

傅家边丘陵山地滨梅根围 AM 真菌与土壤酶活性的关系

宰学明^{1,2*}, 郝振萍¹, 张焕仕², 钦佩², 罗凤霞¹

(1. 金陵科技学院园艺学院, 南京 210038; 2. 南京大学盐生植物实验室, 南京 210093)

摘要: 为揭示 AM 真菌对宿主滨梅 (*Prunus maritima*) 的作用特点及对根部土壤酶活性的影响, 于 2009 年 4 月、7 月和 10 月分别从江苏傅家边丘陵山地滨梅根围分 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 5 个土层采集土壤样品, 观察滨梅 AM 菌根结构, 测定了 AM 真菌侵染率、孢子密度、土壤磷酸酶、脲酶活性及有效磷、碱解氮含量, 着重分析了 AM 真菌与土壤酶活性之间的关系。结果表明, 滨梅能与 AM 真菌形成良好的共生关系, 共生体为泡囊-丛枝结构; AM 真菌侵染率和孢子密度分别在 7 月份和 10 月份最高, 均出现在 0~20 cm 土层, 并随土层加深而下降; AM 真菌侵染率与土壤酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱磷酸酶活性显著正相关, 而与脲酶活性无相关性; AM 真菌孢子密度与碱性磷酸酶、脲酶活性呈极显著正相关关系; 孢子密度与土壤有效磷、土壤碱解氮含量显著正相关, 但 AM 真菌侵染率仅与土壤有效磷含量显著正相关; 孢子密度与菌根侵染率之间无相关性。可见, 滨梅 AM 真菌侵染率与孢子密度有明显的时空分布并与土壤因子尤其是某些土壤酶活性密切相关, 且 AM 菌根的形成是滨梅适应丘陵山地干旱贫瘠环境的有效对策之一。

关键词: 滨梅; AM 真菌; 土壤酶; 时空分布

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2013)02-0107-07

Relationship between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Soil Enzyme Activities of Beach Plum in Fujiabian Hilly Area

ZAI Xue-Ming^{1,2*}, HAO Zhen-Ping¹, ZHANG Huan-Shi², QIN Pei², LUO Feng-Xia¹

(1. Department of Horticulture, Jinling Institute of Technology, Nanjing 21003, China;

2. Halophyte Research Lab of Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: To reveal the functions of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi to beach plum and soil enzyme activities, we collected five samples with the rhizosphere of beach plum for each soil layer (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm and 40–50 cm) from the Fujiabian hilly area in April, July and October 2009, respectively. We observed the AM mycorrhizal structure, determined the AM fungi infection rate, spore density, activities of phosphatase and urease, and the contents of available P and N in the soil, and analysed the relationship between AM fungi and soil enzymes. Results showed that AM fungi established a good symbiotic relationship with beach plum roots, and the symbioses were of vesicle-arbuscular structure. The 0–20 cm soil layer had the highest rate of AM infection and spore density in July and October, respectively, which decreased with the increase in soil depth. The AM fungi infection rate showed significant positive correlation with the activities of acid phosphatase, neutral phosphatase and alkaline phosphatase, but no correlation with urease in soil. The AM fungi spore density demonstrated significant positive correlation with alkaline phosphatase and urease in soil. There was a significant positive correlation between spore density and available P (or N), but no correlation between AM fungi infection rate and available N. Spore density showed no correlation with AM fungi infection rate. The AM fungi infection rate and

收稿日期: 2012-06-20, 修回日期: 2012-10-25。

基金项目: 林业公益性行业科研专项(200904001); 江苏省 2011 年高校科研成果产业化推进项目(7); 江苏省教育科学“十二五”规划课题(D/2011/03/053); 金陵科技学院博士启动基金(jit-b-200807); 金陵科技学院教改项目(2012JGXM-01-7)。

作者简介: 宰学明(1968 –), 男, 博士, 副教授, 主要从事植物生理生态学研究。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: zaixueming680825@yahoo.com.cn)。

spore density had obvious spatial and temporal distribution, and were related closely to the activity of soil enzymes. With AM mycorrhiza, beach plum could grow well on poor hilly mountains.

