

DOI: 10.5846/stxb201410232077

贺超, 陈伟燕, 贺学礼, 姜桥, 赵丽莉. 不同水肥因子与 AM 真菌对黄芩生长和营养成分的交互效应. 生态学报, 2016, 36(10): - .
He C, Chen W Y, He X L, Jiang Q, Zhao L L. Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi under different soil water and fertilizer conditions on the plant growth and nutrients of *Scutellaria baicalensis* Georgi. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

不同水肥因子与 AM 真菌对黄芩生长和营养成分的交互效应

贺 超, 陈伟燕, 贺学礼*, 姜 桥, 赵丽莉

河北大学生命科学学院, 保定 071002

摘要: 利用盆栽接种试验, 探讨不同水肥条件下 AM 真菌双网无梗囊霉 *Acaulospora bireticulata* 对黄芩生长、养分含量和次生代谢产物的影响, 为黄芩水肥合理施用提供理论依据。结果表明, 不同水肥条件下, AM 真菌能与黄芩根系形成良好共生关系, 接种 AM 真菌能显著提高黄芩根系菌根侵染率和生物量, 水分和施肥处理对菌根侵染率和黄芩生长具有显著交互作用。不同水肥条件下, 接种 AM 真菌提高了植株保护酶活性和叶片渗透调节物质含量, 降低了脯氨酸和丙二醛含量; 显著增加了黄芩苷和 N、P、K、Ca、Mg、Fe 和 Zn 含量, 降低了 Mn 和 Cu 含量。N 和 P 含量随施肥量增加而提高, 其余矿质元素在施肥量 N 0.383 g、P 0.564 g、K 0.251 g 时含量最高, 说明 AM 真菌能够促进宿主植物根系对水分和矿质元素的吸收和利用, 提高水分和肥料利用率, 具有明显的节水节肥作用, 其中 50% 相对含水量, 施肥量 N 0.383 g、P 0.564 g、K 0.251 g 时, 接种 AM 真菌的促生效应最佳。
关键词: AM 真菌; 水肥条件; 生长量; 养分; 次生代谢产物; 黄芩

Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi under different soil water and fertilizer conditions on the plant growth and nutrients of *Scutellaria baicalensis* Georgi

HE Chao, CHEN Weiyan, HE Xueli*, JIANG Qiao, ZHAO Lili

College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract: *Scutellaria baicalensis* Georgi is a medicinal plant and perennial herb that could be used for treatment of hepatitis, cirrhosis of the liver, cancer, jaundice, anxiety, and nerve disorders. In recent years, to meet the high demand for medicine, the area of *Scutellaria* cultivation has increased in Hebei province, but the quality has reduced because of non-standard planting practices and improper use of fertilizer and water. Therefore, increased research attention has been paid to improving the yield and quality of *S. baicalensis* in China and abroad. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi are beneficial soil microbes that can form good symbiotic relationships with over 80% of all vascular plants. Some studies have shown that AM symbiosis is significantly influenced by variations in water and fertilizer conditions. This study focused on the effects of an AM fungus species (*Acaulospora bireticulata*) on the growth, nutrients, and secondary metabolites contents of *S. baicalensis* under different water and fertilizer conditions using a pot experiment in a greenhouse. The experimental design included 18 treatments representing a combination of 2 mycorrhizal states, 3 water regimes, and 3 fertilizer application levels. The results showed that AM fungal inoculation significantly promoted growth of the host plant and the infection rate, but these inoculation effects were influenced by the soil water and fertilizer levels. Under different water and fertilizer conditions, AM fungal inoculation improved the protective enzyme activity and content of osmotic adjustment substances, and decreased proline and MDA contents. AM fungal inoculation significantly increased the contents of baicalin and N, P,

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(C2010000273); 国家自然科学基金资助项目(31470533)

收稿日期: 2014-10-23; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuelh1256@aliyun.com

K, Ca, Mg, Fe, and Zn, and decreased the contents of Mn and Cu. The contents of N and P increased with improved fertilizer levels, and other mineral elements were the highest when the fertilizer level was 0.383 g N, 0.564 g P, and 0.251 g P. Therefore, AM fungi could form a good symbiotic relationship with *S. baicalensis*. Inoculation of AM fungi on *S. baicalensis* showed that the best effect under conditions of a relative water content of 50% and a fertilizer level of 0.383 g N, 0.564 g P, and 0.251 g K.

Key Words: Arbuscular mycorrhizal fungi; water-fertilizer condition; growth quality; nutrient; secondary metabolites; *Scutellaria baicalensis* Georgi

黄芩(*Scutellaria baicalensis* Georgi)为唇形科多年生草本植物,是我国一味常用中药材,性寒味苦,以根入药,多用于治疗癌症、肝炎、肝硬化、黄疸、焦虑和神经紊乱等疾病^[1-2]。近年来,随着野生黄芩资源逐渐减少,黄芩人工栽培走向规模化,然而黄芩人工栽培过程中经常出现药材质量下降问题,栽培过程中施肥浇水多凭借经验盲目施用,造成水分和肥料浪费现象普遍。

AM(arbuscular mycorrhiza)真菌是能与80%以上陆生高等植物形成丛枝菌根共生体的最为古老的一类土壤真菌。AM真菌侵染植物后,通过形成根内和根外菌丝增加植株根系吸收面积,促进宿主植物对土壤水分和营养物质的吸收,调节植株体内代谢活动,促进植物生长发育,增强植物抗逆性^[3-4]。研究表明,AM真菌能与许多药用植物(如丹参、胀果甘草、白术、青蒿、曼陀罗、荆芥、苍术、人参、三七等)形成共生关系,改善植物有效活性成分生产和积累,提高中药材质量^[5]。近年来,不同水肥条件或干旱胁迫下AM真菌对丹参、白芷和甘草等药用植物促生效应已有研究,并取得了显著成效^[6-8],但对黄芩的研究相对较少。

