

丛枝菌根真菌对黄花蒿生长及药效成分的影响*

黄京华^{1**} 谭钜发¹ 揭红科¹ 曾任森²

(¹ 广西大学农学院, 南宁 530004; ² 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642)

摘要 通过盆栽接种试验, 研究丛枝菌根(AM)真菌对药用植物黄花蒿的生长、营养吸收和药效成分的影响. 结果表明: 接种摩西球囊霉和地表球囊霉增加了黄花蒿对 N、P、K 的吸收, 及叶片叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、茎粗和地上生物量, 尤其以接种摩西球囊霉的促进作用更强; 接种摩西球囊霉后植株茎、小枝和叶中的青蒿素含量分别提高了 32.8%、15.2% 和 19.6%, 接种地表球囊霉后分别提高了 26.5%、10.1% 和 14.9%; 接种摩西球囊霉和地表球囊霉的黄花蒿地上部的挥发油收油率比未接种的分别提高 45.0% 和 25.0%, 而且挥发油成分发生了改变.

关键词 丛枝菌根真菌 黄花蒿 次生代谢 青蒿素 挥发油

文章编号 1001-9332(2011)06-1443-07 **中图分类号** Q948.12 **文献标识码** A

Effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on *Artemisia annua* growth and its official components. HUANG Jing-hua¹, TAN Ju-fa¹, JIE Hong-ke¹, ZENG Ren-sen² (¹College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530004, China; ²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Eco-agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(6): 1443-1449.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of inoculating arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on the growth, nutrient uptake, and officinal components of *Artemisia annua*. Inoculation with AM fungi *Glomus mosseae* and *G. versiforme* improved the uptake of nitrogen, phosphorus, and potassium by *A. annua*, and increased the leaf chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate as well as the stem diameter and aboveground biomass of *A. annua*, with greater effects of inoculating *G. mosseae* than *G. versiforme*. After the colonization of *G. mosseae* and *G. versiforme*, the artemisinin content in *A. annua* stem, branch, and leaf was increased by 32.8%, 15.2%, and 19.6%, and 26.5%, 10.1%, and 14.9%, and the volatile oil content in leaf was increased by 45.0% and 25.0%, respectively, compared with the control. Furthermore, mycorrhizal colonization led to changes in volatile components.

Key words: arbuscular mycorrhizal (AM) fungi; *Artemisia annua*; secondary metabolism; artemisinin; volatile oil.

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌在自然界分布广泛,能与 80%~90% 的被子植物形成丛枝菌根,有促进植物吸收利用矿质养分和水分、促进生长、提高产量和改善品质的作用^[1-2]. 研究表明,AM 真菌能够影响植物的次生代谢过程,使植物次生代谢产物发生变化^[3-5]. 近年来,AM 真菌与药用植物的关系逐渐受到关注^[6],陆续有研究报道半夏^[7]、黄檗^[8]、三七^[9]等药用植物根围的 AM 真菌

种类及共生侵染状况,对于人工接种 AM 真菌对药用植物的影响也有一些探索性的研究^[10-12],但是人工接种 AM 真菌对药用植物有效成分的影响研究尚缺乏报道.

黄花蒿(*Artemisia annua*),别名青蒿,是菊科一年生草本植物,为我国传统中药,其有效成分青蒿素(黄花蒿素)是目前国际上防治疟疾的首选药物^[13]. 青蒿素是一种含有过氧桥结构的新型倍半萜内酯,人工化学合成生产青蒿素的成本高、难度大,目前青蒿素的主要来源是从黄花蒿中直接提取^[14]. 野生黄花蒿的青蒿素含量较低,可以通过黄花蒿种质的筛

* 国家自然科学基金项目(30960069)和农业部生态农业重点开放实验室开放课题项目(2009 k19)资助.

** 通讯作者. E-mail: hlhscau@163.com

2010-12-20 收稿,2011-03-29 接受.