Key words: Beach plum (*Prunus maritima*); AM fungi; Soil enzymes; Spatio-temporal distribution

滨梅(*Prunus maritima*)是蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus*)的一种沙生灌木果树,又名海滨李、沙李,原产于美国东北部大西洋沿岸。滨梅具有耐干旱、耐贫瘠、耐盐碱等特性,其花大而密、灌木状和多分枝等特性,可用于园林观赏绿化^[1];另外果实酸甜可口,可加工成果冻、果汁等一系列果品^[1]。滨梅从美国引进后,国内相关单位陆续对其展开了繁殖、抗性生理等方面研究,以期用于我国贫瘠、干旱及盐碱地区生态修复,并为发展适合该地区的果树业提供科学依据。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一类广泛分布于土壤中的有益微生物,能与80%以上陆地植物建立共生关系,形成丛枝菌根^[2]。研究表明,AM真菌能提高宿主植物磷素摄入量,调节宿主体内代谢活动,提高植物抗逆性和成活率,促进宿主植物健康成长^[3,4]。特别是AM真菌在植物根际形成的庞大菌丝网络系统,能提高土壤团聚体的稳定性,改善土壤理化性质,在生态系统保护、植被恢复和重建中发挥重要作用^[5,6]。土壤中所进行的一切生物学和化学过程都要有酶的催化作用才能完成,作为土壤重要组成部分,土壤酶活性一直是国内外研究的热点^[7]。张焕仕等研究认为,接种AM真菌可增强植物根际土壤磷酸酶、脲酶、蛋白酶活性,各种酶活性的增加幅度与宿主菌根侵染率显著相关^[8]。贺学礼等系统研究了漠境植物AM真菌的时空分布,认为AM真菌与土壤酶活性显著相关,AM真菌孢子密度和菌根不同结构的定殖程度可作为荒漠土壤生态系统环境状况检测的有效指标^[9,10]。贫瘠干旱的丘陵山地环境下植物AM真菌时空分布与土壤酶的关系研究相对较少,涉及引种滨梅与AM真菌共生和适应干旱贫瘠环境的生态机制至今未见报道。本试验通过对江苏溧水县傅家边地区贫瘠干旱的丘陵山地滨梅根围土壤样品采集和分析,旨在重点探索AM真菌时空分布与土壤酶活性之间的关系,为充分利用AM真菌资源促进滨梅在江苏贫瘠干旱的丘陵山地成功引种提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验样地位于江苏省溧水县傅家边丘陵山地上的滨梅基地(31°40'N, 119°10'E),基地的滨梅苗于2002年9月定植。傅家边地区日平均温度16.1℃,年均光照时间2165.5h,年均降水量1150mm,年均无霜期236d。样地0~50cm土层土壤理化性质平均值如下:有机质3.3%,盐度85μs/cm,全氮0.45%,全磷0.04%,全钾1.33%,全镁0.33%,全钙0.25%,pH6.95。

1.2 研究方法

分别于2009年4月5日、7月4日和10月6日,从引种基地随机选取4株滨梅,距离植株主根30cm以内挖土壤剖面,分0~10、10~20、20~30、30~40、40~50cm共5个土层采集土壤样品约1kg,编号装入塑料袋密封带回实验室,从每个土层取4个重复土样。部分土样自然风干,过2mm筛,用于土壤理化成份和AM真菌孢子密度测定;根样按5个土层收集,用于菌根形态学观察和AM真菌侵染率测定。

AM真菌侵染率测定:按Phillips和Hayman^[11]方法测定。随机选取50条1cm长根段,用10%KOH处理和酸性品红染色,在显微镜下观察丛枝菌根侵染程度(侵染率=AM真菌定殖根段数/检查总根段数)。

孢子密度测定:用湿筛倾注蔗糖离心法^[12]对25g风干土壤中的AM真菌孢子进行分离。在体视镜下挑取AM真菌孢子,并对孢子进行计数,将每克风干土中含孢量计为孢子密度。