本课题组前期已完成了不同水分或不同施肥条件下AM真菌与黄芩生长关系的研究^[9-11],在此基础上,本试验在土培条件下,设置不同水分和施肥组合,研究AM真菌对黄芩生长和营养状况的影响,以便为充分利用AM真菌资源,合理施肥和灌溉,提高黄芩产量和品质提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试植物为黄芩 *Scutellaria baicalensis*。AM真菌为从黄芩根围土壤分离的优势菌种—双网无梗囊霉 *Acaulospora bireticulata*,接种剂是经苜蓿扩大繁殖后获得的含有孢子、菌丝和侵染根段的根际土,孢子密度54个/10g土。供试土壤取自河北保定农田土,土壤有机质10.38g/kg,碱解N65.43mg/kg,速效P24.83mg/kg,速效K97.33mg/kg,pH(H₂O)8.21。装盆前过2mm筛,按土:沙(2:1)混匀,晾干备用,试验容器为23cm×21cm×22cm的塑料盆,每盆装土4kg。供试肥料为尿素、KH₂PO₄·2H₂O和K₂SO₄。田间最大持水量23.5%。

1.2 试验设计

参考贺学礼等^[10-12]对黄芩水分和施肥量研究结果,本试验设3个土壤相对含水量,即20%、35%和50%,同一水分下设低肥(L)、中肥(M)和高肥(H)3个施肥量,即低肥N0.192g、P0.282g、K0.125g,中肥N0.383g、P0.564g、K0.251g,高肥N0.765g、P1.128g、K0.517g。同一水肥下设接菌(AM)和不接菌(CK)2个处理,接菌处理每盆均匀层施菌剂40g,对照处理加同等质量灭菌菌剂和接种物过滤液。每个处理4个重复,共72盆,试验盆随机排列。2012年10月10日播种,出苗后每盆定苗4株,植株生长期间,温室常规管理。12月1日开始用称重法进行水分处理,2013年8月15日收获植株,进行指标测定。

1.3 测定方法

黄芩收获时,将地上和地下部分分别收获,用自来水冲洗干净,备用。土壤有机质用烧失法测定,碱解N用碱解扩散法,有效P用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,有效K用1mol/L醋酸铵浸提-火焰光度法,pH用电位法^[12]。叶片可溶性糖用硫酸蒽酮法,可溶性蛋白用考马斯亮蓝G-250染色法,脯氨酸用茚三酮比色法,SOD

酶活性用 NBT 光化学还原法(以抑制 NBT 降解 10% 作为一个酶活单位), POD 酶活性用愈创木酚法(以每分钟光密度值上升 0.01 的酶量作为一个酶活单位), CAT 活性用紫外分光光度法(以每分钟内引起光密度值减少 0.1 的酶量单位作为一个酶活单位), MDA 含量用硫代巴比妥酸比色法测定^[13]。植株干重用称重法; 矿质元素 K、Ca、Mg、Mn、Fe、Cu、Zn 用火焰原子吸收法^[14]; 植物组织全 N 用凯氏定氮法, 全 P 用钒钼黄比色法^[13]。菌根侵染率按照 Biermann & Linderman 建立的根段侵染率加权法测定^[15]。

黄芩苷含量用 HPLC 法^[2]测定, 色谱条件: Apollo C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×150 mm×5 μm), 流动相为甲醇:水:磷酸(47:53:0.2), 检测波长 280 nm, 进样量 20 μL, 柱温 30℃。

对照品溶液制备: 取在 60℃ 减压干燥 4h 的黄芩苷对照品适量, 加甲醇制成 1 mL 含 60 μg 溶液, 即得。

供试品溶液制备: 精密称取黄芩根粉干样 0.3 g, 置于 100 mL 量瓶中, 加 70% 乙醇 40 mL, 加热回流 3 h, 放冷过滤, 滤液置于 100 mL 量瓶中, 加 70% 乙醇至刻度, 并摇匀。精密量取 1 mL, 置于 10 mL 量瓶中, 加甲醇至刻度, 摇匀, 即得。

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 和 SPSS19.0 软件 One-Way ANOVA 程序进行统计分析, *T*-test 比较同一水肥条件下接菌与不接菌的差异性, Duncan 多重比较法检验各处理平均值间差异显著性, 一般线性模型 (GLM) 过程比较接菌、水分和施肥三个因素之间的交互作用。

2 结果与分析

2.1 黄芩生长量和菌根侵染率

由表 1 可知, 同一水肥条件, 接种 AM 真菌显著提高了黄芩干重、株高和菌根侵染率; 施肥量为 M 和 H 时根冠比为不接菌株大于接菌株 (除施肥量 H 和 35% 含水量组合), 施肥量为 L 时接菌株显著大于不接菌株。

