

黄土高原柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性及空间分布

贺学礼^{1,2}, 赵丽莉¹, 杨宏宇²

(1. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; 2. 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:通过对陕西安塞、绥德、横山和榆林等 4 个不同生态条件下柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) AM 真菌多样性和生态分布研究, 共分离出 4 属 11 种 AM 真菌, 其中球囊霉属 (*Glomus*) 5 种, 无梗囊霉属 (*Acaulospora*) 3 种, 巨孢囊霉属 (*Gigaspora*) 1 种和盾孢囊霉属 (*Scutellospora*) 2 种。结果表明, 缩球囊霉 (*G. constrictum*) 和摩西球囊霉 (*G. mosseae*) 是柠条锦鸡儿的优势种; 不同 AM 真菌种类出现的生境不同, 如刺无梗囊霉 (*A. spinosa*) 和美丽盾孢囊霉 (*S. calospora*) 只出现在绥德, 浅窝无梗囊霉 (*A. lacunosa*) 仅出现在横山, 而易误巨孢囊霉 (*Gi. decipiens*) 和红色盾孢囊霉 (*S. erythropha*) 仅发生在延安样地。AM 真菌定殖率及孢子密度与样地生态条件密切相关, 孢囊定殖率和孢子密度在绥德最高, 丛枝定殖率在榆林最高。采样深度对 AM 真菌定殖率和孢子密度有显著影响, 最大孢子密度发生在 10 ~ 20cm 土层; 而 AM 真菌定殖率在 0 ~ 10cm 或 20 ~ 30cm 土层有最大值。孢子密度与孢囊定殖率呈正相关, 与丛枝定殖率呈负相关。孢子密度与土壤有机质、速效 P、速效 K 和 Cl^- 含量呈负相关; 孢囊定殖率与土壤 pH 呈正相关, 而与土壤湿度、速效 K 和 Cl^- 含量呈负相关。

关键词: AM 真菌; 多样性; 空间分布; 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*; 黄土高原

文章编号: 1000-0933 (2006) 11-3835-06 **中图分类号:** Q949.32 **文献标识码:** A

Diversity and spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau

HE Xue-Li^{1,2}, ZHAO Li-Li¹, YANG Hong-Yu² (1. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China; 2. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3835 ~ 3840.

Abstract: The diversity and spatial distributions of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* were investigated in four natural environments of the Loess Plateau, such as Ansai, Suide, Hengshan and Yulin of Shaanxi province. There are 4 genera and 11 species of AM fungi were isolated from the soil samples under the *Caragana korshinskii*, 3 species of them belong to *Acaulospora*, 1 species belong to *Gigaspora*, 5 species belong to *Glomus* and 2 species belong to *Scutellospora*. The result showed that the *G. constrictum* and *G. mosseae* are dominant species; the different species of AM fungi appeared in the different ecological environments, such as *A. spinosa* and *S. calospora* only occur in Suide site, *A. lacunosa* only occurs in Hengshan site, *Gi. decipiens* and *S. erythropha* only occur in Ansai site. Different sample sites had significantly affected on spore density and the percentage of colonization of vesicle and arbuscular of AM fungi. The highest value of spore density and vesicular colonization was in Suide, and the highest arbuscular colonization was in Yulin. Soil depth had a significant effect on spore density in four sites, the highest spore density existed in the 10 ~ 20cm soil layer; the highest percentage of colonization of AM fungi occurred at the 0 ~ 10cm or 20 ~ 30cm soil layer. Spore density was positively correlated with vesicular colonization and negatively correlated with arbuscular colonization. Spore density was also negatively correlated with soil organic matter, available P, available K and Cl^- content. Vesicular colonization had a positive correlation with soil pH and a negative correlation with soil moisture, available K

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40471637); 教育部留学回国人员科研启动资助项目 (141101); 河北大学生物工程重点学科资助项目

收稿日期: 2005-11-10; **修订日期:** 2006-01-20

作者简介: 贺学礼 (1963 ~), 男, 陕西蒲城人, 博士, 教授, 主要从事生物多样性及土壤生态学研究。E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40471637); the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese, State Education Ministry (No. 141101); The key Discipline of Bio-Engineering of Hebei University

Received date: 2005-10-11; **Accepted date:** 2006-01-20

Biography: HE Xue-Li, Ph.D., Professor, mainly engaged in biodiversity and soil ecology. E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

and Cl^- content.