AM真菌种类鉴定:根据Schenck^[13]的“VA菌根鉴定手册”及国际AM真菌保藏中心(INVAM)的最新分类描述及图片(<http://invam.caf.wvu.edu>),并参阅有关鉴定材料和近年来发表的新种等进行种属鉴定。

土壤碱解氮用碱解扩散法测定^[14],土壤速效磷

用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定^[14]。

土壤磷酸酶用改进的 Tabatabai & Brimner 法测定^[15],活性以每克风干土培养1 h催化 PNPP(对硝基苯磷酸二钠)分解产生对硝基苯酚的微克数(μg)表示;土壤脲酶用改进的 Hoffmann 与 Teicher 比色法^[15]测定,活性以每克风干土培养1 h催化尿素分解产生 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的微克数(μg)表示。

1.3 数据分析

数据采用 DPS 软件进行单因素方差分析,用 Duncan's 新复级差法进行平均数间的多重比较。

2 结果与分析

2.1 滨梅丛枝菌根的特征

观察结果发现,AM 真菌与滨梅根系能够形成良好共生关系,菌丝为有隔菌丝(图1:a,b)。AM 真菌侵入根系皮层细胞后,形成的泡囊多为圆形和椭圆形(图1:a),菌丝在细胞内连续二叉式分支生长,形成典型的花椰菜状丛枝结构(图1:b)。

2.2 AM 真菌种类

本试验共分离出4属6种AM真菌(图2),即近明球囊霉(*Glomus claroideum* Schenck & Smith)、悬钩子状球囊霉(*Glomus rubiforme* (Gerde. & Trappe) Almeida & Schenck)、摩西球囊霉(*Glomus mosseae* (Nicol. & Gerd.) Gerdemann & Trappe)、透明盾巨孢囊霉(*Scutellospora pellucida* (Nicolson & Schenck) Walker & Sanders)、细凹无梗囊霉(*Acaulospora scrobiculata* Trappe)、隐类球囊霉(*Paraglomus occultum* (Walker) Morton & Redecker)。6种AM真菌在不同季节、不同土层均有分布。

2.3 AM 真菌的时空分布

AM 真菌孢子密度在10月份最高,平均为37.77个/100 g土。4月和7月孢子密度在0~10 cm土层显著高于10~50 cm各土层,0~30 cm各土层孢子密度随土壤深度增加显著递减(表1)。10月份孢子密度在0~40 cm土层之间差异显著,0~40 cm土层显著高于40~50 cm(表1)。AM 真菌侵染率受采样时间和土层深度影响,7月份菌根侵染率显著高于4月和10月份,最大侵染率出现在10~20 cm土层,之后菌根侵染率随土层加深而下降(表1)。

2.4 土壤酶活性、有效磷及碱解氮含量的时空分布

由表1可知,剖面中性磷酸酶活性明显高于酸性、碱性磷酸酶活性,这与试验地黄棕壤 pH 值呈中性有关。3种磷酸酶活性10月份最高,4月和7月的酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性有显著差异。磷酸酶活性分布层次性较明显,0~20 cm土层磷酸酶活性最高,20~30 cm显著下降,30~50 cm又趋于稳定(表1)。

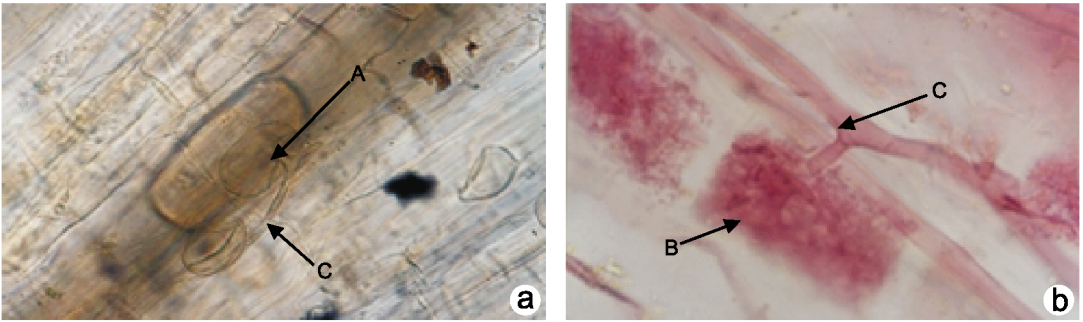
土壤脲酶活性随时间变化呈现复杂变化,0~30 cm土层脲酶活性10月份最高,40~50 cm7月份最高,各土层脲酶活性4月份最低(表1)。土壤脲酶活性随土层深度增加而减小,0~20 cm土层脲酶活性显著高于20~50 cm土层,最大值出现在0~10 cm土层,为 $14.75 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (表1)。