表 1 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩生长和菌根侵染率的影响

水肥处理 Treatment	接菌 Inoculation	干重 Dry weight/g		株高 Plant height/cm	根冠比 Root shoot ration	侵染率 Infection rate/%
		茎叶 Shoot	根 Root			
H20	CK	0.938±0.002e	0.625±0.004c	22.550±0.297g	0.667±0.005b	6.833±0.733g
	AM	1.097±0.001 * C	0.716±0.005 * D	24.587±0.261 * F	0.653±0.003 * B	66.207±1.44 * H
H35	CK	1.045±0.003c	0.707±0.008b	33.950±0.64b	0.676±0.007b	15.933±0.506c
	AM	1.247±0.003 * B	0.918±0.002 * B	35.227±0.352 * B	0.736±0.001 * A	85.910±0.805 * B
H50	CK	1.138±0.004a	0.849±0.005a	36.213±0.105a	0.746±0.002a	12.307±0.399e
	AM	1.287±0.031 * A	0.956±0.003 * A	38.883±0.591 * A	0.743±0.018A	76.703±0.55 * E
M20	CK	0.708±0.001g	0.439±0.007e	25.937±0.822e	0.621±0.009c	9.110±0.425f
	AM	0.893±0.004 * D	0.537±0.004 * F	26.687±0.168 * E	0.602±0.006C	72.567±1.19 * G
M35	CK	0.954±0.003d	0.584±0.002d	33.190±0.517bc	0.613±0.004c	18.767±0.521b
	AM	1.115±0.002 * C	0.681±0.009 * E	34.457±0.529 * C	0.611±0.007C	90.180±0.759 * A
M50	CK	1.095±0.002b	0.737±0.054b	37.007±0.69a	0.673±0.05b	14.620±0.617d
	AM	1.235±0.03 * B	0.811±0.003C	38.477±0.523 * A	0.657±0.016B	81.423±1.198 * D
L20	CK	0.482±0.004i	0.250±0.007h	23.860±0.415f	0.519±0.018d	13.150±0.747e
	AM	0.531±0.002 * F	0.301±0.003 * I	25.703±0.401 * F	0.567±0.006 * D	74.233±0.499 * F
L35	CK	0.643±0.004h	0.295±0.004g	29.677±0.59d	0.459±0.005e	20.187±0.266a
	AM	0.725±0.004 * E	0.383±0.004 * H	31.780±0.389 * D	0.529±0.008 * E	91.520±0.616 * A
L50	CK	0.779±0.002f	0.331±0.007f	32.813±0.536c	0.425±0.007f	16.737±0.406c
	AM	0.885±0.003 * D	0.416±0.004 * G	34.577±0.385 * BC	0.469±0.006 * F	84.150±0.244 * C
<i>P</i> (AM * WS)		0.030	0.000	0.340	0.001	0.000
<i>P</i> (AM * FT)		0.000	0.000	0.029	0.000	0.000
<i>P</i> (FT * WS)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
<i>P</i> (AM * WS * FT)		0.000	0.000	0.224	0.126	0.075

注: AM: 接种双网无梗囊霉; CK: 对照; 20、35、50: 不同含水量; L、M、H: 不同施肥量; WS (water stress): 水分胁迫; FT (fertilizer treatment): 施肥处理; 同一列 * 表示同一水肥下接菌与对照在 5% 水平差异显著, 同一列不同字母表示不同处理在 5% 水平上差异显著; *P* 表示不同处理间在 5% 水平上的交互效应

同一含水量,随施肥量增加,黄芩干重、根冠比和株高(20%含水量,施肥量 M 时最大,H 时最小)显著提高,菌根侵染率随之依次降低。

同一施肥量,随土壤水分降低,黄芩干重、株高依次减小,侵染率先升后降(35%含水量最高,20%含水量最低)。施肥量为 H 时,随土壤水分降低,根冠比依次减小;施肥量为 L 时,根冠比逐渐提高;施肥量为 M 时,接菌株根冠比逐渐减小,不接菌株先降后升(35%含水量最小,50%含水量最大)。

多因素方差分析发现,接菌和水分组合仅对黄芩干重、根冠比和菌根侵染率有显著交互作用;接菌和施肥组合、施肥和水分组合对黄芩干重、株高、根冠比和菌根侵染率有显著交互作用;接菌、水分和施肥组合仅对黄芩干重有显著交互作用。

2.2 黄芩叶片保护酶活性

由表 2 可见,同一水肥条件,接种 AM 真菌显著提高了叶片 POD、CAT 和 SOD 活性。

同一含水量,随施肥量增加,POD 活性先降后升,接菌株在施肥量 L 时最高,不接菌株在施肥量 H 时最高;CAT、SOD 活性先降后升,施肥量为 M 时最低,L 时最大。

同一施肥量,随含水量降低,POD、CAT 和 SOD 活性依次增强。

多因素方差分析发现,接菌和水分组合仅对 POD 和 SOD 有显著交互作用;接菌和施肥组合、施肥和水分组合对 POD、CAT 和 SOD 有显著交互作用;接菌、水分和施肥组合仅对 CAT 和 SOD 有显著交互作用。

表 2 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩叶片保护酶活性的影响

Table 2 Effect of AM fungi on protective enzyme activities of *S. baicalensis* under different soil water and fertilizer conditions

水肥处理 Treatment	接菌 Inoculation	POD/(U/(gFW·min))	CAT/(U/(gFW·min))	SOD/(U/(gFW·H))
H20	CK	2660.370±53.198a	299.333±8.082a	255.317±4.822b
	AM	2848.148±50.004 * B	330.005±7.211 * A	288.953±9.909 * B
H35	CK	2144.445±42.222d	226.667±5.131c	185.832±2.828d
	AM	2249.630±72.914D	285.333±4.163 * B	194.366±1.336 * F
H50	CK	1612.593±93.412f	165.333±14.047e	163.027±4.031e
	AM	1662.222±93.685F	206.667±4.163 * D	169.094±4.596G
M20	CK	2346.667±24.745c	224.010±5.291c	234.504±4.653c
	AM	2761.482±36.806 * B	272.333±2.516 * C	263.117±4.614 * C
M35	CK	2042.963±51.511e	188.667±9.018d	169.317±1.195e
	AM	2186.667±61.944 * D	217.023±7.211 * D	187.217±3.679 * F
M50	CK	1501.852±7.563g	138.005±2.005f	136.943±3.044f
	AM	1649.630±44.946 * F	166.010±6.011 * E	160.771±3.032 * G
L20	CK	2513.333±26.666b	304.333±8.386a	282.493±7.248a
	AM	2973.333±25.239 * A	320.667±2.309 * A	299.713±7.322 * A
L35	CK	2280.741±35.647c	282.012±16.370b	230.917±7.110c
	AM	2527.778±26.550 * C	288.023±8.021B	253.193±3.183 * D
L50	CK	1580.002±31.348fg	195.667±7.571d	190.653±6.832d
	AM	1804.444±59.670 * E	208.333±3.511D	214.867±6.094 * E
	<i>P</i> (AM * WS)	0.000	0.654	0.013
	<i>P</i> (AM * FT)	0.000	0.000	0.111
	<i>P</i> (FT * WS)	0.000	0.000	0.000
	<i>P</i> (AM * WS * FT)	0.263	0.005	0.003

