

沙坡头地区沙冬青 AM 真菌的时空分布

贺学礼^{1,*}, 刘雪伟¹, 李英鹏^{1,2}

(1. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; 2. 新乡市农业局, 新乡 453003)

摘要: 2007 年 5 月、8 月和 10 月分别从宁夏沙坡头地区豆科植物沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 根围分 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 和 40—50 cm 5 个土层采集土壤样品。研究了 AM 真菌时空分布及与土壤因子的相关性, 在分离的 3 属 12 种 AM 真菌中, 球囊霉属 (*Glomus*) 6 种, 无梗囊霉属 (*Acaulospora*) 4 种, 盾巨孢囊霉属 (*Scutellospora*) 2 种, 3 属 12 种 AM 真菌在 3 个时期均有分布。AM 真菌定殖率与孢子密度有明显的时空分布规律, 并与土壤因子关系密切。孢子密度和泡囊定殖率在 8 月份最高, 丛枝、菌丝和总定殖率 10 月份最高。土壤采样深度对孢子密度和定殖率有显著影响, AM 真菌最高定殖率和最大孢子密度均出现在 0—30 cm 浅土层。孢子密度与土壤有机质、碱解 N 极显著正相关, 与 pH 显著正相关; 菌丝、总定殖率与 pH、碱解 N 和速效 P 极显著正相关。在评估荒漠生态系统和沙冬青形成菌根的能力时, AM 真菌孢子密度、菌根不同结构的定殖程度是十分有用的指标。

关键词: AM 真菌; 时空分布; 沙冬青; 宁夏沙坡头

The spatio-temporal distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus mongolicus* from Shapotou

HE Xueli^{1,*}, LIU Xuewei¹, LI Yingpeng^{1,2}

¹ College of Life Sciences, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China

² Xinxiang Municipal Bureau of Agriculture, Xinxiang 453003, China

Abstract: The study assesses the spatio-temporal distribution of AM fungi and the relationships between AM fungi and soil factors by analyzing soil samples collected at Shapotou of Ningxia. Soil samples in the rhizosphere of *Ammopiptanthus mongolicus* (Leguminosae) were divided to a depth of 50 cm into 5 sections of 10 cm each. Four replicates at each depth were taken during May, August and October 2007. Three genera and 12 species of AM fungi were isolated from the soil samples: *Gigaspora*, 6 species; *Acaulospora*, 4 species; and *Scutellospora* 2 species. All were collected in every sampling period. The greatest spore density and vesicular colonization levels were found in August, and the highest arbuscular, hyphal and total colonization levels were found in October. Soil sampling depth had a significant effect on spore density and percent colonization levels of AM fungi. The greatest colonization and spore density levels were found in the first three layers, between 0—30 cm. Spore density had a positive correlation with soil organic matter, available N and pH. Hyphal and total colonization had a positive correlation with soil pH, available N and P. The distribution and colonization of AM fungi is a useful indicator for monitoring the changes of a desert soil ecosystem and evaluating the ability of mycorrhizae to form a relationship with the host plant.

Key Words: AM fungi; spatio-temporal distribution; *Ammopiptanthus mongolicus*; Shapotou of Ningxia

AM (Arbuscular mycorrhiza) 真菌是广泛存在于自然生态系统的一类土壤真菌, 能与绝大多数维管植物形成共生体系。大量研究表明, AM 真菌对植物生长有诸多有益的生理生态效应, 并对宿主植物进化与分布、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670371, 40471637)

收稿日期: 2008-10-02; **修订日期:** 2009-03-25

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

生物多样性维持等方面具有重要作用^[1]。AM 真菌在植物根际形成庞大菌丝网络系统及其分泌的粘性物质,可将土壤微粒结合形成团粒结构,提高了土壤团聚体的稳定性,在控制水土流失、抑制沙尘暴等方面发挥着重要作用^[2]。

沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)属于豆科沙冬青属植物,是古老的第三纪残遗种和亚洲中部特有种,也是我国西北荒漠地区惟一超旱生常绿阔叶灌木树种。沙冬青不仅为研究豆科植物的系统发育、古植物区系、古地理和第三纪气候特征提供了重要依据,而且在研究亚洲中部荒漠植被的起源和形成等方面有重要科学价值。沙冬青也是干旱地区很好的固沙和绿化观赏植物,其枝叶入药,具有祛风湿、活血、止痛的功效。由于自然历史因素和现代人类活动的影响,沙冬青分布区逐渐缩小,个体数量日益减少,已成为我国三级重点保护植物^[3]。目前,国内外大多集中于对沙冬青生理特性和生态群落的研究^[2,4-5],而关于自然条件下沙冬青根围土壤 AM 真菌生态分布以及 AM 真菌与沙冬青共生关系的研究却鲜有报道。

本研究在腾格里沙漠东南缘宁夏中卫县沙坡头地区选取样地,研究了沙冬青根围 AM 真菌时空分布及与土壤因子的关系,以便为进一步利用 AM 真菌资源促进荒漠植被恢复和生态重建提供依据。

1 材料与方法

实验样地位于腾格里沙漠东南缘宁夏中卫县沙坡头地区(104°57'E,37°27'N)。该区处于沙漠和草原过渡带,属于中温带大陆性干旱气候。年均气温 9.6℃,最高气温 38.1℃,最低气温 -25.1℃,年降水量仅 180mm,蒸发量为 3064mm。土壤以风沙土为主,地表覆盖流沙,以流动、半固定沙丘为主,生态条件十分脆弱。

2007 年 5 月、8 月和 10 月分别在所选样地随机选取沙冬青植株,在距植株 0—30cm 处挖土壤剖面,按 0—10cm、10—20cm、20—30cm、30—40cm 和 40—50cm 共 5 个土层分别采集沙冬青根围土壤样品约 1kg。编号装入塑料袋密封,每个土样重复 4 次。土样在实验室过 2mm 筛后用于土壤理化性质和真菌孢子密度测定,收集的根样用于菌根形态学观察和定殖率测定。

AM 真菌定殖率按 Phillips 和 Hayman 方法测定^[6]。从每份土样中称取 25g 风干土,用湿筛倾析-蔗糖离心法^[7]分离 AM 真菌孢子,在体视显微镜下记录孢子数量,将每 100g 风干土中的含孢量计为孢子密度。AM 真菌种类鉴定根据 Schenck^[8]的“VA 菌根鉴定手册”和国际丛枝菌根真菌保藏中心(INVAM)在 Internet 上 <http://invam.caf.wvu.edu> 提供的种类描述及图片进行种属鉴定。

土壤有机质用重铬酸钾氧化法,土壤速效 P 用碳酸氢钠-钼锑抗比色法,土壤碱解 N 用碱解扩散法,土壤 pH 用电位法^[9]。

试验数据用 SPSS13.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 沙冬青丛枝菌根特征

观察结果发现,AM 真菌与沙冬青根系能够形成良好共生关系,菌丝为有隔菌丝。5 月、8 月和 10 月份的菌丝定殖率分别是 81.27%、94.19% 和 94.71%。表明在不同发育阶段,AM 真菌与沙冬青均有很高的亲和性。

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,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,沙冬青根系丛枝定殖率很低,最高值仅为 6.67%(图 1)。

2.2 AM 真菌种类

本试验共分离出 3 属 12 种 AM 真菌,即双网无梗囊霉(*Acaulospora bireticulata*)、孔窝无梗囊霉(*A. foveata*)、瑞士无梗囊霉(*A. rehmi*)、细凹面无梗囊霉(*A. scrobiculata*)、摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、地球囊霉(*G. geosporum*)、缩球囊霉(*G. constrictum*)、海得拉巴球囊霉(*G. hyderabadensis*)、近明球囊霉(*G. claroideum*)、卷曲球囊霉(*G. convolutum*)、透明盾巨孢囊霉(*Scutellospora pellucida*)和美丽盾巨孢囊霉(*S. calospora*)。12 种 AM 真菌在不同季节、不同土层均有分布。它们的主要识别特征见表 1 和图 2。

2.3 AM 真菌时空分布

AM 真菌孢子密度在 8 月份最高,平均为 2754 个/100g 土。各个月份间差异显著。5 月和 10 月份孢子密

度在 10—30cm 土层显著高于其它土层,0—10cm 和 30—40cm 土层显著高于 40—50cm 土层;8 月份在 0—20cm 和 20—50cm 土层之间孢子密度差异显著,20—40cm 土层显著高于 40—50cm 土层。