有效磷含量随月份和土壤深度不同而上下波动,0~10 cm土层有效磷含量随月份增加显著下降,10~20 cm土层有效磷含量随月份增加显著上升,20~50 cm各土层有效磷含量随月份增加先降后升(表1)。10月份10~20 cm土层有效磷含量显著高于其它土层,10~20 cm土层和0~10 cm、20~50 cm土层差异显著(表1)。4月份土壤有效磷含量随土壤深度增加而下降,最大含量出现在10~20 cm土层;7月份土壤有效磷含量随土壤深度先升后降,最大含量出现在10~20 cm土层(表1)。

土壤碱解氮随月份增加而下降,4月份显著高于7月和10月,而7月与10月无显著差异(表1);随土层加深先降后升,最大值 $9.41 \mu\text{g/g}$ 出现在5月40~50 cm土层,0~10 cm和40~50 cm土层显著高于10~40 cm土层(表1)。

2.5 AM 真菌与土壤酶活性及碱解氮、有效磷含量的相关性

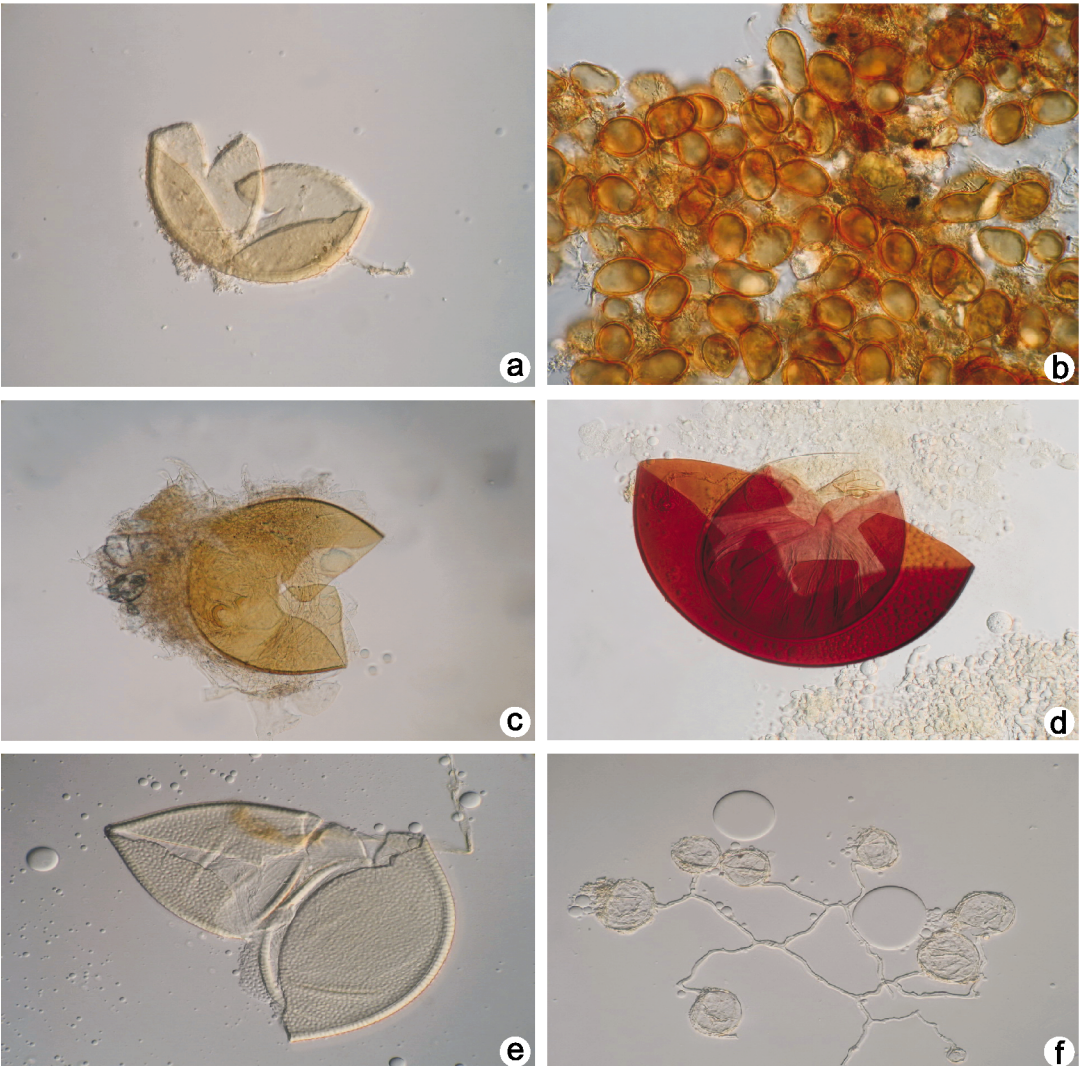
由表2可知,本试验样地中土壤酸性磷酸酶、中性磷酸酶活性与AM真菌侵染率、孢子密度显著正相关,而碱性磷酸酶、脲酶活性与孢子密度呈极显著正相关关系;脲酶活性与菌根侵染率没有相关性;土壤有效磷含量与AM真菌侵染率、孢子密度显著正相关;土壤碱解氮含量与孢子密度呈显著正相关关系,而与菌根侵染率没有相关性;孢子密度与菌根侵染率没有相关性。



