对照品 10 mg, 用 70%乙醇溶解, 摇匀, 定容至 10 ml, 终浓度为 1 mg/ml 的芦丁标准品溶液, 作为贮备液备用。

精密量取上述溶液 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ml, 分别加水至 3 ml, 加 5%亚硝酸钠水溶液 0.5 ml, 放置 6 min, 加 10%硝酸铝 0.5 ml, 混匀后放置 6 min, 加入 5%氢氧化钠溶液 2.5 ml, 混匀, 放置 15 min 后, 蒸馏水定容至 10 ml。用紫外分光光度计, 在波长 510 nm 处测吸光值, 以对照品浓度为横坐标, 吸光度为纵坐标做标准曲线。

3. 测定方法与数据分析

小叶锦鸡儿干重采用称重法。

总黄酮含量测定, 在 60℃下烘干至恒重, 粉碎过 60 目筛, 精确称取 0.1 g, 样品加 70%乙醇 10 ml, 65℃水浴锅加热 2 h, 超声波提取 1 h, 从中吸取 0.5 ml 样品溶液, 按绘制标准曲线的方法, 由标准曲线计算出总黄酮含量。

侵染率采用 Phillips & Hayman 的方法^[10], 菌根侵染率(F, %) = (菌根侵染的根段数/检测的根段总数) ×

Table 1. Design of experiment
表 1. 实验设计

	0(CK)	1.2 g/kg	2.4 g/kg	3.6 g/kg	4.8 g/kg
<i>G. mossese</i>	M+	M+	M+	M+	M+
	M-	M-	M-	M-	M-

注: “M+”表示植物接种 *G. mossese*; “M-”表示植物未接种 *G. mossese*。

100%。

菌根依赖性采用 Bagyaraj 的方法^[11], 菌根依赖性 (%) = (接种处理干重 - 不接种处理干重)/接种处理干重 × 100%。

采用 SPSS V16.0 和 EXCELL 软件进行数据分析。

4. 结果与分析

4.1. AMF 对小叶锦鸡儿生物量的影响

如表 2 所示, 非盐条件(CK)下, 与未接菌植物相比, 接种 *G. mossese* 显著提高了小叶锦鸡儿的地上部干重、地下部干重和总干重, 提高率分别是 17.9%、29.4%和 20%。

NaCl 对小叶锦鸡儿的生物量有显著(P < 0.05)或极显著(P < 0.01)性影响(表 3)。随 NaCl 盐浓度的增加,

Table 2. The effects of AMF on the biomass of *Caragana microphylla* under different treatments
表 2. 不同处理下 AMF 对小叶锦鸡儿生物量的影响

NaCl /g·kg ⁻¹	处理	地上部干重(g)	地下部干重(g)	总干重(g)	侵染率(%)
0(CK)	M+	0.92a	0.22b	1.14a	60.0%
	M-	0.78b	0.17c	0.95b	
1.2	M+	0.93a	0.25a	1.18a	70.0%
	M-	0.67c	0.13cd	0.8c	
2.4	M+	0.66c	0.17c	0.61de	43.3%
	M-	0.5De	0.11d	0.67d	
3.6	M+	0.55d	0.12d	0.67d	33.3%
	M-	0.44e	0.1d	0.54ef	
4.8	M+	0.49de	0.09d	0.58ef	13.3%
	M-	0.43e	0.08d	0.51f	

注: 同一列数据中字母不同者表示在 5%水平上差异显著。

Table 3. Statistical analysis of the effect of AMF on the biomass and total flavonoids contents of *Caragana microphylla* under different treatments

表 3. 不同处理下 AMF 对小叶锦鸡儿生物量和总黄酮含量影响的统计分析

各指标	AMF		盐浓度		AMF × 盐浓度	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
1	60.588	<0.05	39.858	<0.05	4.067	<0.05
2	34.786	<0.05	7.020	<0.01	7.272	<0.01
3	324.485	<0.05	36.892	<0.05	11.585	<0.05
4	132.520	<0.05	149.010	<0.05	62.013	<0.05
5	359.799	<0.05	152.607	<0.05	80.205	<0.05
6	17.580	<0.05	608.728	<0.05	2.238	0.101