2.3 黄芩叶片渗透调节物质和丙二醛含量

由表 3 可见,同一水肥条件,接种 AM 真菌显著提高了叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量,显著降低了脯氨酸和丙二醛含量。

同一含水量,随施肥量增加,可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量先降后升,施肥量 H 时含量最高(50%含水量,叶片可溶性糖在施肥量 L 时最高)。

同一施肥量,随含水量降低,可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量逐渐增加。

表 3 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩叶片渗透调节物质和丙二醛的影响

Table 3 Effect of AM fungi on osmotic adjustment substance and MDA of <i>S. baicalensis</i> under different soil water and fertilizer conditions					
水肥处理 Treatment	接菌 Inoculation	可溶性蛋白 Soluble protein(mg/g)	可溶性糖 Soluble suger(mg/g)	脯氨酸 Proline(μg/g)	丙二醛 MDA(mmol/gFW)
H20	CK	14.082±0.137a	14.141±0.357a	48.499±0.151a	9.559±0.163a
	AM	15.723±0.147 * A	16.223±0.155 * A	45.561±1.19 * A	7.374±0.068 * A
H35	CK	10.288±0.332c	10.998±0.318b	37.179±0.313d	8.316±0.281b
	AM	12.011±0.688 * C	12.443±0.288 * C	34.551±0.479 * D	6.345±0.157 * BC
H50	CK	8.019±0.425e	9.531±0.431d	28.884±0.355g	5.529±0.233f
	AM	8.747±0.476F	10.418±0.252 * E	25.554±0.159 * F	4.526±0.282 * E
M20	CK	10.686±0.128c	10.539±0.361bc	41.818±0.144c	7.233±0.199d
	AM	12.302±0.175 * C	11.841±0.273 * D	37.361±0.467 * C	6.079±0.262 * C
M35	CK	8.317±0.215e	8.357±0.412e	30.073±0.164f	5.623±0.226f
	AM	10.105±0.266 * E	9.730±0.219 * F	26.381±0.208 * F	4.107±0.108 * F
M50	CK	6.513±0.168g	5.359±0.155f	25.201±0.8790i	3.857±0.147h
	AM	7.536±0.391 * G	7.601±0.189 * G	20.553±0.478 * H	3.095±0.068 * G
L20	CK	12.547±0.474b	13.657±0.119a	44.178±0.422b	7.978±0.211c
	AM	14.226±0.707 * B	15.623±0.155 * B	40.827±0.356 * B	6.465±0.122 * B
L35	CK	9.601±0.319d	10.351±0.225c	35.547±0.194e	6.284±0.121e
	AM	11.1963±0.329 * D	12.361±0.337 * C	32.301±0.398 * E	5.385±0.242 * D
L50	CK	7.334±0.341f	9.541±0.238d	26.702±0.142h	4.488±0.101g
	AM	8.412±0.152 * F	10.739±0.107 * E	23.042±0.272 * G	3.853±0.125 * F
<i>P</i> (AM * WS)		0.006	0.204	0.092	0.000
<i>P</i> (AM * FT)		0.890	0.395	0.001	0.000
<i>P</i> (FT * WS)		0.000	0.000	0.000	0.000
<i>P</i> (AM * WS * FT)		0.937	0.000	0.919	0.008

多因素方差分析发现,接菌和水分组合仅对可溶性蛋白和丙二醛有显著交互效应;接菌和施肥组合仅对脯氨酸和丙二醛有显著交互作用;施肥和水分组合对可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸和丙二醛都有显著交互效应;接菌、水分和施肥组合仅对可溶性糖和丙二醛有显著交互效应。

2.4 黄芩苷含量

由表 4 可知,黄芩苷含量主要集中在根部,茎叶部含量较低。同一水肥处理,接种 AM 真菌提高了黄芩苷含量。

同一含水量,随施肥量增加,接菌和不接菌株根部和茎叶部黄芩苷含量逐渐增加。

同一施肥量,随含水量降低:接菌和不接菌株根部和茎叶部黄芩苷含量逐渐减少。

多因素方差分析发现,接菌和水分组合、接菌和施肥组合分别对根部和茎叶部黄芩苷都有显著交互作用;施肥和水分组合仅对根部黄芩苷有显著交互效应;接菌、水分和施肥组合对根部和茎叶部黄芩苷无明显交互作用。

2.5 矿质元素含量

2.5.1 大量元素

由表 5 可知,N、P、K、Ca 和 Mg 含量为茎叶 > 根,接种 AM 真菌显著提高了黄芩根部和茎叶部 N、P、K、Ca、Mg 含量(除施肥量 L,20%和 35%含水组合)。