Key words: AM fungi; diversity; spatial distribution; *Caragana korshinskii*; Loess Plateau

丛枝菌根 (Arbuscular mycorrhiza, 简称 AM) 真菌广泛分布于土壤生态系统中, 与宿主植物形成的互惠共生体对旱生植物的定植和生长具有十分重要的意义^[1,2]。研究表明, AM 真菌生长和繁殖与土壤环境和宿主植物特性密切相关, 调查和研究 AM 真菌多样性和生态分布有助于阐明干旱地区 AM 真菌的生态作用及 AM 真菌与旱生植物互作关系^[3,4]。

柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 属豆科锦鸡儿属 (*Caragana* Fabr.) 植物, 是黄土高原主要旱生落叶灌木。多年造林实践证明, 柠条根系发达, 具有广泛适应性和强抗逆性, 是营造水土保持林、防风固沙林、薪炭林和饲料林的优良树种之一, 在西部地区植被建立和生态恢复方面有重要作用。本文选取黄土高原 4 个不同样地研究了柠条 AM 真菌多样性和空间分布, 期望获得的研究成果能够在柠条锦鸡儿 AM 真菌优良菌种筛选、黄土高原植被恢复和生态环境重建等方面发挥作用。

1 研究区域概况与研究方法

陕西北部为典型黄土高原区, 地势西北高、东南低。所选 4 样地自南向北分别为安塞县高桥乡、绥德县四十里铺、横山县横山镇和榆林青云乡, 野生植被依次呈递减趋势。4 样地大小均为 $30 \times 30 \text{m}^2$, 柠条约占样地全部植物的 40%。其中安塞样地 ($109^\circ 34' \text{E}$, $36^\circ 88' \text{N}$) 为黄绵土, 海拔 1082m, 年均气温 8.8°C , 年均降水量 500mm; 绥德样地 ($110^\circ 24' \text{E}$, $37^\circ 97' \text{N}$) 为黄绵土, 海拔 922m, 年均气温 9.7°C , 年均降水量 486mm; 横山样地 ($109^\circ 32' \text{E}$, $37^\circ 97' \text{N}$) 为绵沙土, 海拔 1070m, 年均气温 8.6°C , 年均降水量 397mm; 榆林样地 ($109^\circ 77' \text{E}$, $38^\circ 30' \text{N}$) 为风沙土, 海拔 1030m, 年均气温 8.1°C , 年均降水量 414mm。

2003 年 8 月在各样地随机选取株高约 1.5m 的柠条, 距植株 0~30cm 范围内挖土壤剖面, 按 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm 和 40~50cm 5 个土层分别采集植株根围土壤样品约 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。

土壤湿度用烘干法, 土壤有机质用重铬酸钾氧化法, 土壤 pH 用电位法, 土壤速效 N 用碱解扩散法, 土壤速效 P 用碳酸氢钠-钼锑抗比色法, 土壤速效 K 用硝酸钠浸提-四苯硼钠比浊法, 土壤 Cl^- 含量用硝酸银滴定法^[5]。

AM 真菌定殖率按 Phillips 和 Hayman 方法测定^[6]。从每份土样中称取 25g 风干土壤, 用湿筛倾析-蔗糖离心法分离 AM 真菌孢子^[7], 在体视显微镜下记录孢子数量, 将每克风干土的含孢量计为孢子密度。

AM 真菌种类鉴定根据 Scheck^[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。

试验数据用 SAS6.10 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌多样性

本试验共分离出 AM 真菌 4 属 11 种, 即浅窝无梗囊霉 (*Acaulospora lacunosa* Morton)、皱壁无梗囊霉 (*A. rugosa* Morton)、刺无梗囊霉 (*A. spinosa* Walker & Trappe)、缩球囊霉 (*Glomus constrictum* Trappe)、幼套球囊霉 (*G. etunicatum* Becker & Cerdemann)、地球囊霉 (*G. geosporum* Gerd & Trappe)、根内球囊霉 (*G. intraradices* Schenck & Smith)、摩西球囊霉 [*G. mosseae* (Nicol. & Gerd) Gerd & Trappe]、易误巨孢囊霉 (*Gigaspora decipiens* Hall & Abbott)、美丽盾巨孢囊霉 [*Scutellospora calospora* (Nicol & Gerd) Walker & Sanders]、红色盾巨孢囊霉 [*S. erythropora* (Koske & Walker) Walker & Sanders] (表 1)。

由表 1 可见, *G. constrictum*、*G. mosseae*、*G. etunicatum*、*G. geosporum* 和 *G. intraradices* 等 5 种 AM 真菌在所有样地都有分布。不同采样地, AM 真菌种类差异明显, 其中 *A. spinosa* 和 *S. calospora* 只出现在绥德样地, *A. lacunosa* 仅出现在横山样地, 而 *Gi. decipiens* 和 *S. erythropora* 仅在延安样地发现。

表 1 11 种 AM 真菌的生态分布

Table 1 The ecological distribution of 11 species of AM fungi

AM 真菌 AM fungi	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>			
	安塞 Ansai	绥德 Suidei	榆林 Yulin	横山 Hengshan
浅窝无梗囊霉 <i>A. lacunosa</i>				+
皱壁无梗囊霉 <i>A. rugosa</i>			+	+
刺无梗囊霉 <i>A. spinosa</i>		+		
缩球囊霉 <i>G. constrictum</i>	+	+	+	+
幼套球囊霉 <i>G. etunicatum</i>	+	+	+	+
地球囊霉 <i>G. geosporum</i>	+	+	+	+
根内球囊霉 <i>G. intraradices</i>	+	+	+	+
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	+	+	+	+
易误巨孢囊霉 <i>Gi. decipiens</i>	+			
美丽盾巨孢囊霉 <i>S. calospora</i>		+		
红色盾巨孢囊霉 <i>S. erythropha</i>	+			