注: 数字 1,2,3……6, 分别代表地上部干重、地下部干重、总干重、根中总黄酮、叶中总黄酮和茎中总黄酮。

小叶锦鸡儿生物量逐渐降低,但接种 AMF 的植株生物量均比对照不接种高,可见,AMF 对其生物量有显著性($P < 0.05$)影响(表 3)。其中在盐浓度分别为 1.2、2.4 和 3.6 g/kg 时,接种 *G. mosseae* 植株的总干重比不接种植株,分别提高了 47.5%、36.7%和 24.7%,差异均达到显著性水平($P < 0.05$),在盐浓度为 4.8 g/kg 时,总干重虽然提高了 13.7%,但差异不显著。由表 3 分

析可见,盐处理和 AMF 的双重交互作用对生物量干重有显著性影响($P < 0.05$),对地下部干重有极显著性影响($P < 0.01$)。

4.2. AMF 对小叶锦鸡儿植株总黄酮含量的影响

从图 1(a)中可以看出,小叶锦鸡儿不同营养器官的总黄酮含量是不同的,其中叶的总黄酮含量最高,

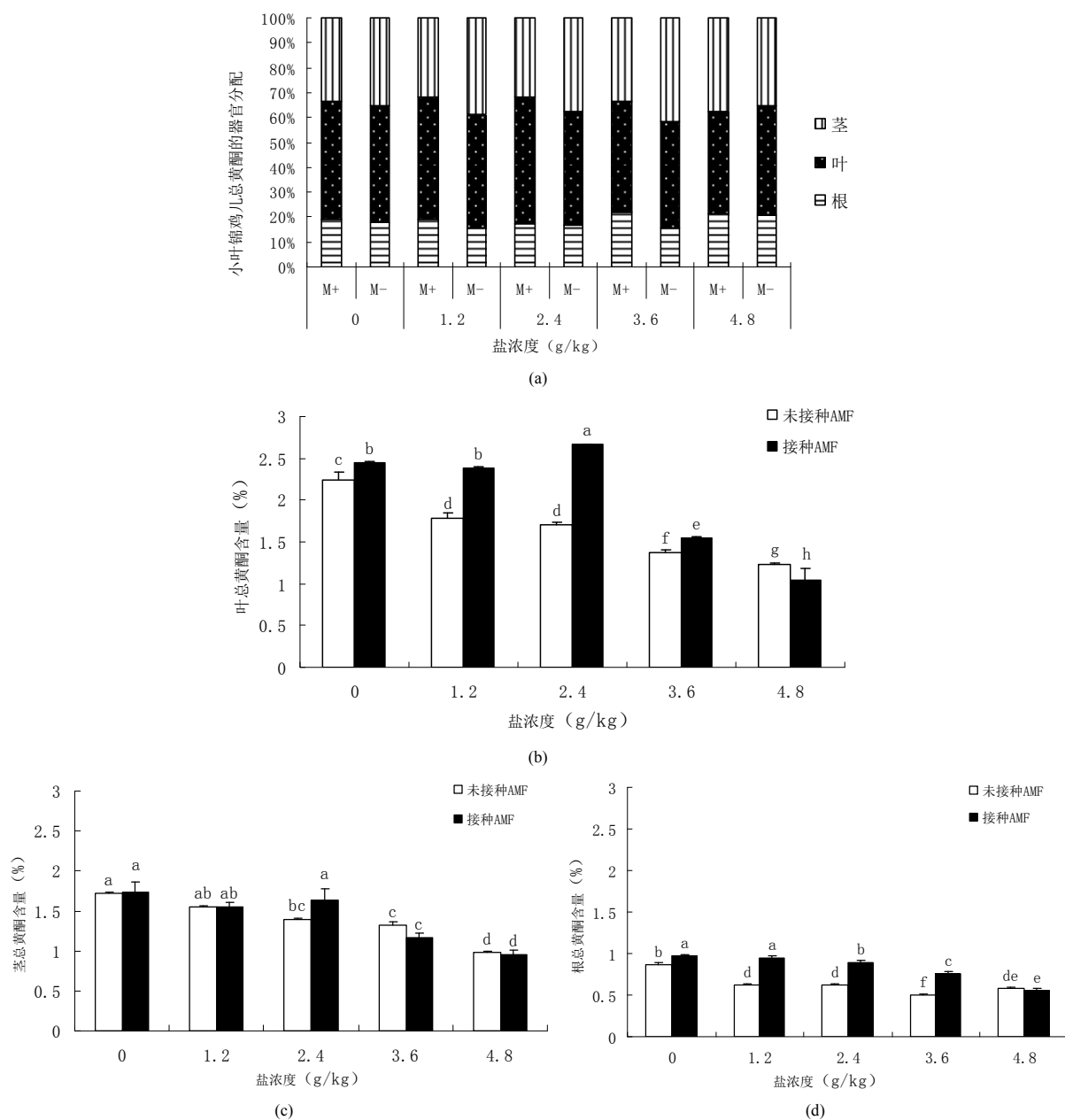


Figure 1. (a) Allocation rate of the total flavonoids to organ of *Caragana microphylla* under different treatments; (b) The total flavonoids contents of leaves in *Caragana microphylla* under different treatments; (c) The total flavonoids contents of stems in *Caragana microphylla* under different treatments; (d) The total flavonoids contents of root in *Caragana microphylla* under different treatments
 图 1. (a) 不同处理下小叶锦鸡儿中总黄酮的器官分配比例; (b) 不同处理下小叶锦鸡儿叶中总黄酮含量; (c) 不同处理下小叶锦鸡儿茎中总黄酮含量; (d) 不同处理下小叶锦鸡儿根中总黄酮含量

茎的次之,根最少,且叶或茎中总黄酮含量约为根中的 2~3 倍。由图 1(b)~1(d)可知,正常生长条件下(CK),接种 *G. mosseae* 小叶锦鸡儿叶、茎和根中总黄酮含量比不接种处理分别提高了 9.0%、0.9%和 11.7%,其中,接菌叶和根总黄酮含量与不接菌植株中的差异达到显著性水平($P < 0.05$),而茎中的差异性不显著。