同一含水量,随施肥量增加,植株 N、P 含量逐渐提高,Mg、K 和根部 Ca 含量先升后降(不接菌株茎叶部 Mg 含量逐渐增加),含量规律为施肥量 M > H > L,茎叶部 Ca 含量依次增加。

同一施肥量,随含水量降低,植株 N、P 和 K 含量逐渐减少,Ca、Mg 含量依次增加(施肥量 M 时,接菌株茎叶部 Mg 含量先降后升,不接菌株茎叶部 Mg 含量依次降低)。

多因素方差分析发现,接菌和水分组合仅对植株 P、Ca 和茎叶 K 有显著交互作用;接菌和施肥组合仅对植株 P、Mg 和根部 N、茎叶部 K 有显著交互作用;施肥和水分组合仅对植株 P、Mg、K、Ca 和根部 N 有显著交互作用;接菌、水分和施肥组合仅对植株 P、Mg、K、根部 N 和 Ca 有显著交互作用。

2.5.2 微量元素

由表 6 可知,Mn、Fe、Cu 和 Zn 含量为茎叶 > 根,接种 AM 真菌显著提高了植株 Fe、Zn 含量,降低了 Mn、Cu 含量。

同一含水量,随施肥量增加,Mn 含量逐渐上升(不接菌,含水量 20% 时根部 Mn 含量先升后降,施肥量 M > H > L);Fe、Cu 和 Zn 含量先升后降,施肥量 M > H > L。

同一施肥量,随含水量降低,Mn、Zn 含量逐渐升高,Fe 含量先升后降,含水量的影响依次为 35% > 20% > 50%;Cu 含量先升后降,含水量的影响依次为 35% > 50% > 20%。

多因素方差分析发现,接菌和水分组合仅对根部 Mn、Zn 和茎叶部 Fe 有显著交互作用;接菌和施肥组合仅对植株 Mn、Zn 和茎叶部 Fe 有显著交互作用;施肥和水分组合仅对根部 Mn、Zn 和茎叶部 Fe、Cu 有显著交互作用;接菌、水分和施肥组合对植株 Mn、Fe、Cu 和 Zn 均无显著交互作用。

3 讨论

AM 真菌与宿主植物形成良好的共生关系,在土壤形成庞大菌丝网络,扩大根系吸收范围,提高植物对水分和矿质营养吸收,促进植物生长^[4]。本试验结果表明,不同水肥条件下,土著 AM 真菌对黄芩根系有不同程度侵染,接种 AM 真菌后显著提高了菌根侵染率和植株生长量。氮肥利于黄芩对叶绿素合成和累积,能促进对养分吸收和干物质积累,磷肥在光合产物生产转运过程中能够促进有机物积累,钾肥对黄芩生长量影响较小,但三者对黄芩生长呈交互作用,随施肥量增加,黄芩生长迅速,但随后增幅变小,与肥料效应报酬递减律相符。配施氮磷钾肥可以促进黄芩生长——增加株高和干重,而施肥缺乏或水分胁迫会抑制植株生长,且两者叠加会加重这种抑制效应,接种 AM 菌能缓解胁迫,在低水低肥条件下较明显,高肥时靠根系直接吸收营养,满足植株生长需要,此时菌根效应不明显。

植株遭受水分胁迫时,细胞内活性氧自由基产生和清除代谢平衡受到破坏,导致自由基含量累积引发细胞膜脂过氧化,进而伤害植物。此时,植株能够启动保护酶系统有效防御和清除自由基,保护细胞免受膜脂过

表 4 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩苷含量的影响

Table 4 Effect of AM fungi on baicalin of *S. baicalensis* under different soil water and fertilizer conditions

水肥处理 Treatment	接菌 Inoculation	黄芩苷 Baicalin/(mg/g)	
		茎叶 Shoot	根 Root
H20	CK	3.182±0.048de	95.772±0.8448de
	AM	4.939±0.165 * CD	141.409±1.407 * DE
H35	CK	3.627±0.098bc	102.672±0.513b
	AM	5.948±0.131 * B	156.165±2.571 * B
H50	CK	4.072±0.222a	107.692±0.957a
	AM	6.407±0.129 * A	166.402±2.528 * A
M20	CK	2.925±0.089e	92.812±0.886f
	AM	4.695±0.522 * DE	137.104±3.462 * EF
M35	CK	3.342±0.131cd	98.450±1.841c
	AM	5.756±0.275 * B	150.44±1.724 * C
M50	CK	3.659±0.094b	103.244±1.107b
	AM	6.029±0.212 * AB	162.314±1.746 * A
L20	CK	2.265±1.080f	91.944±0.255f
	AM	3.508±1.155 * F	125.704±1.057 * G
L35	CK	2.987±0.113e	95.063±0.724e
	AM	4.483±1.151 * E	133.164±3.143 * F
L50	CK	3.463±0.374bcd	97.072±0.695cd
	AM	5.174±0.152 * C	143.367±1.108 * D
<i>P</i> (AM * WS)		0.001	0.000
<i>P</i> (AM * FT)		0.000	0.000
<i>P</i> (FT * WS)		0.217	0.001
<i>P</i> (AM * WS * FT)		0.813	0.317

表 5 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩大量元素含量的影响
Table 5 Effect of AM fungi on macroelements of *S. baicalensis* under different soil water and fertilizer conditions