选^[15-16]、人工栽培条件的改善^[17-18]等方法来提高黄花蒿中青蒿素的含量,而通过人工接种 AM 真菌提高青蒿素含量是一种新的尝试.因此,本文通过盆栽接种试验,研究 2 种 AM 真菌对黄花蒿生长的生理生化影响,探讨青蒿素含量与 AM 真菌侵染之间的关系,为提高人工栽培药用植物有效成分含量,揭示中药材“道地性”的形成机理,以及创新药用植物人工栽培技术提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 供试材料

2 种供试 AM 真菌为摩西球囊霉 (*Glomus mosseae* Nicolson & Gerdemann) 和地表球囊霉 (*Glomus versiforme* Berch),均由青岛农业大学刘润进教授惠赠,并于 2007 年 9—12 月在广西大学农学院教学科研基地网室利用玉米“农大 108”进行扩繁.供试黄花蒿种子购于广西药用植物园,为黄绿杆型.供试土壤为黄棕壤,速效 N 35.3 mg · kg⁻¹,速效 P 29.5 mg · kg⁻¹,速效 K 78.6 mg · kg⁻¹,有机质 1.2%,pH 5.9.

1.2 试验设计

2008 年 2 月,在广西大学农学院教学科研基地网室进行盆栽试验.土壤过孔径 2 mm 筛,河砂过 3 mm 筛,二者 1 : 1 混合后灭菌,装入 20 cm × 25 cm × 27 cm 的塑料盆中,每盆装灭菌砂土 7.5 kg. 试验设接种摩西球囊霉和接种地表球囊霉 2 个处理及对照 (CK),每个处理 10 盆重复,共 30 盆,随机摆放.

播种时,把供试菌剂均匀拌在灭菌砂土表层.其中,每克摩西球囊霉的接种势为 996.799,接种量为每盆 60 g,每盆接种势约为 60000^[1];每克地表球囊霉的接种势为 1191.466,接种量为每盆 50 g,另加 10 g 灭菌砂,每盆接种势约为 60000;对照为灭菌砂,每盆 60 g. 出苗后定期浇 Hoagland 营养液,每盆定植 1 株.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标及营养元素含量的测定 自黄花蒿出苗生长 40 d 始,每隔 31 d,每盆取 1 株,每个处理共取 10 株,测株高、基径.第 158 天收获,烘干后测地上生物量.分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定黄花蒿根、茎、枝和叶的 N、P、K 含量.

1.3.2 菌根侵染率的测定 每盆利用直径 1 cm 的打孔器取根系,测定各处理的菌根侵染率,测定方法参照刘润进等^[1,19].

1.3.3 光合指标的测定 每个处理随机取 3 株,剪取倒数第 3 枝中的叶子用 PerKinElmer Lambda 35 紫外/可见分光光度计测定叶绿素含量.在生长旺盛期,第 156 天晴天 10:00 用 TPS-1 光合测定系统,选用人工光源对每盆黄花蒿倒数第 3 枝的叶子测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度.

1.3.4 青蒿素含量的测定 将叶、主茎和枝条分开,烘干至恒量,用粉碎机粉碎过 60 目筛,以超声波方法提取青蒿素,用紫外分光光度法测定青蒿素含量^[20].所用青蒿素标准品购于中国医学科学院药用植物研究所,纯度为 99.8%.

1.3.5 挥发油含量的测定及组分分析 黄花蒿出苗生长第 158 天,采集每个处理的黄花蒿地上部分约 80 g,按照《中华人民共和国药典》^[21]中挥发油测定方法,以水蒸汽蒸馏法收集和测定挥发油含量,用 GC-MS/QP5050A 型气质联用仪(日本岛津公司)分析挥发油化学成分.

气相色谱条件:色谱柱为 DB-1 (J&W 公司)石英毛细管柱(0.25 mm × 30 m × 0.25 μm),进样口温度 270 °C,进样量为 0.2 μL.程序升温方式:初始温度 70 °C 保持 1 min,以 6 °C · min⁻¹升到 150 °C,再以 4 °C · min⁻¹升到 250 °C,保持 10 min.恒流 1.2 mL · min⁻¹.载气为氦气,分流比为 1 : 50,柱前压为 47 kPa.

质谱条件:载气为氦气,接口温度 250 °C,离子源 EI,电子能量 70 eV,电子倍增量为 1.2 kV,扫描质量范围 33 ~ 800 amu.

应用计算机检索谱库 NIST(美国国家标准与技术研究所,2008 年),自动根据峰面积计算各成分含量,并对各组分(峰)的质谱数据进行检索,对照有关质谱资料库对各成分进行定性分析.

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 软件对数据进行处理及作图,用 DPS 9.50 统计软件进行方差分析,用邓肯新复极差法进行差异显著性检验(α=0.05).