A: 泡囊; B: 花椰菜状丛枝; C: 有隔菌丝。
A: Vesicle; B: Cauliflower arbuscular; C: Septahypha.

图 1 滨梅菌根形态结构

Fig. 1 Mycorrhizal structure of beach plum



a: 近明球囊霉; b: 悬钩子状球囊霉; c: 摩西球囊霉; d: 透明盾巨孢囊霉; e: 细凹无梗囊霉; f: 隐类球囊霉。
a: *Glomus claroideum*; b: *Glomus rubiforme*; c: *Glomus mosseae*; d: *Scutellospora pellucida*; e: *Acaulospora scrobiculata*; f: *Paraglomus occultum*.

图 2 6 种 AM 真菌的孢子结构

Fig. 2 Spore structure of six species of AM fungi

表 1 滨梅根围 AM 真菌与土壤酶活性及碱解氮、有效磷含量的空间分布
Table 1 Spatial distribution of soil enzymes and available N and P in rhizosphere of beach plum

土层 Soil layer (cm)	月份 Month	酸性磷酸酶 Acid phosphatase (mg)	中性磷酸酶 Neutral phosphatase (mg)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase (mg)	脲酶 Urease ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	有效 P Available P (mg/kg)	碱解 N Available N ($\mu\text{g/g}$)	孢子密度 Spore density (N/100 g)	菌根侵染率 Mycorrhiza rate (%)
0~10	4	0.71 b	0.88 b	0.56 ab	11.21 c	1.51 a	7.21 a	51.68 b	27.20 c
	7	0.59 c	0.84 b	0.49 c	12.43 b	1.38 b	6.24 ab	32.32 c	58.90 a
	10	0.87 a	0.96 a	0.63 a	14.75 a	1.20 c	5.07 b	80.57 a	39.50 b
	均值	0.72 A	0.89 A	0.56 AB	12.80 A	1.36 B	6.18 A	54.86 A	41.86 B
10~20	4	0.78 a	0.93 b	0.65 ab	6.18 c	1.27 c	6.11 a	42.00 a	29.50 b
	7	0.71 b	0.65 c	0.53 c	7.37 b	1.46 b	4.82 b	26.52 b	61.30 ab
	10	0.83 a	1.21 a	0.72 a	13.81 a	1.75 a	3.97 b	51.37 a	70.10 a
	均值	0.78 A	0.93 A	0.64 A	9.12 B	1.49 A	4.97 B	39.96 B	55.63 A
20~30	4	0.74 a	0.81 b	0.43 a	3.63 b	1.05 c	6.57 a	21.27 a	24.50 c
	7	0.57 b	0.74 b	0.31 b	3.67 b	1.18 b	4.73 b	9.92 b	67.00 a
	10	0.69 a	0.93 a	0.46 a	5.52 a	1.70 a	4.16 b	27.40 a	56.70 b
	均值	0.67 B	0.83 B	0.40 B	4.27 C	1.29 B	5.15 B	19.53 C	49.40 AB
30~40	5	0.47 b	0.69 b	0.34 b	2.32 c	1.03 b	5.53 a	12.41 b	27.00 b
	7	0.31 c	0.52 c	0.22 c	6.89 a	1.31 a	4.37 b	4.78 c	49.00 a