水肥处理 Treatment	P/(μg/g)		N/(μg/g)		Mg/(μg/g)		K/(μg/g)		Ca/(μg/g)	
	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot
H20	2587.133±91.249d	2315.303±51.341d	25856.383±426.467g	17266.230±346.358e	132.205±0.397b	124.837±0.627b	823.885±10.614c	943.471±18.047fg	5832.151±174.259a	3463.229±50.203b
AM	3022.21±90.504 * F	2909.672±48.952 * E	27593.331±557.516 * F	19423.984±612.920 * E	133.368±0.422B *	125.837±1.310B	935.735±12.009E *	1019.809±4.657F *	6836.712±150.726A *	5481.624±127.607B *
H35	3271.975±63.214b	2869.647±40.796b	34416.398±519.851d	20342.87±569.116d	121.356±0.601f	116.979±0.415e	1011.084±29.951c	1100.842±33.244d	5270.807±36.183c	2809.448±113.081d
AM	3702.313±75.434 * C	3514.673±25.325 * C	35885.673±767.659 * C	21693.343±547.911 * D	122.129±0.724E	118.917±0.367C *	1090.696±23.288C *	1193.177±33.244D *	5817.595±124.587C *	3787.566±137.433E *
CK	3795.627±56.048a	3538.331±34.646a	41078.233±747.554a	25878.367±514.957a	115.626±0.613g	109.787±1.345f	1123.817±6.481b	1201.899±49.873b	4369.254±68.802e	2278.407±95.552f
AM	4406.676±16.921 * A	4210.024±69.907 * A	41804.633±919.693 * A	27773.571±505.131 * A	118.772±0.965F *	113.707±0.945D *	1198.064±16.484B *	1301.427±9.096B *	4745.215±115.173G *	3045.562±79.650G *
M20	1.98033±56.297g	1954.032±48.867f	23329.267±486.461h	14894.362±463.653f	131.837±1.327a	131.837±1.327a	999.514±12.823c	1050.376±5.269e	5462.287±35.426b	4236.732±85.703a
AM	2925.321±44.306 * C	2492.358±36.097 * F	25004.467±325.43 * H	17100.627±321.512 * F	139.341±0.618A *	139.341±0.618A *	1104.229±17.577C *	1140.591±7.682E *	6338.323±223.71B *	6084.38±84.615A *
CK	2412.783±100.533e	2298.071±61.733d	32279.267±261.653e	17672.267±106.308e	122.123±0.788c	122.121±0.788c	1099.379±21.448b	1146.497±1.961c	4822.531±59.057d	3396.879±60.905b
AM	3425.201±24.556 * E	3308.637±489.932 * D	33057.330±376.542 * D	19580.351±694.328 * E	126.407±2.292B *	126.404±1.290B *	1218.962±48.533B *	1267.734±12.024C *	5223.345±207.277F *	4299.171±98.523D *
M50	2800.061±34.044c	3914.082±48.877 * B	40066.450±119.516 * B	26914.453±179.673 * B	126.103±0.410d	116.753±1.419e	1268.732±6.694a	1329.515±5.922a	3865.954±36.495g	2648.318±98.671e
AM	4114.02±39.122 * B	3914.082±48.877 * B	40066.450±119.516 * B	26914.453±179.673 * B	130.757±0.453C *	120.843±0.852C *	1305.767±8.066A *	1493.397±15.213A *	4152.237±132.884G *	3481.591±151.586F *
L20	1218.48±27.839i	1142.061±29.597h	20877.345±607.435i	11091.684±276.132g	118.827±0.425e	118.827±0.425d	759.146±33.101f	909.243±6.409 * *	4957.507±69.438d	3164.579±51.374c
AM	2224.637±17.095 * H	2097.627±92.241 * G	22700.367±461.263 * I	13995.476±391.471 * G	126.917±0.801D *	126.917±0.801B *	807.131±17.628G	890.107±6.541H	5538.063±45.734D *	4595.193±34.882C *
L35	1528.333±54.262h	1355.479±105.513g	30994.343±1200.420f	14231.433±777.137f	106.897±0.417h	106.897±0.417g	820.875±6.594e	966.331±20.613i *	4066.529±115.978f	2203.771±84.867f
AM	3056.363±56.766 * F	2919.482±66.971 * E	32447.320±2725.403 * E	17816.367±332.150 * F	112.933±0.642G *	112.933±0.642D *	874.465±9.486F *	943.313±30.017G	4541.574±111.728G *	3273.889±110.837FG *
L50	2184.133±49.054f	2124.621±10.817e	35898.432±209.981c	22037.467±601.043c	102.363±0.813i	102.303±0.813h	968.266±7.727d	1019.611±33.653e	3077.088±60.991h	1822.251±67.224g
AM	3588.22±65.939 * D	3385.321±62.266 * D	36616.438±159.252 * D	23920.433±387.763 * D	104.963±1.097H *	104.963±1.097E *	1044.218±40.178D *	1162.773±32.945 DE *	3173.437±130.126H	2561.221±107.515H *
P(AM * WS)	0.000	0.000	0.023	0.070	0.167	0.178	0.000	0.000	0.000	0.000
P(AM * FT)	0.000	0.000	0.838	0.000	0.006	0.090	0.000	0.090	0.068	0.068
P(FT * WS)	0.000	0.000	0.053	0.000	0.001	0.000	0.000	0.023	0.002	0.002
P(AM * WS * FT)	0.000	0.000	0.862	0.018	0.029	0.027	0.001	0.307	0.004	0.004

氧化伤害^[16-17]。本试验中,接种 AM 真菌显著提高了叶片 POD、CAT 和 SOD 活性,改善了植株酶促反应系统,降低 MDA 含量,减少了因水分胁迫引起的活性氧积累,从而减轻因水分胁迫造成的膜伤害,提高了黄芩抗旱能力,与 Porcel 等人^[18-19]研究结果一致。接菌株耐旱性增强是通过干旱避免机制,如 AM 真菌菌丝加强对水分摄取,菌根化根的形态及菌根化土壤结构利于植物水分吸收^[20]。