与对照(CK)相比,NaCl 盐胁迫导致小叶锦鸡儿中的总黄酮含量随盐浓度的增加而逐渐降低,但接种 *G. mosseae* 小叶锦鸡儿叶和茎的总黄酮含量随盐浓度的增加是先增加后降低。当盐浓度为 2.4 g/kg 时,叶、茎的总黄酮含量最高,比不接菌植株分别提高了 55.7%和 17.3%;其次是盐浓度为 1.2 g/kg 时,提高率分别为 32.9%和 0.5%;当盐浓度为 3.6 g/kg 时,叶的提高率为 12.5%(图 1(b))。同一 NaCl 盐浓度水平下,与不接种植株相比,接种植株叶中总黄酮含量差异均达到显著水平($P < 0.05$)(图 1(b));茎中总黄酮含量在盐浓度为 2.4 g/kg 时达到显著差异水平($P < 0.05$)(图 1(c)),其它盐浓度下不显著。不论接种与不接种 *G. mosseae*,小叶锦鸡儿根中总黄酮含量都随盐浓度增加而降低,当盐浓度为 1.2 g/kg、2.4 g/kg、3.6 g/kg 时,比对照不接种植株,分别提高了 51.3%、45.6%、49.3%(图 1(d)),且差异均达到显著性水平($P < 0.05$)(图 1(d))。在盐浓度为 4.8 g/kg 时,未接菌植物的总黄酮含量均比接菌植物高,在根和茎中差异不显著,但叶中达到显著性差异($P < 0.05$)。由表 3 可知,盐水平和 AMF 的交互作用对叶、根中总黄酮含量影响显著($P < 0.05$),而对茎中总黄酮含量的影响不显著。

4.3. NaCl 盐胁迫对 AM 侵染率的影响

由表 2 可见, *G. mosseae* 能与小叶锦鸡儿形成良好的共生关系,在正常生长条件(CK)下,丛枝菌根侵染率为 60%;在 NaCl 盐浓度为 1.2 g/kg 时,侵染率最大为 70%;而盐浓度大于 1.2 g/kg 时,随盐浓度的增加菌根侵染率逐渐降低,当盐浓度达到 4.8 g/kg,菌根侵染率仅为 13.3%。

4.4. NaCl 盐胁迫对小叶锦鸡儿菌根依赖性的影响

植物对 AMF 的依赖性(即植物依靠 AMF 使自身生长量增加的百分率),是反映植物与 AMF 相互关系

的指标之一。从图 2 中可见,在低 NaCl 盐浓度(1.2 g/kg)条件下,小叶锦鸡儿菌根依赖性最大,而随着盐浓度的增加,菌根依赖性逐渐降低。

4.5. 相关性析

小叶锦鸡儿菌根侵染率和菌根依赖性与生物量、总黄酮含量的相关性分析见表 4,菌根侵染率与植物生物量、总黄酮含量均有正相关性。其中,与菌根依赖性、地下部干重有极显著($P < 0.01$)正相关性,与地上部干重、总干重和根中总黄酮有显著性($P < 0.05$)正相关。菌根依赖性与所有指标均有极显著($P < 0.01$)或显著性($P < 0.05$)正相关性。