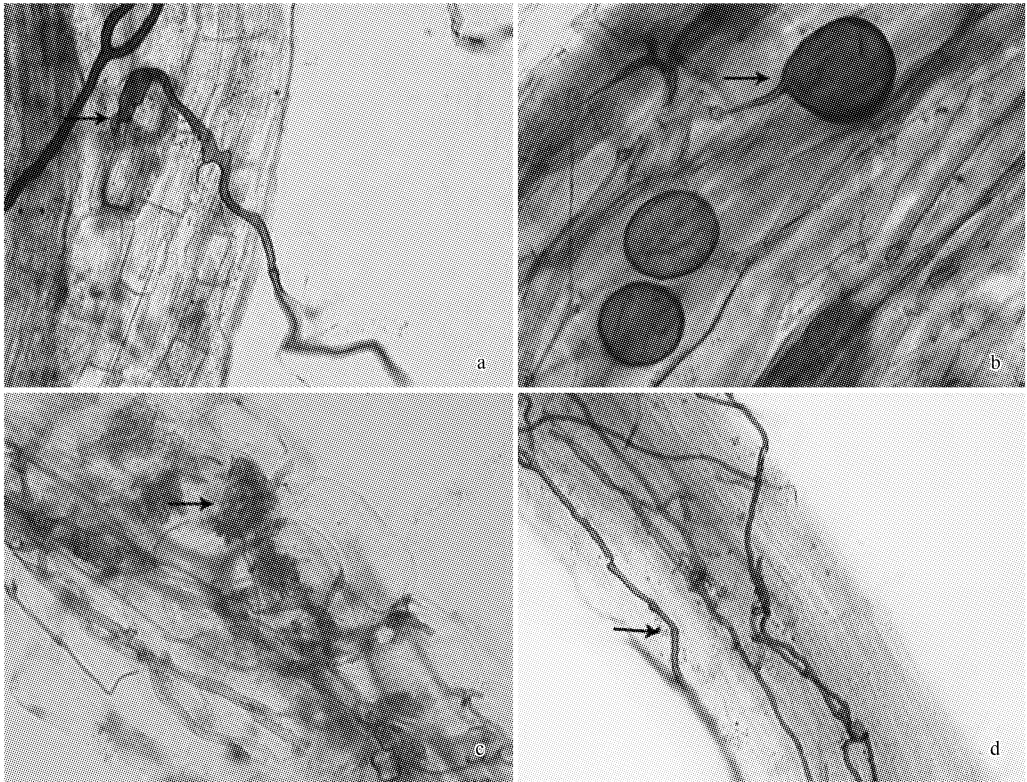


图 1 沙冬青菌根形态结构

Fig. 1 Mycorrhizal structure of *Ammopiptanthus mongolicus*

a. 外生菌丝侵入根表皮(×400);b. 孢囊(×400);c. 花椰菜状丛枝(×400);d. 根外有隔菌丝(×100)

表 1 12 种 AM 真菌主要识别特征

Table 1 The main identifying characters of 12 species of AM fungi

AM 真菌 AM fungi	孢子形状 Shape	孢子颜色 Color	孢径/ μm Diameter	孢壁 Sporoderm	孢壁纹饰 Sporoderm ornamentation	连孢菌丝形态 Subtending hypha	在 Melzer 试剂 中颜色变化 Color change in Melze	图 2 Fig. 2
<i>A. bireticulata</i>	球形或近球形	淡黄色	130—155	2 层	双层多角形网纹	—	浅棕色	a
<i>A. foveata</i>	球形或近球形	深黄棕色	210—240	2 层	圆形凹坑	—	深黄棕色	b
<i>A. rehmi</i>	球形	黄色	130—210	4 层	迷宫状	—	淡红棕色	c
<i>A. scrobiculata</i>	球形	浅黄色	120—170	4 层	密布细小凹坑	—	第 4 层孢壁染成棕色	d
<i>G. mosseae</i>	球形	浅黄色	220—395	2 层	平滑	漏斗状	土黄色	e
<i>G. geosporum</i>	球形、近球形	深红棕色	118—230	3 层	平滑	直或弯曲	深红棕色	f
<i>G. constrictum</i>	椭球形	深红棕色	105—195	1 层	平滑	连点明显缢缩	深红棕色	g
<i>G. hyderabadensis</i>	近椭球形,顶端着生球形小孢子	黄棕色	90—155	3 层	平滑	与孢子连接处略增宽	黄棕色	h
<i>G. claroidium</i>	球形	黄色	120—185	2 层	时有碎屑	直或小喇叭状	深黄色	i
<i>G. convolutum</i>	椭球形	黄色	165—193	1 层	被菌丝套包被	被菌丝套包被	棕色	j
<i>S. pellucida</i>	球形	淡黄色	183—260	5 层	平滑	球茎状	第 2、5 层孢壁被染成紫红色	k
<i>S. calospora</i>	球形	淡黄色或淡黄绿色	180—282	4 层	平滑	球茎状	第 4 层孢壁染成红色	l