2 结果与分析

2.1 黄花蒿菌根侵染率

由表 1 可以看出,未接种 AM 真菌的黄花蒿根系无菌根侵染,接种 AM 真菌的根系均受到侵染,其中摩西球囊霉对黄花蒿根系的侵染率比地表球囊霉的高,除第 158 天外,二者之间的差异均达到显著水平(P<0.05).

表 1 接种 AM 真菌对黄花蒿生长的影响

Table 1 Effects of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Artemisia annua*

生长天数 Growing day	处理 Treatment	菌根侵染率 Colonization rate (%)	株高 Plant height (cm)	基径 Bottom diameter (cm)	叶绿素含量 Chlorophyll content (mg · g ⁻¹)
40	对照 CK	0	60.3±3.1a	6.2±0.7a	1.59±0.02b
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	30.3±1.1b	51.3±5.9b	6.5±0.4a	1.54±0.03b
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	34.8±0.8a	61.7±4.7a	6.9±0.3a	1.77±0.05a
71	对照 CK	0	94.7±4.2b	7.7±0.6b	1.80±0.04c
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	37.1±1.0b	148.3±5.7a	10.5±0.7a	1.93±0.02b
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	46.4±0.9a	139.7±6.7a	10.5±0.2a	1.98±0.03a
102	对照 CK	0	168.0±3.0a	10.7±0.3b	1.41±0.03c
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	54.7±0.6b	174.7±7.6a	12.1±1.4ab	1.93±0.03b
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	61.0±0.8a	186.3±9.1a	13.0±0.8a	2.11±0.02a
131	对照 CK	0	182.0±5.2b	11.2±0.4b	0.84±0.02c
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	56.7±0.7b	187.0±6.1ab	12.3±1.4ab	1.47±0.03b
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	62.9±0.8a	197.7±4.9a	14.0±1.0a	1.63±0.04a
158	对照 CK	0	195.5±3.2a	11.6±0.5b	0.87±0.05b
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	53.2±0.7a	196.8±10.4a	12.7±1.8ab	1.61±0.02a
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	55.2±0.8a	210.8±9.4a	14.4±1.1a	1.67±0.03a

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 接种 AM 真菌对黄花蒿生长的影响

由表 1 可以看出,黄花蒿生长第 40 天,接种摩西球囊霉植株的株高与对照相比差异不显著,而接种地表球囊霉植株的株高显著小于接种摩西球囊霉植株和对照 ($P < 0.05$);第 71 天,为黄花蒿的拔节期,2 种接种处理的植株高度均显著高于对照;在第 102、131 和 158 天,黄花蒿的生长速度减慢,接种处理植株的株高与对照相比无显著差异. 这表明 AM 真菌在拔节期对黄花蒿的伸长生长有促进作用.

黄花蒿生长的第 40 天,接种 AM 真菌的黄花蒿基径与对照相比无显著差异;第 71、102、131 和 158 天,2 种接种处理的植株基径均比对照大,表明 AM 真菌对黄花蒿的基茎增粗有促进作用,其中,接种摩西球囊霉处理的促进作用更明显,第 71、102、131 和 158 天的基径为 10.5 ~ 14.4 mm,是对照的 1.2 ~ 1.4 倍.

2.3 接种 AM 真菌对黄花蒿叶片光合特征的影响

由表 1 可以看出,黄花蒿生长的第 40 天,接种地表球囊霉植株叶片的叶绿素含量与对照无显著差异,而接种摩西球囊霉植株叶片的叶绿素含量显著高于对照 ($P < 0.05$);第 71、102、131 和 158 天,2 种接种处理的植株叶片的叶绿素含量均显著高于对照 ($P < 0.05$),表明 2 种供试 AM 真菌均能促进黄花蒿叶绿素含量的增加,而且接种摩西球囊霉的促进作用更显著.

由图 1 可以看出,与对照相比,接种 2 种 AM 真菌均能显著提高黄花蒿叶片的净光合速率,接种摩

西球囊霉的提高了 33.2%,接种地表球囊霉的提高了 28.0%. 接种摩西球囊霉显著提高了黄花蒿叶片的蒸腾速率,是对照的 1.1 倍,接种地表球囊霉的与对照差异不显著. 接种摩西球囊霉显著提高了黄花蒿叶片的气孔导度,提高了 73.0%,接种地表球囊霉的提高了 29.5%,但差异不显著. 接种 2 种 AM 真菌均显著提高了黄花蒿叶片的胞间 CO₂ 浓度,其中接种摩西球囊霉的提高了 18.9%,接种地表球囊霉的提高了 14.3%.