表 6 不同水肥条件下 AM 真菌对黄芩微量元素含量的影响

Table 6 Effect of AM fungi on trace elements of *S. baicalensis* under different soil water and fertilizer conditions

水肥处理 Treatment	接种 Inoculation	Mn/($\mu\text{g/g}$)		Fe/($\mu\text{g/g}$)		Cu/($\mu\text{g/g}$)		Zn/($\mu\text{g/g}$)	
		茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root
H20	CK	42.641±0.502a	12.509±1.031a	219.871±5.723e	183.169±4.959e	6.131±0.509f	4.955±0.636f	35.706±0.579c	32.938±0.409b
	AM	35.767±0.945A *	8.941±1.172A *	237.692±4.339E *	207.477±6.486D *	4.657±0.626G *	3.943±0.162E	41.076±0.712B *	33.541±0.264C *
H35	CK	34.697±0.165cd	8.960±0.801bc	248.926±2.349c	224.817±8.394b	11.668±0.565c	9.767±0.588c	31.528±0.331d	27.077±0.602d
	AM	28.737±0.662C *	7.121±1.093BC	262.162±3.331D *	241.502±7.081B	9.916±0.557C *	7.605±0.242C *	36.914±0.794C *	29.697±0.549E *
H50	CK	22.004±0.404f	8.192±0.513cd	187.187±4.649f	138.008±4.999e	8.661±0.573e	6.716±0.376e	26.779±0.544e	22.821±0.485f
	AM	17.919±0.512E *	4.528±0.364D *	219.521±3.817F *	150.524±2.271F *	6.729±0.521F *	5.288±0.591D *	32.765±0.76D *	25.878±0.526G *
M20	CK	40.726±1.007b	12.793±0.854a	306.044±5.634b	217.097±5.112b	10.331±0.097d	7.959±0.677d	42.08±0.68a	37.062±0.409b
	AM	34.794±1.142AB *	8.599±0.502A *	338.775±5.649B *	236.502±5.416B *	8.989±0.527D *	6.754±0.129C *	45.112±1.104A *	39.794±0.555A *
M35	CK	33.879±0.646d	8.561±0.511c	355.192±6.262a	255.364±7.960a	15.309±0.629a	13.173±0.381a	38.666±0.492b	33.809±0.751a
	AM	28.572±0.992C *	6.996±0.452BC *	384.568±7.754A *	276.536±11.161A	13.229±0.296A *	11.281±0.582A *	40.918±0.673B *	37.198±0.261B *
M50	CK	21.251±0.342f	5.827±0.487e	238.211±4.537d	162.456±6.497d	13.498±0.539b	10.87±0.456b	34.939±0.356c	29.774±0.995c
	AM	16.281±0.627F *	3.835±0.714D *	272.732±4.761C *	177.416±5.571E *	11.462±0.175B *	8.867±0.875B *	37.607±1.024C *	32.674±0.066D *
L20	CK	35.595±1.061c	10.059±0.509b	189.92±1.726f	160.178±5.022d	5.908±0.290f	3.973±0.361g	31.721±0.450d	25.005±0.543e
	AM	33.829±1.464B	7.294±0.617B *	220.762±7.405F *	182.217±5.265E *	3.648±0.204H *	2.589±0.246F *	36.526±0.527C *	28.567±0.216F *
L35	CK	28.229±0.608e	7.109±0.691d	218.861±7.809e	191.117±6.448e	10.803±0.401d	8.977±0.364c	27.163±0.724e	21.651±0.589g
	AM	26.536±0.594D *	5.911±0.201C *	241.469±2.742E *	219.247±9.311C *	8.165±0.602E *	6.962±0.883C *	32.037±0.615D *	25.243±0.457G *
L50	CK	17.192±0.521g	4.039±0.799f	158.683±2.058g	109.581±9.154f	8.069±0.582e	6.213±0.077e	24.692±0.591f	19.495±0.292h
	AM	13.936±0.676G *	2.601±0.564E	189.913±3.764G *	131.498±2.729G *	5.99±0.339F *	4.711±0.291DE *	27.942±0.546E *	21.593±0.461H *
P(AM * WS)		0.341	0.001	0.009	0.374	0.336	0.058	0.626	0.040
P(AM * FT)		0.000	0.042	0.008	0.325	0.137	0.879	0.000	0.010
P(FT * WS)		0.596	0.042	0.000	0.342	0.026	0.227	0.101	0.000
P(AM * WS * FT)		0.025	0.323	0.335	0.753	0.773	0.807	0.185	0.001

本试验中,接种 AM 真菌降低了脯氨酸含量,且施肥量过高较施肥量略低时脯氨酸含量高,可能是土壤肥力高,土壤渗透压增大,一定程度上限制了植物对土壤水分的吸收。水分缺乏时,可溶性糖和可溶性蛋白累积以降低植株渗透势,进而从土壤吸收水分。Kubikova 等人研究罗勒和台湾青枣后发现,接种 AM 真菌植株能够体现出更大程度的渗透调节作用,提高植株耐旱能力^[21-22]。

研究表明,AM 真菌能够影响植物次生代谢,通过改进植物重要活性成分生产和积累,从而优化药用植物不同活性成分的组合物,提高药材质量^[23]。本试验中,适宜水肥条件下,接种株黄芩苷含量显著高于对照株,可能是由于 AM 真菌作为一种生物诱导子通过提高糖中间代谢产物来提高黄芩苷含量。张榕等人^[24]研究表明,水分胁迫下,黄芩可溶性糖含量增加与其黄酮类成分含量降低呈正相关,与本试验结果两者含量变化相同。土壤肥力较低时,黄芩苷随施肥量增加而上升,超过一定浓度后黄芩苷含量变化不大,这与曹鲜艳^[25]对氮、磷和钾肥对黄芩苷含量累积效应的试验结果一致。