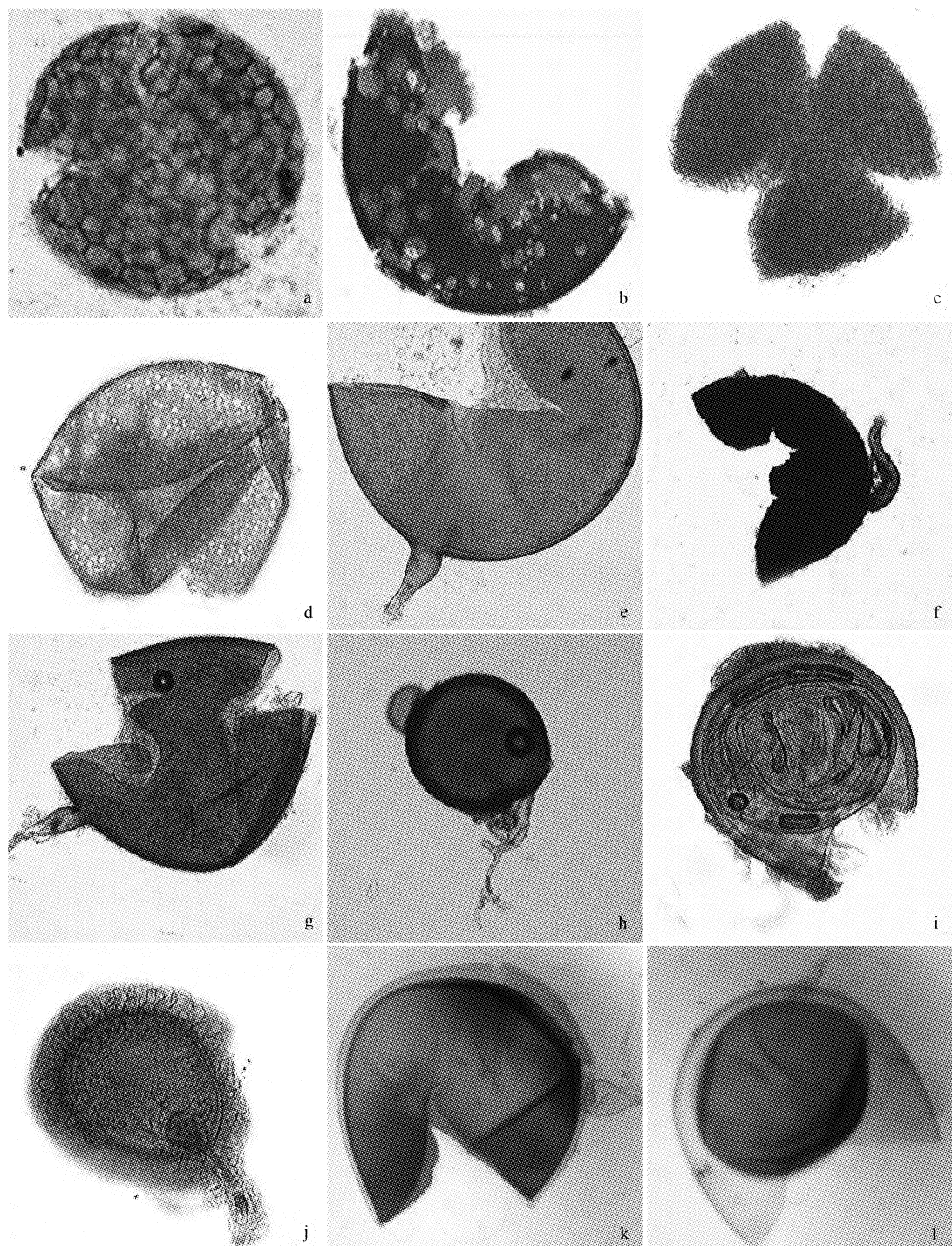


图2 12种AM真菌的孢子结构

Fig.2 Spore structure of 12 species of AM fungi

a. 双网无梗囊霉 *Acaulospora bireticulata* (×400); b. 孔窝无梗囊霉 *A. foveata* (×400); c. 瑞士无梗囊霉 *A. rehmsii* (×400); d. 细凹面无梗囊霉 *A. scrobiculata* (×400); e. 摩西球囊霉 *Glomus mosseae* (×400); f. 地球囊霉 *G. geosporum* (×400); g. 缩球囊霉 *G. constrictum* (×400); h. 海得拉巴球囊霉 *G. hyderabadensis* (×100); i. 近明球囊霉 *G. claroideum* (×400); j. 卷曲球囊霉 *G. convolutum* (×400); k. 透明盾巨孢囊霉 *Scutellospora pellucida* (×400); l. 美丽盾巨孢囊霉 *S. calospora* (×400)

8月份泡囊定殖率显著高于5月和10月份,5月和10月份之间无显著差异。5月份泡囊定殖率在10—30cm土层显著高于其它土层;8月份0—30cm土层和40—50cm土层差异显著;10月份0—30cm土层显著高于30—50cm土层。5月份和8月份最高泡囊定殖率出现在10—20cm土层,10月份则在20—30cm土层达到

最大值。

丛枝定殖率随月份增加而升高。10 月显著高于其它月份,5 月和 8 月份无显著差异。5 月份各个土层均无丛枝定殖;8 月份丛枝仅见于 20—30cm 土层,定殖率为 0.81%;10 月份丛枝普遍存在于 10—30cm 土层,最高定殖率为 6.67%。3 个时期 0—10cm 和 30—50cm 土层均无丛枝定殖。

菌丝定殖率随月份增加而升高。5 月份与其它时期差异显著;8 月份和 10 月份差异不显著。3 个时期菌丝均在 0—20cm 土层定殖率较高,并随土层加深而下降。最高定殖率出现在 8 月份的 10—20cm 土层,为 100%。总定殖率与菌丝定殖率变化规律一致(表 2)。

表 2 沙冬青根围 AM 真菌和土壤因子时空分布

Table 2 The spatio-temporal distribution of AM fungi and soil factors of *Ammopiptanthus mongolicus*