5. 讨论

黄酮类化合物作为植物次生代谢产物,广泛分布

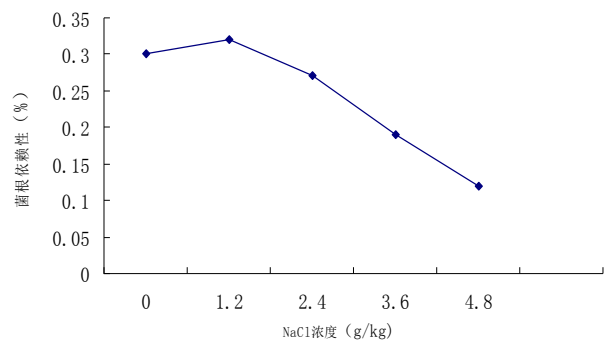


Figure 2. The effects of NaCl on the Mycorrhizal dependency of *Caragana microphylla*
图 2. NaCl 盐对小叶锦鸡儿菌根依赖性的影响

Table 4. The correlation analysis of the colonization rate and the mycorrhizal dependence on the plant biomass and the total flavonoids of *Caragana microphylla*
表 4. 小叶锦鸡儿菌根侵染率和菌根依赖性对生物量、总黄酮含量的相关性分析

指标	菌根侵染率	菌根依赖性
菌根侵染率	1	
菌根依赖性	0.968**	1
地上部干重	0.935*	0.921*
地下部干重	0.980**	0.967**
总干重	0.950*	0.935*
叶中总黄酮	0.820	0.933*
茎中总黄酮	0.825	0.939*
根中总黄酮	0.925*	0.982**

注: *表示 0.05 水平上显著性相关; **表示 0.01 水平上的极显著性相关。

于各种植物体内,当植物受到外来微生物侵染时,黄酮类化合物合成途径中某些环节的关键酶基因(*pal*(苯丙氨酸解氨酶(PAL)是酚类物质合成的中心酶)和*chs*(查耳酮合酶(CHS)是植物体内催化类黄酮类物质生物合成的关键酶))得到表达^[12-14],导致植物黄酮类化合物增加。本文结果显示,正常生长条件下,接种*G. mosseae*显著提高了小叶锦鸡儿的生物量(地上部干重、地下部干重和总干重)和总黄酮含量。说明接种AMF能促进植物的生长和发育,提高次生代谢能力^[15,16]。

NaCl 盐胁迫降低了植物的生物量^[17],但是接种AMF能提高植物的耐盐性^[5]。本研究结果表明,随盐胁迫程度的递增,未接种植株的生物量逐渐降低,但接种*G. mosseae*的小叶锦鸡儿植株生物量均高于未接种植株,尤其是接种植物总干重,在同一盐浓度下,与不接种植物差异均达到显著性水平($P < 0.05$)。在盐浓度为0~3.6 g/kg时,同一盐浓度条件下,接种小叶锦鸡儿地上部干重和地下部干重与不接种之间差异均达到显著性水平($P < 0.05$),但在4.8 g/kg时,差异不显著。另外,在盐浓度为2.4~3.6 g/kg时,不接种小叶锦鸡儿的生物量(地上部干重、地下部干重和总干重)之间无显著性差异,但接种植物在盐浓度为3.6~4.8 g/kg时,才出现差异不显著。这表明盐浓度在小于4.8 g/kg时,盐胁迫虽能显著抑制小叶锦鸡儿的生长,但AMF能缓解盐胁迫对植物的毒害作用,提高小叶锦鸡儿的耐盐性,促进植物的生长发育,增加产量,这与其它植物中的研究结果相同^[18,19]。AMF提高植物抗盐性的机理不是唯一的,可能是因为AMF菌丝扩大了根的吸收面积,提高了水分的吸收效率,缓解了植物生理性缺水,减轻了细胞膜的损伤程度,从而提高了其抗盐性;也可能是因为AMF提高了植物对磷等矿质养分的吸收,改善了由盐胁迫引起的营养亏损,从而增加了植物的抗盐能力。正是由于人们对菌根真菌提高植物耐盐性机制认识尚不完全一致^[20],因此关于其作用机制还有许多问题有待深入研究。