	11	0.59 a	0.86 a	0.49 a	3.44 b	1.06 b	4.40 b	20.27 a	41.20 a
	均值	0.46 C	0.69 C	0.35 B	4.22 C	1.11 C	4.77B	13.49 CD	41.07 B
40~50	4	0.49 a	0.66 a	0.44 a	1.71 c	0.94 b	9.41 a	10.71 a	17.80 c
	7	0.28 c	0.54 b	0.31 b	5.14 a	1.25 a	3.97 b	2.14 b	39.20 a
	10	0.35 b	0.53 b	0.38 a	2.83 b	0.72 c	4.42 b	9.23 a	34.40 b
	均值	0.37 C	0.59 C	0.31 B	3.23 D	1.04 CD	5.70 A	8.36 D	30.60 C

注：同列数据后标不同大写字母表示不同土层不同月份均值之间差异显著($p < 0.05$)；标不同小写字母表示同一土层不同月份之间差异显著($p < 0.05$)。
Notes: Data with different capital letters in the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ between layers with average of different months, and small letters between different month of the same layer.

表 2 滨梅根围 AM 真菌与土壤酶活性及碱解氮、有效磷含量的相关性分析
Table 2 Relativity analysis between arbuscular mycorrhizal fungi and soil enzymes, available N, and available P under the canopy of beach plum

指标 Index	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	中性磷酸酶 Neutral phosphatase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	脲酶 Urease	有效磷 Available P	碱解氮 Available N	孢子密度 Spore density
孢子密度 Spore density	0.822 *	0.842 *	0.889 **	0.991 **	0.813 *	0.771 *	1
菌根侵染率 Mycorrhiza rate	0.789 *	0.839 *	0.757 *	0.360	0.866 *	-0.470	0.626

注：* 表示两者之间在 $p < 0.05$ 水平显著相关，** 表示两者之间在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。
Notes: * means significant correlation at $p < 0.05$; ** means very significant correlation at $p < 0.01$.

3 讨论

傅家边丘陵山地滨梅根围分离鉴定出 6 种 AM 真菌,其中球囊霉属 4 种,盾巨孢囊霉属和无梗囊霉属各 1 种。显示球囊霉属种类在滨梅根围土壤中占据了优势地位。在傅家边丘陵山地 3 个不同取样时期,AM 真菌平均侵染率为 45.15%,最高为 70.10%,平均孢子密度为 26.83 个/100 g 土,最高为 80.57 个/100 g 土。研究表明傅家边丘陵山地

生长的滨梅能与土著 AM 真菌形成菌根结构,而共生体的形成可能是滨梅适应丘陵山地干旱贫瘠环境的有效对策之一。
AM 真菌的时空分布可能由多种潜在机制共同影响,包括气候因子与季节动态、土壤因子、宿主植物类群、耕作制度、草食动物及上述因子综合作用等^[5,6,16]。本试验中,AM 真菌侵染率、孢子密度受土壤采样深度影响,最大侵染率和孢子密度均出现在 0~20 cm 土层,孢子密度随土层加深而显著下