月份 Month	土层 Soil layer /cm	孢子密度 Spore density /(100g soil)	泡囊 Vesicle /%	菌丝 Hypha /%	丛枝 Arbuscule /%	总 Total /%	pH	有机质 Organic matter /(mg/g)	碱解 N Available N /(μg/g)	速效 P Available P /(μg/g)
5	0—10	508bC	20.47bC	86.65aB	0.00aA	86.65aB	7.70bC	4.44bC	6.35abC	0.91abC
	10—20	868aB	26.25aB	90.71aB	0.00aB	90.71aB	7.79abC	4.50bC	7.93aB	1.01aC
	20—30	832aB	24.68aB	77.55bB	0.00aC	77.55bB	7.83aC	7.01aB	6.44abB	0.97abB
	30—40	457bB	20.56bB	76.09bB	0.00aA	76.09bB	7.81abC	4.85bC	4.85bC	0.67bC
	40—50	257cB	20.61bA	75.33bC	0.00aA	75.33bC	7.77abC	3.87bB	5.32bB	0.95abB
8	0—10	1463aA	38.99aA	89.57bB	0.00bA	89.57bB	9.50aA	9.38aB	14.18aA	3.27aA
	10—20	1343aA	45.61aA	100aA	0.00bB	100aA	9.39abA	8.26aB	12.04aA	2.61bA
	20—30	1032bAB	36.85aA	95.23aA	0.81aB	95.23aA	9.41abA	8.19aA	11.95aA	2.17bA
	30—40	1105bA	33.43abA	93.62aA	0.00bA	93.62aA	9.19bA	7.95aA	14.28aB	2.12bA
	40—50	825cA	13.84bB	92.52aA	0.00bA	92.52aA	9.40abA	3.23bB	11.67aA	1.50bA
10	0—10	1077bB	29.67aB	97.62aA	0.00cA	97.62aA	8.64bB	11.29aA	13.16bB	2.61aB
	10—20	1295aA	25.29aB	97.59aA	6.67aA	97.59aA	8.84aB	9.38aA	10.27bA	1.37bB
	20—30	1239aA	37.12aA	95.49aA	1.96bA	95.49aA	8.77abB	7.87bA	10.17bA	0.90cB
	30—40	1101bA	9.69bC	95.77aA	0.00cA	95.77aA	8.68abB	5.92cB	17.08aA	0.99cB
	40—50	877cA	10.47bB	87.07bB	0.00cA	87.07bB	8.71abB	7.06bA	12.88bA	0.81cB