逆境环境下,植物会自动调节非酶促保护物质(如黄酮类物质),以缓解胁迫环境对细胞的伤害^[21]。本研究结果显示,在盐浓度为0~3.6 g/kg时,同一盐浓度条件下,接种*G. mosseae*的小叶锦鸡儿总黄酮含量比未接种植株均有不同程度的增加,尤其是显著的增加

了叶和根中总黄酮的含量,但盐浓度为4.8 g/kg时,与不接种植株相比,接种*G. mosseae*显著降低了叶中总黄酮的含量,而茎和根中总黄酮含量虽然降低了,但差异不显著。与孟静静^[22]的研究结果相同,她认为适度的胁迫能增加植物总黄酮的含量,但是重度胁迫下,接种AMF却显著的降低了地上部和地下部植株的总黄酮含量。可能是因为中度胁迫下,AMF有效的减缓了总黄酮类物质的降低,因而导致接种植物仍比对照不接种含有高浓度的黄酮类物质,而重度盐胁迫下,总黄酮类物质发挥自身的抗氧化作用,因而植物内总黄酮含量较低。

菌根侵染率反映了植物根系受AMF侵染的程度,也反映了AMF与植物的亲和力^[23]。本文研究发现,摩西球囊霉与小叶锦鸡儿形成了良好的共生现象,正常生长条件下,达到60%,说明摩西球囊霉与小叶锦鸡儿的亲和性高,可能是与摩西球囊霉通常是锦鸡儿属植物根际土壤中的优势种有关^[24,25],与贺学礼等^[6]人的研究结果一致。随NaCl盐浓度的增加,小叶锦鸡儿的根系AM侵染率先升高后减低,可能是因为低浓度的胁迫,加强了植物与AMF的共生作用,而高浓度NaCl,使AMF的生理活性受到限制,孢子萌发缓慢,菌丝产量下降,从而降低菌根侵染率,这与Jahromi在生菜、韩冰等在黄瓜上的研究结果相一致^[26,27]。

Plenchette^[28]认为,不同植物对AMF的依赖性不同受多方面因素的影响。本研究发现在盐浓度为1.2 g/kg时,小叶锦鸡儿的菌根依赖性最高,随盐浓度的增加,菌根依赖性逐渐降低。这说明,低盐可以促进植物与AMF之间的共生作用,增强了植物对水分和营养物质的吸收;而高盐对寄主植物和AMF均产生危害,降低植物对菌根真菌的依赖性。

随着环境因子的变化,AMF对宿主植物生长发育和总黄酮含量的调节作用也不同。本实验结果显示,AMF和盐胁迫双重交互作用对小叶锦鸡儿的地下部干重有极显著性影响($P < 0.01$),对地上部干重、总干重、叶和根中总黄酮含量有显著性影响($P < 0.05$),对茎中总黄酮含量无显著性影响。

6. 结论

1) *G. mosseae*能与小叶锦鸡儿形成良好的共生关系,正常水分条件下,显著提高了植物生物量(地上部

干重、地下部干重和总干重)和总黄酮含量,且叶中总黄酮含量最高,其次是茎,根中最少。

2) 盐胁迫条件下,接种 *G. mosseae* 对其生物量和总黄酮含量有显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)影响。在盐浓度为 2.4~3.6 g/kg 时,不接种小叶锦鸡儿已明显表现出植物生长缓慢等现象,但接种植物在盐浓度为 3.6~4.8 g/kg 时才出现上述症状。可见,AMF 能通过提高根系水分和营养物质吸收效率的直接作用和增加体内次级代谢产物含量的间接作用来提高植物耐盐性,缓解盐胁迫对植物的离子毒害,促进植物生长,增加产量和药用成分黄酮类物质的积累。

因此,基于 AMF 与植物的共生关系,深入探索 AMF 对资源植物生长发育、药用成分积累、植物抗逆性的影响,并加大 AMF 在牧草生产、提高牧草经济附加值、盐渍化土壤治理与植被恢复、生态环境保护方面的应用研究,具有重要的理论和实际意义。

参考文献 (References)