2.4 接种 AM 真菌对黄花蒿生物量及 N、P、K 含量的影响

接种 AM 真菌对黄花蒿地上生物量有显著的促进作用,其中接种摩西球囊霉植株的地上生物量为 (102.23±5.05) g · 株⁻¹,接种地表球囊霉的为 (102.34±6.64) g · 株⁻¹,2 种处理之间差异不显著,但均显著高于对照 [(87.80±1.77) g · 株⁻¹].

由表 2 可以看出,接种 2 种 AM 真菌处理下黄花蒿根、茎、枝和叶中的 N、P、K 含量均显著高于对照 ($P < 0.05$),而且,整体来看,接种摩西球囊霉植株各器官的 N、P、K 含量增幅更大. 表明接种 AM 真菌能促进黄花蒿根系对土壤 N、P、K 元素的吸收,增加各营养器官中营养元素的含量,并且接种摩西球囊霉的处理效果更显著.

2.5 接种 AM 真菌对黄花蒿青蒿素含量的影响

与对照相比,接种 2 种 AM 真菌显著提高了黄花蒿茎、枝和叶中青蒿素的含量(表 3),其中,接种摩西球囊霉的植株茎、枝和叶中的青蒿素含量分别

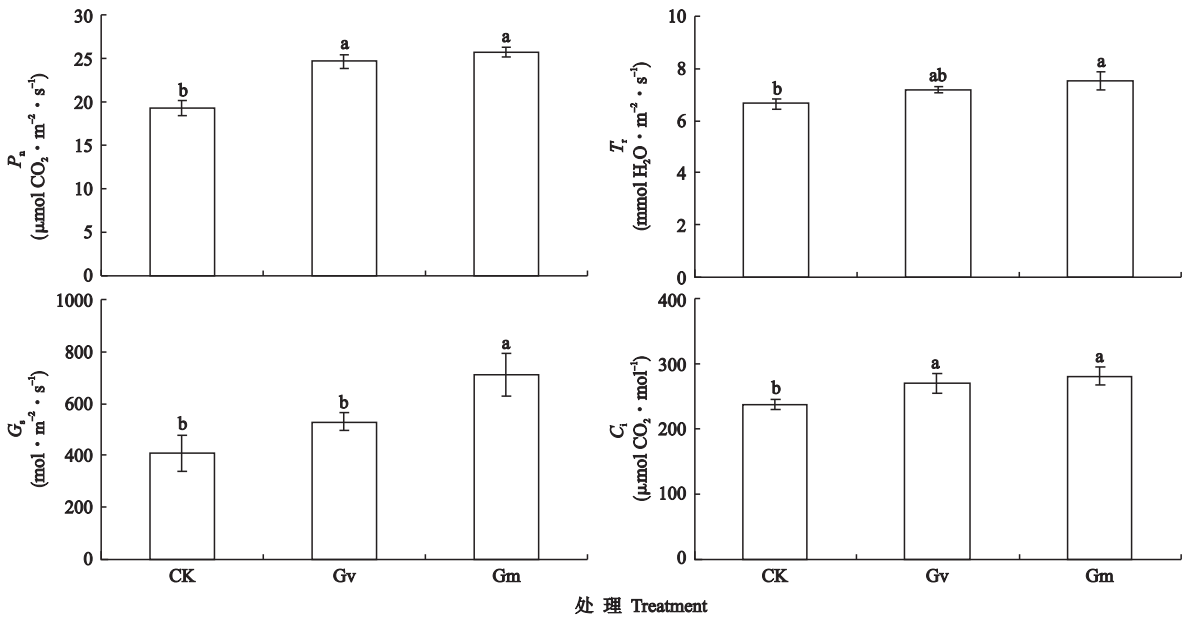


图1 不同接种处理下黄花蒿叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)
Fig. 1 Net photosynthetic rate(P_n), transpiration rate(T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular concentration of CO_2 (C_i) in the leaves of *Artemisia annua* under different treatments.