同一列数据中小写字母不同者表示相同月份不同土层在 5% 水平上差异显著,同一列数据中大写字母不同者表示同一土层不同月份在 5% 水平上差异显著

2.4 土壤因子时空分布

土壤各因子有明显的时空变化规律。土壤 pH 值在 3 个时期差异显著,且为 8 月份 > 10 月份 > 5 月份。

土壤有机质平均值在 10 月份有最大值 8.30mg/g,显著高于其它月份。5 月份有机质随土层加深先升后降,在 20—30cm 土层有最大值,显著高于其它土层;8 月份有机质在 0—10cm 土层含量最高,随土层加深而下降,0—10cm 土层显著高于 40—50cm 土层;10 月份有机质随土层变化不规律,0—20cm 土层显著高于 20—50cm 土层。

土壤碱解 N 平均值在 8 月份最大为 12.82μg/g。8 月和 10 月份显著高于 5 月份。5 月份在 10—20cm 土层有最大值,显著高于 30—50cm 土层;8 月和 10 月份均在 30—40cm 土层有最大值,8 月份各个土层差异不显著,10 月份碱解 N 在 30—40cm 土层显著高于其它土层。

土壤速效 P 平均值在 8 月份最大为 2.81μg/g,各个月份差异显著。5 月份速效 P 随土壤深度上下波动,最大值出现在 10—20cm 土层,显著高于 30—40cm 土层;8 月和 10 月份土壤速效 P 随土层加深而下降,最大值均出现在 0—10cm 土层,8 月份 0—40cm 土层显著高于 40—50cm 土层;10 月份 0—10cm 土层速效 P 含量显著高于其它土层,10—20cm 土层和 20—50cm 土层差异显著(表 2)。

2.6 AM 真菌与土壤因子的相关性

AM 真菌和土壤因子相关性分析结果表明(表 3),AM 真菌孢子密度与 pH 值显著正相关,与有机质和碱解 N 极显著正相关;菌丝定殖率和总定殖率与 pH 值、碱解 N、速效 P 极显著正相关。泡囊定殖率、丛枝定殖

率与孢子密度和土壤各因子之间均无显著相关性。

表 3 沙冬青 AM 真菌与土壤因子的相关性

Table 3 Correlation analysis between AM fungi and soil factors in the rhizosphere of *Ammopiptanthus mongolicus*

项目 Item	菌丝 Hypha	泡囊 Vesicle	丛枝 Arbuscule	总 Total	孢子密度 Spore density
pH	0.595 **	0.274	0.038	0.595 **	0.351 *
有机质 Organic matter	0.222	-0.262	-0.029	0.222	0.453 **
碱解 N Available N	0.469 **	0.014	0.029	0.469 **	0.600 **
速效 P Available P	0.407 **	0.234	-0.051	0.407 **	0.135
孢子密度 Spore density	0.118	0.028	-0.067	0.118	1

* 表示两者之间在 5% 水平上显著相关, ** 表示两者之间在 1% 水平上极显著相关

3 讨论与结论

3.1 AM 真菌时空分布

本试验共分离鉴定出 3 属 12 种 AM 真菌,其中球囊霉属 6 种,无梗囊霉属 4 种,盾巨孢囊霉属 2 种。说明球囊霉属种类在沙冬青根围土壤中占据优势地位。在沙坡头样地 3 个不同采样时期,沙冬青 AM 真菌总定殖率达 90% 左右,土壤孢子平均密度为 951.9 个/100g 土。说明沙冬青能与 AM 真菌形成良好的共生关系。