- [1] B. Giri, R. Kapoor and K. G. Mukerji. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and salinity on growth, biomass and mineral nutrition of *Acacia auriculiformis*. *Biology and Fertility Soils*, 2003, 38(3): 170-175.
- [2] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] W. Schliemann, B. Kolbe, J. Schmidt, et al. Accumulation of apocarotenoids in mycorrhizal roots of leek (*Allium porrum*). *Phytochemistry*, 2008, 69(8): 1680-1688.
- [4] S. Zubek, S. Mielcarek and K. Turnau. Hypericin and pseudohypericin concentrations of a valuable medicinal plant *Hypericum perforatum* L. are enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 2011, 22(2): 149-152.
- [5] P. Rosa, A. Ricardo and J. M. Ruiz-Lozano. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi: A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(1): 181-200.
- [6] 贺学礼, 刘媿, 安秀娟等. 水分胁迫下 AMF 对柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 生长和抗旱性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 47-52.
- [7] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 18.
- [8] 蒙秋霞, 张丽珍, 牛宇. 不同生长时期小叶锦鸡儿黄酮类化合物含量的变化动态[J]. *草地学报*, 2011, 19(6): 943-947.
- [9] 蒙秋霞, 牛宇, 牛西午. 锦鸡儿属几种植物的总黄酮含量测定[J]. *华北农学报*, 2005, 20(3): 43-45.
- [10] J. M. Phillips, D. S. Hayman. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transaction of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158-161.
- [11] D. J. Bogyaraj. Vesicular-arbuscular: Application in agriculture. In: *Techniques for mycorrhizal research, method in microbiology*. London: Academic Press, 1992: 818-833.
- [12] M. R. Lambais, W. F. Ríos-Ruiz and R. M. Andrade. Antioxidant responses in bean (*Phaseolus vulgaris*) roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 2003, 160(2): 421-428.
- [13] Q. S. Wu, Y. N. Zou and R. X. Xia. Effects of water stress and arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism and antioxidant production by citrus (*Citrus tangerine*) roots. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(3): 166-172.
- [14] 张瑞芹, 赵海泉, 朱红惠等. 丛枝菌根真菌诱导植物产生酚类物质的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2010, 37(8): 1216-1221.
- [15] G. Larose, R. Chênevert, P. Moutoglis, et al. Flavonoid levels in roots of *Medicago sativa* are modulated by the developmental stage of the symbiosis and the root colonizing arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159: 1329-1339.
- [16] M. A. Ponce, J. M. Scervino, R. Erra-Balsells, et al. Flavonoids from shoots and roots of *Trifolium repens* (white clover) grown in presence or absence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *Phytochemistry*, 2004, 65(13): 1925-1930.
- [17] P. Zuccarini, P. Okurowska. Effects of mycorrhizal colonization and fertilization on growth and photosynthesis of sweet basil under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(1): 497-513.
- [18] S. Shokri, B. Maadi. Effect of arbuscular mycorrhizal fungus on the mineral nutrition and yield of *Trifolium alexandrinum* plants under salinity stress. *Journal of Agronomy*, 2009, 8(2): 79-83.
- [19] A. A. H. A. Latef, H. Chaoxing. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and fruit yield of tomato grown under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 2011, 127(3): 228-233.
- [20] 徐静, 董宽虎, 高文俊等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐能力的作用机制[J]. *草业与畜牧*, 2010, 6(175): 5-8.
- [21] T. Qu, Z. B. Nan. Research progress on responses and mechanisms of crop and grass under drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 126-135.
- [22] 孟静静, 贺学礼. 干旱胁迫下 AMF 对丹参生长和养分含量的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2011, 34(1): 51-55, 61.
- [23] 林先贵, 郝文英. 不同植物对 VA 菌根菌的依赖性[J]. *植物学报*, 1989, 31(9): 721-725.
- [24] 贺学礼, 赵丽莉, 杨宏宇. 黄土高原柠条锦鸡儿根际 AMF 生态学研究[J]. 2007, 15(2): 81-84.
- [25] 贺学礼, 陈蒸, 郭辉娟等. 荒漠柠条锦鸡儿 AMF 多样性[J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3041-3049.
- [26] F. Jahromi, R. Aroca, R. Porcel, et al. Influence of salinity on the *in vitro* development of *Glomus intraradices* and on the *in vivo* physiological and molecular responses of mycorrhizal lettuce plants. *Microbial Ecology*, 2008, 55(1): 45-53.
- [27] 韩冰, 郭世荣, 贺超兴等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 154-158.
- [28] C. Plenehette, J. A. Fortin and V. Furlina. Growth responses of several plants species to mycorrhizae in a soil of low fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant & Soil*, 1983, 70: 199-209.