降。这可能是由于土壤理化和通气特性直接影响了土壤生物的分布^[6,17]。孙向伟等^[16]、冯固等^[17]、Vierheilig等^[18]的研究表明,随着 AM 真菌侵染率降低,AM 真菌发育和产孢受到抑制,反之亦然;而贺学礼等^[9,10]的研究结果则相反。本试验中 AM 真菌侵染率与孢子密度无显著相关性,这与贺学礼等^[9,10]、Fontenla 等^[19]的研究结果一致,可能与滨梅与 AM 真菌共生体的结构发育和功能相关。4 月份傅家边丘陵山地气温较低,根系生长缓慢,孢子萌发和侵染能力低,致使菌根侵染率和孢子密度均为最低值。7 月份进入滨梅的茂盛生长期,大量产生侧生幼根,有利于 AM 真菌侵染;与此同时,大量孢子细胞萌发,使得 AM 真菌侵染率达到最大,而孢子密度则降为最小。10 月份滨梅生长进入衰退期,根系生长速率减慢,AM 真菌侵染率逐渐下降,而滨梅地上部和根系消耗营养物质的降低,使得 AM 真菌的营养供给增加,有利于 AM 真菌产生孢子,孢子密度达到最大。

土壤有机磷是土壤全磷的重要组成部分,在无机磷较低的贫瘠土壤上,有机磷的矿化成为植物吸收磷素非常重要的部分,而有机磷往往是在土壤磷酸酶的酶促作用下才能转化为植物可利用的形态^[7]。有研究表明,AM 真菌的侵染率、孢子密度与样地土壤磷酸酶的活性显著相关^[9,10,19],但也有研究显示 AM 菌根的形成对土壤磷酸酶活性无显著影响^[20]。本试验中,碱性磷酸酶的活性与孢子密度极显著正相关,酸性磷酸酶与中性磷酸酶的活性与孢子密度显著正相关,土壤有效磷含量和孢子密度显著正相关;3 种磷酸酶活性均与 AM 真菌的侵染率显著正相关。本试验显示土壤磷酸酶与 AM 真菌的空间分布密切相关,这与前人的研究结果一致^[9,10]。AM 真菌侵染率与 3 种磷酸酶的活性显著正相关,这可能是由于 AM 真菌对植物幼嫩细根的侵染,影响了宿主代谢,促使 AM 菌根分泌磷酸酶^[21]。AM 真菌孢子密度与 3 种磷酸酶的活性极显著或显著正相关,这可能与 AM 真菌孢子的形成过程有关,也可能是 AM 真菌与孢子表面黏附的溶磷细菌等微生物的交互作用所致^[22]。本试验地 3 个不同取样期平均土壤有效磷含量都低于 2 mg/kg,属典型的低磷环境,由于土壤低磷的刺激使得 AM 真菌不断地向

滨梅根围介质分泌磷酸酶,从而加速了土壤有机磷转化分解,进而被滨梅根系吸收利用。因此,贫瘠的丘陵山地滨梅根围的土著 AM 真菌改善了宿主的磷素营养。

土壤全氮量说明了土壤氮素储量水平的高低,而碱解氮一般代表植物在近期内可以利用的氮素,含量高低反映土壤供氮强度及释放速率,因此碱解氮是衡量土壤氮有效性的一个指标^[21]。AM 真菌能够帮助宿主植物吸收 NH_4^+ , AM 真菌吸收铵态氮、硝态氮、氨基酸和复杂的有机氮素后,经菌丝进一步处理,参与植物氮素代谢^[23]。土壤中脲酶活性的高低直接关系到土壤中碱解氮的转化和植物对氮素的吸收和利用,孢子形成过程中利用的无机氮主要来自脲酶对矿质氮的转化^[16,23]。本试验中土壤脲酶活性及碱解氮的含量与 AM 真菌孢子密度显著正相关,也证明了这一点。AM 真菌孢子密度与土壤碱解氮显著的相关性表明 AM 菌根在滨梅根系对氮素转化和吸收过程中扮演着十分重要的角色^[24]。本试验中脲酶活性与 AM 真菌侵染率没有相关性,这与前人研究结果不一致^[9,10,19],显示 AM 真菌时空分布与土壤因子之间的关系在不同地区的结果存在差异,这可能是由于栽培土壤条件中的其他因子(如微生物等)对 AM 真菌与植物共生也有一定的影响^[23]。