Gm; 摩西球囊霉 *G. mosseae*; Gv: 地表球囊霉 *G. versiforme*. 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表2 不同处理下黄花蒿各营养器官中 N、P、K 含量
Table 2 Contents of N, P and K in different organs of *Artemisia annua* under different treatments (%)

营养元素 Nutrient element	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	枝 Branch	叶 Leaf
N	对照 CK	0.254±0.010b	0.090±0.007b	0.092±0.012c	0.517±0.011c
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	0.373±0.009a	0.104±0.007ab	0.127±0.007b	0.610±0.009b
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	0.382±0.009a	0.119±0.008a	0.173±0.016a	0.672±0.025a
P	对照 CK	0.027±0.001b	0.017±0.004b	0.021±0.002b	0.026±0.002b
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	0.044±0.002a	0.027±0.002a	0.030±0.002a	0.031±0.003a
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	0.045±0.002a	0.027±0.001a	0.032±0.003a	0.033±0.002a
K	对照 CK	0.186±0.017b	0.109±0.015b	0.205±0.020b	0.426±0.011b
	地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	0.248±0.025a	0.189±0.020a	0.278±0.006a	0.458±0.011a
	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	0.265±0.010a	0.166±0.010a	0.274±0.010a	0.455±0.015a

增加了 32.8%、15.2% 和 19.6%，接种地表球囊霉的分别增加了 26.5%、10.1% 和 14.9%，而且，接种摩西球囊霉的植株叶中青蒿素含量显著大于接种地表球囊霉 ($P < 0.05$)。

表3 不同处理下黄花蒿各营养器官中青蒿素的含量
Table 3 Content of artemisinin in different organs of *Artemisia annua* under different treatments ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

处理 Treatment	叶 Leaf	枝 Branch	茎 Stem
对照 CK	3.81±0.20c	1.98±0.06b	1.48±0.09b
地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	4.82±0.16b	2.18±0.05a	1.70±0.07a
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	5.06±0.05a	2.28±0.12a	1.77±0.07a

2.6 接种 AM 真菌对黄花蒿挥发油含量及组成成分的影响

由表4可以看出，接种AM真菌显著提高了黄

表4 不同处理下黄花蒿的挥发油含量
Table 4 Content of volatile oil in *Artemisia annua* under different treatments

处理 Treatment	鲜质量 Fresh mass (g)	挥发油体积 Volume of volatile oil (mL)	挥发油含量 Content of volatile oil (%)
对照 CK	80.17	0.16±0.04b	0.20±0.02b
地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	80.08	0.23±0.02a	0.25±0.02a
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	80.13	0.24±0.02a	0.29±0.02a

花蒿挥发油的含量 ($P < 0.05$), 其中, 接种摩西球囊霉的植株中挥发油含量比对照提高了 45.0%, 接种地表球囊霉的提高了 25.0%, 但 2 个处理间差异不显著。

无论是否进行接种处理, 黄花蒿挥发油中相对含量最大的 3 个化合物均为丁香烯、大牻牛儿烯 D 和 1,3-Bis-(2-cyclopropyl,2-methylcyclopropyl)-but-2-en-1-one。接种后挥发油成分发生改变, 在对照植株的挥发油中分离出化合物 42 种, 接种摩西球囊霉的植株中分离出 54 种, 其中 19 种是对照中没有或与对照不同, 接种地表球囊霉的植株中分离出 43 种, 其中 20 种是对照中没有或与对照不同 (图 2)。