试验结果表明,AM 真菌各项定殖率有明显的时空分布规律。孢子密度与泡囊定殖率在 8 月份最高,而许多报道认为,秋季土壤中孢子密度和泡囊数量最多^[10]。这可能与孳生植物—沙冬青的生长特性以及荒漠地区特有生境有关。8 月份,沙坡头地区降水量较多,植物在这一时期生长旺盛,AM 真菌大量萌发,并进一步发育为泡囊,从而储存大量营养或以繁殖体形式帮助植物适应随后的干旱环境。这也可能是沙冬青植物适应贫瘠干旱环境的有效对策之一。

丛枝、菌丝、总定殖率随时间延长呈递增趋势,这与贺学礼^[11]等的研究结果相一致。因为新菌丝的产生伴随着老结构^[12]的存在;也可能是由于该季节气候干燥,植物体需要形成大量菌丝,在植物根系构成庞大菌丝网,在干旱季节最大限度吸收利用土壤水分和营养。也从另一方面证实了 AM 真菌能够提高植物的抗旱性^[13]。

土壤深度对 AM 真菌定殖率和孢子密度有明显影响。3 个时期 AM 真菌最大定殖率和孢子密度均出现在 0—30cm 浅土层中,这可能是由于土壤物理、化学和通气特性直接影响土壤生物的分布,而土壤真菌对低氧环境特别敏感的缘故^[14-15]。

3.2 土壤因子对 AM 真菌的影响

土壤是植物生长的重要物质基础,土壤因子直接影响着植物的生长发育,AM 真菌是宿主植物根系与土壤环境联系的通道。有关土壤因子对 AM 真菌与宿主植物形成共生体的影响,目前仍存在着不同的研究结果^[15-16]。本试验中,AM 真菌菌丝、总定殖率与土壤 pH 值极显著正相关,孢子密度与土壤 pH 值显著正相关,这与有些学者的研究结论不同^[11],这是因为 pH 值对 AM 真菌发育的促进作用是有一定范围的,pH 值过高或过低都不利于 AM 真菌生长发育^[17];也与侵染宿主植物根系的 AM 真菌种类有关^[18]。

孢子密度与土壤有机质极显著正相关;菌丝、总定殖率与碱解 N、速效 P 极显著正相关。这可能是通过作为保存菌丝的基质而在保持土著 AM 真菌侵染方面起作用。AM 真菌在土壤中具有一定的腐生生长能力,有机质在这一过程中可能起着重要作用。在一定范围内,AM 真菌数量随有机质含量升高而增加,其它养分如速效 P、碱解 N、有效 Zn、Cu 等也有相似效应^[17]。

3.3 沙冬青植物生长与 AM 真菌的相互作用

本试验中,沙冬青生长的不同时期,AM 真菌定殖率和孢子密度变化显著。5 月份土壤中 AM 真菌菌丝、丛枝、总定殖率和孢子密度最低;8 月份为沙冬青生长旺盛期,此时 AM 真菌定殖率和孢子密度显著高于 5 月份;10 月份菌丝、丛枝、总定殖率达到最大值,孢子密度也显著高于 5 月份。这些结果表明,沙冬青的生长对土壤 AM 真菌活动和分布影响很大,菌根的形成成为 AM 真菌生长发育提供了条件,使得沙冬青根围 AM 真菌

孢子迅速萌发。菌丝侵入沙冬青根细胞,形成共生关系,不仅从沙冬青植物组织中获得了自身生长发育所需的营养物质,而且有效提高了沙冬青的抗逆性和对环境营养物质的利用率^[17]。同时,沙冬青的生长直接影响着其附近土壤中 AM 真菌的生长发育和多样性,对土壤条件的改善起着重要作用。

3.4 AM 真菌应用潜力

试验结果表明,AM 真菌不同定殖结构和孢子密度与沙冬青根围土壤因子密切相关,特别是与土壤有机质、碱解 N、速效 P、pH 呈极显著正相关。因此,在评价荒漠土壤生态系统和沙冬青形成菌根能力时,AM 真菌孢子密度、菌根不同结构定殖程度是十分有用的指标^[11]。同时,由于 AM 真菌对宿主植物生长和根围土壤环境修复有诸多有益作用^[1-2],系统研究荒漠植物 AM 真菌生态分布和种质资源,筛选适合植物-菌根-土壤三者最佳组合的优势菌种,可为利用菌根生物技术进行荒漠生态系统重建和沙冬青种质资源保护提供材料和依据。