参考文献:

- [1] Whitlow T H, Uva R H. A new crop for new markets [J]. *Am Fruit Grow*, 2004, 4: 24.
- [2] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis* [M]. London: Academic Press, 1997: 453–469.
- [3] Scagel C F. Changes in cutting composition during early stages of adventitious rooting of miniature rose altered by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *J Am Soc Hort Sci*, 2004, 129(5): 624–634.
- [4] Zai X M, Qin P, Wan S W, Zhao F G, Wang G, Yan D L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the rooting and growth of beach plum (*Prunus maritima*) cuttings [J]. *J Hort Sci Biotech*, 2007, 82(6): 863–866.
- [5] 李岩, 焦惠, 徐丽娟, 赵洪海, 刘润进. AM 真菌群落结构与功能研究进展 [J]. *生态学报*, 2010, 30

- (4): 1089–1096.
- [6] Gosling P, Hodge A, Goodlass G, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2006, 113: 17–35.
- [7] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 卯丹, 车升国, 李亚星. 土壤酶的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (21): 1–7.
- [8] Zhang H S, Wu X H, Li G, Qin P. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing fungus (*Mortierella* sp.) and their effects on *Kosteletzkya virginica* growth and enzyme activities of rhizosphere and bulk soils at different salinities [J]. *Biol Fert Soils*, 2011, 47 (5): 543–554.
- [9] He X L, Zhao L L, Yang H Y. Colonization of arbuscular mycorrhizal fungi from the rhizosphere of legume species in Maowusu sandland [J]. *Prog Nat Sci*, 2006, 16 (6): 684–688.
- [10] 贺学礼, 李英鹏, 赵丽莉, 刘雪伟. 毛乌素沙地克隆植物沙鞭生长对 AM 真菌生态分布的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(3): 751–758.
- [11] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Trans Br Mycol Soc*, 1970, 55: 158–161.
- [12] Ianson D C, Allen M F. The effects of soil texture on extraction of vesicular arbuscular mycorrhizal spores from arid soils [J]. *Mycologia*, 1986, 78: 164–168.
- [13] Schenck N C, Perez Y. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi [M]. 2nd ed. Gainesville, USA: INVAM University of Florida Press, 1988: 9–178.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998: 14–193.
- [15] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 11–197.
- [16] 孙向伟, 王晓娟, 陈牧, 豆存艳, 高飞翔, 金樑. 生态环境因子对 AM 真菌孢子形成与分布的作用机制 [J]. 草业学报, 2011, 20(1): 214–221.
- [17] 冯固, 张福锁, 李晓林, 张俊伶, 盖京苹. 丛枝菌根真菌在农业生产中的作用与调控 [J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 995–1004.
- [18] Vierheilig H, Bago B, Lerat S, Piche Y. Shoot-produced light-dependent factors are partially involved in the expression of the arbuscular mycorrhizal (AM) status of AM host and non-host plants [J]. *J Plant Nutr Soil Sc*, 2002, 165: 21–25.
- [19] Fontenla S, Godoy R, Rosso P. Root associations in *Austrocedrus* forests and seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizal [J]. *Mycorrhiza*, 1998, 8: 29–33.
- [20] Joner E J, Jakobsen I. Growth and extracellular phosphors activity of AM hyphaeas influenced by soil organic matter [J]. *Soil Boil Biochem*, 1995, 27(9): 1153–1159.
- [21] 刘润进, 陈应龙. 菌根学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10–171.
- [22] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理 [M]. 北京: 华文出版社, 2001: 1–358.
- [23] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine root production in forest ecosystems [J]. *New Phytol*, 2000, 147: 131–139.
- [24] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 刘锦春, 金静, 宋会兴. 构树 (*Broussonetia papyrifera*) 幼苗氮、磷吸收对接种 AM 真菌的响应 [J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4840–4847.

(责任编辑: 王豫鄂)