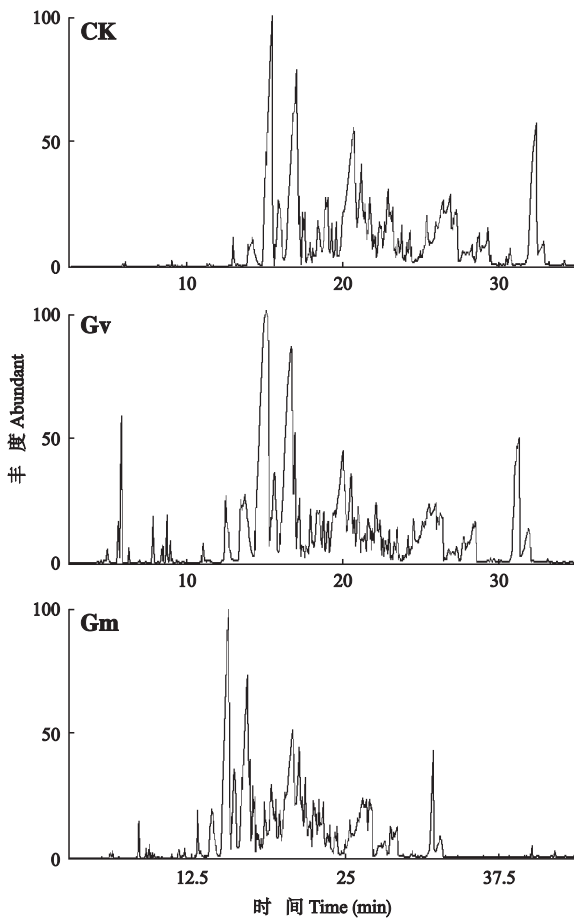


图 2 不同处理下黄花蒿挥发油的总离子流色谱图

Fig. 2 Total ion chromatogram of the volatile oil from *Artemisia annua* under different treatments.

3 讨 论

AM 真菌与植物共生后可增加植物叶片的叶绿素含量, 增强植物光合作用, 从而促进植物的生长发育^[22]。例如, Cooper 等^[23]发现 AM 真菌可使大豆的 CO₂ 固定速率增加 47%, 与豆科植物的根瘤菌相

比, AM 真菌需要植物供给的碳水化合物相对较少, 从而有利于植物干物质的积累。本研究中, AM 真菌增加了黄花蒿叶片中的叶绿素含量, 提高其光合效率, 促进地上生物量积累。也有研究认为, 改善植物的矿质营养状况是 AM 真菌促进植物生长的原因^[24-29], 特别是磷元素营养状况得到改善^[30-31]。植物通过菌根的外延菌丝分布到根周营养缺乏区之外, 增加营养物质的吸收^[32]。本研究中, AM 真菌促进了黄花蒿根系对矿质营养的吸收, 增加了根、茎、枝和叶各器官中 N、P、K 营养元素的含量 (表 2)。

黄花蒿的青蒿素含量受产地、品种、生长阶段及光照强度、土壤等环境因素的影响^[33-35]。本研究发现, 丛枝菌根的侵染明显影响黄花蒿的青蒿素代谢, 接种摩西球囊霉和地表球囊霉的黄花蒿青蒿素含量均显著高于对照 (表 3), 说明内共生真菌也是影响黄花蒿青蒿素含量的重要因素之一。关于其具体的作用机理有待进一步研究。

挥发油也是黄花蒿的主要次生化合物和药效成分, 不同地区生长的黄花蒿的挥发油成分有较大差异^[36-40], 但造成差异的原因尚不清楚。本研究表明, 同一种质在相同培养条件下, 接种 AM 真菌的黄花蒿挥发油成分与不接种之间有较大差异。可以推测, 有无丛枝菌根形成、共生 AM 真菌的种类及菌根侵染率的高低, 可能均是不同地区黄花蒿挥发油成分有较大差异的原因。

要揭示 AM 真菌提高黄花蒿的青蒿素和挥发油含量、改变挥发油组成成分的机制, 还需要从与黄花蒿自然共生的 AM 真菌种类、AM 真菌对药效成分生物合成途径关键酶的影响及药效成分在植物体内积累分布规律等方面进行系统研究。

参考文献

- [1] Liu R-J (刘润进), Li X-L (李晓林). Arbuscular Mycorrhiza and Application. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [2] Huang J-H (黄京华), Zeng R-S (曾任森), Luo S-M (骆世明). Arbuscular mycorrhizal fungi: A biofertilizer of the future. *Ecological Science* (生态科学), 2002, **21**(3): 259-263 (in Chinese)
- [3] Morandi D. Occurrence of phytoalexins and phenolic compounds in endomycorrhizal interactions, and their potential role in biological control. *Plant and Soil*, 1996, **185**: 241-251
- [4] Vierheilig H, Bago B, Albrecht C, et al. Flavonoids and arbuscular-mycorrhizal fungi// Manthey J, Buslig