研究表明,丛枝菌根能够通过提高亲和力、降低吸收临界浓度、产生菌丝分泌物、增加吸收面积、缩短扩散面积和降低离子扩散系数等机制来促进植株矿质元素吸收^[26]。氮磷钾增加会逐步提高矿质元素含量,除 N、P 元素,其它矿质元素含量在高施肥量时增幅略有下降,可能与植株对不同矿质元素累积量的作用有关。不同矿质元素在黄芩各器官分布具有差异性,茎叶>根,这可能与植株在生长期有机物累积有着密切关系。

AM 真菌对黄芩茎叶和根元素吸收的不同效应,可能是由于菌根改善矿质元素吸收和促进植物细胞物质循环的结果^[27]。

综上所述,AM 真菌与黄芩根系能形成良好共生关系,AM 真菌、水分、肥料梯度组合对黄芩生长和品质总体上表现出显著交互作用。水分胁迫、低肥或高肥都会影响黄芩植株正常生长,接种 AM 真菌能有效提高植株矿质元素和水分的吸收和运输,促进植株生长发育,改善黄芩品质,并有明显的节水节肥作用,其中 50% 相对含水量,施肥量 N 0.383 g、P 0.564 g、K 0.251 g 时,接种 AM 真菌的促进效应最佳。

参考文献 (References):

- [1] 中国植物志编委会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1977.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] Lee E H, Eo J K, Ka K H, Eom A H. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. *Mycobiology*, 2013, 41(3): 121-125.
- [4] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. London: Academic Press, 2008.
- [5] Zeng Y, Guo L P, Chen B D, Hao Z P, Wang J Y, Huang L Q, Yang G, Cui X M, Yang L, Wu Z X, Chen M L, Zhang Y. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and active ingredients of medicinal plants: Current research status and prospectives. *Mycorrhiza*, 2013, 23(4): 253-265.
- [6] 贺学礼, 马丽, 孟静静, 王平. 不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响. *生态学报*, 2012, 32(18): 5721-5728.
- [7] 赵金莉, 贺学礼. AM 真菌对白芷抗旱性和药用成分含量的影响. *西北农业学报*, 2011, 20(3): 184-189.
- [8] 刘盛林, 贺学礼. 水分胁迫下 AM 真菌对甘草生长的影响. *核农学报*, 2009, 23(4): 692-696.
- [9] 贺学礼, 马丽, 王平, 赵丽莉. AM 真菌和施 P 量对黄芩生长、养分吸收和微量元素的影响. *中国中药杂志*, 2011, 36(16): 2170-2175.
- [10] 王平, 贺学礼, 赵丽莉, 马丽, 郭辉娟. AM 真菌和施氮量对黄芩幼苗生长和微量元素的影响. *华北农学报*, 2012, 27(增刊): 259-263.
- [11] 陈伟燕, 贺学礼, 程春泉, 姜桥. 不同水分和双网无梗囊霉对黄芩生长和养分含量的影响. *西北农业学报*, 2014, 23(4): 173-177.
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 王学奎. *植物生理生化实验原理和技术 (第二版)*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 陈宇鸿, 沈仁富, 陈海红. 黄芩中微量元素的测定与分析. *中国卫生检验杂志*, 2009, 19(12): 3008-3009.
- [15] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae; a proposed method towards standardization. *New Phytologist*, 1981, 87(1): 63-67.
- [16] 张中峰, 张金池, 黄玉清, 杨慧, 罗亚进, 罗艾滢. 丛枝菌根真菌对植物耐旱性的影响研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1607-1612.
- [17] DaCosta M, Huang B R. Changes in antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation for bentgrass species in response to drought stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2007, 132(3): 319-326.
- [18] Porcel R, Barea J M, Ruiz-Lozano J M. Antioxidant activities in mycorrhizal soybean plants under drought stress and their possible relationship to the process of nodule senescence. *New Phytologist*, 2003, 157(1): 135-143.
- [19] 李州, 彭燕, 苏星源. 不同叶型白三叶抗氧化保护及渗透调节生理对干旱胁迫的响应. *草业学报*, 2013, 22(2): 257-263.
- [20] Marulanda A, Azeon R, Ruiz-Lozano J M. Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119(4): 526-533.
- [21] Kubikova E, Jennifer L M, Bonnie H O. Mycorrhizal impact on osmotic adjustment in *Ocimum basilicum* during a lethal drying episode. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158(9): 1227-1230.
- [22] Mathur N, Vyas A. Influence of arbuscular mycorrhizae on biomass production, nutrient uptake and physiological changes in *Ziziphus mauritiana* Lam. under water stress. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(3): 191-195.
- [23] Zubek S, Błazkowski J. Medicinal plants as hosts of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes. *Phytochemistry Reviews*, 2009, 8(3): 571-580.
- [24] 张榕, 李焱, 周铜水. 晒干过程中黄芩药材黄酮类成分的动态变化. *复旦学报: 自然科学版*, 2010, 49(5): 575-581.
- [25] 曹鲜艳, 徐福利, 王渭玲, 王静, 黄淑华, 张晓虎. 黄芩产量和黄芩苷含量对氮磷钾肥料的响应. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2171-2177.
- [26] Strack D, Fester T, Hause B. Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical, and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29(9): 1955-1979.
- [27] Atkinson D, Black K E, Forbes P J, Hooker J E, Baddeley J A, Watson C A. The influence of arbuscular mycorrhizal colonization and environment on root development in soil. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4): 751-757.