References:

- [1] Gong M Q, Chen Y L, Zhong C L. Mycorrhizal Research and Application. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997.
- [2] Huang Z Y, Wu H, Hu Z H. The structures of 30 species of psammophytes and their adaptation to the sandy desert environment in Xinjiang. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(6): 521-530.
- [3] Fu L G. China Plant Red Data Book. Beijing: Science Press, 1992.
- [4] Liu G H. Study on the endangered reasons of *Ammopiptanthus mongolicus* in the desert of Alashan. Bulletin of Botanical Research, 1998, 7(18): 341-345.
- [5] Wei Q S, Wang J H, Li C, Zhuang G H, Chen S K. A preliminary study on the distribution patterns and characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus* populations in different desert environments. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(4): 591-598.
- [6] Phillips J M, Hayman D S. 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: 158-161.
- [7] Ianson D C, Allen M F. The effects of soil texture on extraction of vesicular arbuscular mycorrhizal spores from arid soils. Mycologia, 1986, 78: 164-168.
- [8] Schenck N C, Perez Y. Manual for the Identification of VA Mycorrhizal Fungi. 2nd edition, Florida: FNVAM Gainesville, 1988: 91-97.
- [9] Lu R K. Methods for Soils Agricultural Chemical Analysis. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [10] Zhao Z W. The roles of mycorrhizal fungi in terrestrial ecosystems. Chinese Biodiversity, 1999, 7(3): 240-244.
- [11] He X L, Zhao L L, Li Y P. Effects of AM fungi on the growth and protective enzymes of cotton under NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 188-193.
- [12] He X L, Yang L, Tang H L, Zhao L L. Effects of the growth of cloning plant *Phragmites communis* on the spatio-temporal distribution of AM fungal. Progress in Natural Science, 2007, 7(17): 978-982.
- [13] He X L, Steinberger Y, Herman P. Dynamics on arbuscular mycorrhizal fungi under the canopy of desert shrubs. Journal of Northwest A & F University, 2001, 4(4): 24-28.
- [14] Siguenza C, Espejel I, Allen EB. Seasonality of mycorrhizae in coastal sand dunes of Baja California. Mycorrhiza, 1996, 6: 151-157.
- [15] He X L, Mouratov S, Steinberger Y. Spatial distribution and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi under the canopies of desert halophytes. Arid Land Research & Management, 2002, 16(2): 149-160.
- [16] Wallander H. Nitrogen nutrition and mycorrhiza development. Dev Agric Manage Ecol, 1991, 24: 340-343.
- [17] Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology. Beijing: Science Press, 2007.
- [18] Han G Y, Qi Y C, Liu C, Zhou Y Z. Effects of Temperature and pH on Mycorrhizal fungus Growth. Chinese Journal of Ecology, 1993, 12(1): 15-19.

参考文献:

- [1] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇禄. 菌根研究及应用. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [2] 黄振英, 吴鸿, 胡正海. 30 种新疆沙生植物的结构及其对沙漠环境的适应. 植物生态学报, 1997, 21(6): 521-530.
- [3] 傅立国. 中国植物红皮书. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 刘果厚. 阿拉善荒漠特有植物沙冬青濒危原因的研究. 植物研究, 1998, 7(18): 341-345.
- [5] 尉秋实, 王继和, 李昌龙, 庄光辉, 陈善科. 不同生境条件下沙冬青种群分布格局与特征的初步研究. 植物生态学报, 2005, 29(4): 591-598.
- [9] 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.
- [10] 赵之伟. 菌根真菌在陆地生态系统中的作用. 生物多样性, 1999, 7(3): 240-244.
- [11] 贺学礼, 赵丽莉, 李英鹏. NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响. 生态学报, 2005, 25(1): 188-193.
- [12] 贺学礼, 杨磊, 唐宏亮, 赵丽莉. 克隆植物芦苇生长对 AM 真菌时空分布的影响. 自然科学进展, 2007, 7(17): 978-982.
- [17] 刘润进, 陈应龙. 菌根学. 北京: 科学出版社, 2007.
- [18] 韩桂云, 齐玉臣, 刘忱, 周玉芝. 温度、pH 对菌根真菌生长影响的研究. 生态学杂志, 1993, 12(1): 15-19.