- B, eds. *Flavonoids in the Living System*. New York: Plenum Press, 1998
- [5] Zhao X (赵昕), Yan X-F (阎秀峰). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant secondary metabolism. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(3): 514–521 (in Chinese)
- [6] Gao A-X (高爱霞), He X-L (贺学礼). Ecological study on AM fungi around roots of medicinal plants in the middle area of Hebei Province. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, **25**(3): 196–202 (in Chinese)
- [7] Cheng L-T (程俐陶), Guo Q-S (郭巧生), Liu Z-Y (刘作易). Infection pattern and dynamic change of arbuscular mycorrhizal fungi in *Pinellia ternate*. *Guizhou Agricultural Sciences* (贵州农业科学), 2009, **37**(2): 37–39 (in Chinese)
- [8] Cai B-Y (蔡柏岩), Ge J-P (葛菁萍), Jie W-G (接伟光), et al. The community composition of the arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Phellodendron amurense*. *Mycosystema* (菌物学报), 2009, **28**(4): 512–520 (in Chinese)
- [9] Ren J-H (任嘉红), Liu R-X (刘瑞祥), Li Y-L (李云玲). Study on arbuscular mycorrhizae of *Panax notoginseng*. *Microbiology China* (微生物学通报), 2007, **34**(2): 224–227 (in Chinese)
- [10] Shi L (石蕾), He X-L (贺学礼). Effects of AM fungi on growth and the physiological characters of *Asragalus mongholicus* under different P-applied levels. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2007, **16**(1): 46–50 (in Chinese)
- [11] Lu Y-Q (卢彦琦), He X-L (贺学礼). Effects of AM fungi on the chemical composition and growth amount of *Atractylodes macrocephala* Koidz seedling on different N levels. *Journal of Hebei University* (Natural Science) (河北大学学报·自然科学版), 2005, **25**(6): 650–653 (in Chinese)
- [12] Tan J-F (谭钜发), Huang J-H (黄京华), Fu R (扶蓉), et al. Effects of AM fungi on the growth of four kind of medicinal plant. *Journal of Chinese Medicinal Materials* (中药材), 2009, **32**(6): 843–845 (in Chinese)
- [13] Li F (李锋), Wei X (韦霄), Xu C-Q (许成琼), et al. The investigation on the forms of *Artemisia annua* L. in Guangxi. *Guihaia* (广西植物), 1997, **17**(3): 231–234 (in Chinese)
- [14] Kong J-Q (孔建强), Wang W (王伟), Zhu P (朱平), et al. Progress in biosynthesis study of artemisinin. *Chinese Pharmaceutical Journal* (中国药学杂志), 2008, **43**(11): 804–808 (in Chinese)
- [15] Chen Z-Y (陈宗游), Jiang Y-S (蒋运生), Wei X (韦霄), et al. Growth and biomass allocation of *Artemisia annua* from different seed sources. *Guihaia* (广西植物), 2008, **28**(4): 544–548 (in Chinese)
- [16] Zhong G-Y (钟国跃), Zhou H-R (周华蓉), Ling Y (凌云), et al. Investigation on ecological environment and quantitative analysis artemisinin of sweet wormwood (*Artemisia annua*). *Chinese Traditional and Herbal Drugs* (中草药), 1998, **29**(4): 264–267 (in Chinese)
- [17] Zhou Y-P (周英平), Zhao M (赵敏), Zhou Z-Q (周志强). State of the study on *Artemisia annua* resources. *Territory & Natural Resources Study* (国土与自然资源研究), 2006(3): 93–94 (in Chinese)
- [18] Cao Y-L (曹有龙), Chen X-B (陈晓斌), Wang X-K (王新坤), et al. Plant yield and artemisinin content of *Artemisia annua* from cultivation. *Journal of Chinese Medicinal Materials* (中药材), 1996, **19**(8): 379–381 (in Chinese)
- [19] Liu R-J (刘润进), Chen Y-L (陈应龙). *Mycorrhizology*. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [20] Zhou N (周浓), Duan Y-M (段意梅), Chen Q (陈强). Improvement of assay method on artemisinin and quality evaluation on *Artemisia annua*. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research* (时珍国医国药), 2008, **19**(4): 911–912 (in Chinese)
- [21] Chinese Pharmacopoeia Commission (国家药典委员会). *Chinese Pharmacopoeia (Division One)*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 340–341 (in Chinese)
- [22] He X-L (贺学礼), Li S-X (李生秀). Effect of VA mycorrhizal fungi on the growth and drought resistance of maize. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis* (西北农业大学学报), 1999, **27**(6): 49–53 (in Chinese)
- [23] Cooper KM, Grandison GS. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on infection of tamarillo (*Cyphomandra betacea*) by *Meloidogyne incognita* in fumigated soil. *Plant Disease*, 1987, **71**: 1101–1106
- [24] Black R. The role of mycorrhizal symbiosis in the nutrition of tropical plant// Mikola P, ed. *Tropical Mycorrhizae Research*. Oxford: Clarendon Press, 1980: 191–202
- [25] Liu R-J (刘润进), Luo X-S (罗新书). Effects of VA mycorrhizae on the growth mineral nutrition and water relations of cherry (*Cerasus pseudocerasus* G. Don). *Journal of Laiyang Agricultural College* (莱阳农学院学报), 1988, **5**(2): 6–13 (in Chinese)
- [26] Guo X-Z (郭秀珍), Bi G-C (毕国昌). *The Applied Technology of Forest Mycorrhiza*. Beijing: China Forestry Press, 1989 (in Chinese)
- [27] Linderman RG. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and

- soil microbial interactions// Bethlenfalvai GJ, Linderman RG, eds. Mycorrhizal in Sustainable Agriculture. Wisconsin; ASA Special Publication, 1992: 45-70
- [28] An ZQ, Shen T, Wang HG. Mycorrhizal fungi in relation to growth and mineral nutrition of apple seedlings. *Scientia Horticulturae*, 1993, **54**: 275-285
- [29] Zhang F-S (张福锁). Environment Stress and Plant Rhizosphere Nutrition. Beijing: China Agriculture Press, 1998 (in Chinese)
- [30] Li X-L (李晓林), Zhou W-L (周文龙), Cao Y-P (曹一平), et al. The role of VA-mycorrhizal hyphae in phosphorus uptake of red clover from phosphorus sources of different solubilities. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis* (北京农业大学学报), 1995, **21**(3): 305-311 (in Chinese)
- [31] Song Y-C (宋勇春), Li X-L (李晓林), Feng G (冯固). Effect of VAM fungi on phosphatase activity in maize rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 593-596 (in Chinese)
- [32] Gong M-Q (弓明钦), Chen Y-L (陈应龙), Zhong C-L (仲崇禄). Mycorrhiza Research and Its Applications. Beijing: China Forestry Press, 1997 (in Chinese)
- [33] Wei S-G (韦树根), Ma X-J (马小军), Fu J-E (付金娥), et al. Effect of different areas, types, harvest methods on artemisinin content of *Artemisia annua*. *Guihaia* (广西植物), 2009, **29**(6): 853-856 (in Chinese)
- [34] Wei X (韦霄), Li F (李锋), Xu C-Q (许成琼), et al. The effect of different cultivation measures on yield and artemisinin content of *Artemisia annua* L. *Journal of Guangxi Academy of Sciences* (广西科学院学报), 1999, **15**(3): 132-136 (in Chinese)
- [35] Wang M-L (王满莲), Wei X (韦霄), Jiang Y-S (蒋运生), et al. Effect of different soil conditions on the growth and artemisinin content of *Artemisia annua* L. seedlings. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2010, **30**(4): 424-427 (in Chinese)
- [36] Liu Q (刘群), Yang Z-Y (杨智蕴), Deng Z-B (邓治邦), et al. Preliminary analysis on chemical constituents of essential oil from inflorescence of *Artemisia annua* L. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1988, **30**(2): 223-225 (in Chinese)
- [37] Liu L-D (刘立鼎), Gu J-W (顾静文), Chen J-D (陈京达), et al. Chemical composition of the essential oils of *Artemisia annua* L. and *Artemisia apiacea* H. *Jiangxi Science* (江西科学), 1996, **14**(4): 234-238 (in Chinese)
- [38] Lan R-F (兰瑞芳). Studies on the chemical constituents of essential oil of *Artemisia annua* L. *Strait Pharmaceutical Journal* (海峡药理学), 2004, **16**(2): 73-75 (in Chinese)
- [39] Zhang Y (张燕), Zhang J (张继), Yao J (姚健), et al. Studies on the chemical constituents of the essential oil of *Artemisia annua* L. in Xinjiang. *Journal of Northwest Normal University* (Natural Science) (西北师范大学学报·自然科学版), 2004, **40**(1): 67-69 (in Chinese)
- [40] Liao H-W (廖华卫), Wang D-Y (王定勇), Li X-M (李晓蒙). Studies on the chemical constituents of essential oil of Hunan *Artemisia annua*. *Journal of Chinese Medicinal Materials* (中药材), 2006, **29**(6): 562-564 (in Chinese)

作者简介 黄京华,女,1962年生,博士,教授.主要从事植物丛枝菌根和植物化感作用研究,发表论文34篇. E-mail: hjhscau@163.com

责任编辑 孙菊