+ 有 AM 真菌分布 Mean having AM fungal distribution

2.2 AM 真菌的空间分布

AM 真菌孢子密度在绥德最高为 161.1 个/100g 土,绥德和横山显著高于延安和榆林;4 个样地孢子密度均在 10~20cm 土层有最大值(表 2)。安塞土壤孢子密度在 0~10cm 和 10~20cm,0~10cm 和 30~40cm,10~20cm 和 20~40cm 土层之间差异显著;绥德土壤孢子密度在 10~20cm 和 30~40cm,0~30cm 和 40~50cm 土层之间差异显著;横山 10~20cm 土层的孢子密度显著高于 40~50cm 土层;榆林 10~20cm 土层的孢子密度显著高于 30~50cm 土层。

AM 真菌不同结构中,只有安塞样地的泡囊定殖率显著低于其它样地。不同土层之间,安塞泡囊、丛枝和总定殖率在 0~20cm 土层显著高于 40~50cm 土层,泡囊定殖率在 0~10cm 和 30~40cm 土层、丛枝定殖率在 0~10cm 和 20~40cm 土层之间差异显著;绥德菌丝和总定殖率在 20~30cm 土层显著高于 10~20cm 和 40~50cm 土层,总定殖率在 0~10cm 土层显著高于 40~50cm 土层;榆林菌丝和总定殖率在 0~10cm 土层显著高于 10~20cm 土层(表 2)。

2.3 土壤因子的空间分布

由表 2 可知,土壤各因子有明显的空间变化规律。土壤 pH 在榆林最大为 7.7,显著高于安塞和横山。安塞和绥德土壤 pH 在土层之间无显著差异。榆林土壤 pH 在 20~50cm 土层显著高于 0~10cm 土层。

土壤有机质在安塞最大为 13.0g/kg,各样地间均有显著差异,并在 0~10cm 土层有最大值;安塞、绥德和横山的 0~10cm 土层有机质显著高于 10~50cm 土层;榆林 0~10cm 和 30~50cm 土层有机质显著高于 10~20cm 土层。

土壤湿度和速效 N 均在安塞最大分别为 15.6 %和 11.1μg/g,显著高于绥德,绥德显著高于横山和榆林,而横山和榆林之间无显著差异。速效 N 在绥德 0~10cm 土层显著高于 10~50cm 土层,10~20cm 土层显著高于 40~50cm 土层;安塞 0~20cm 土层显著高于 30~50cm 土层;榆林 0~10cm 土层显著高于 20~30cm 土层;横山 30~50cm 土层显著高于 10~30cm 土层。而各样地土层之间的湿度无显著差异(表 2)。

土壤速效 P 和速效 K 在安塞最大分别为 3.2μg/g 和 35.5μg/g,显著高于其它样地,而其它样地之间无显著差异。延安和绥德土壤速效 P 在 0~10cm 土层显著高于 10~50cm 土层,横山土壤速效 P 在 0~10cm 土层显著高于 30~50cm 土层,而榆林土壤速效 P 在土层之间无显著差异。土壤速效 K 在榆林 0~10cm 土层显著高于 30~50cm 土层,其它样地 0~10cm 土层均显著高于 10~50cm 土层;绥德 10~20cm 土层显著高于 20~50cm 土层;横山 10~20cm 土层显著高于 30~50cm 土层(表 2)。

土壤 Cl⁻ 含量在安塞最大为 9.0g/kg,显著高于横山,横山显著高于绥德和榆林,绥德和榆林之间无显著差异。安塞土壤 Cl⁻ 含量在 0~20cm 土层显著高于 20~50cm 土层;榆林土壤 Cl⁻ 在 20~30cm 土层显著高于 30~40cm 土层(表 2)。

表2 4样地不同土层柠条锦鸡儿AM真菌和土壤因子分布

Table 2 Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* and soil factors in different soil layers of four sites

样地 Site	土层 Soil layer (cm)	泡囊 Vesicule (%)	丛枝 Arbuscule (%)	菌丝 Hypha (%)	总 Total (%)	孢子密度 Spore density (No./100g soil)	pH	湿度 Soil moisture (%)	有机质 Organic matter	速效 N Available N ($\mu\text{g/g}$)	速效 P Available P ($\mu\text{g/g}$)	速效 K Available K ($\mu\text{g/g}$)	Cl ⁻ 含量 Cl ⁻ content (g/kg)
安塞 Ansai	0~10	40.0a	21.3a	65.3a	78.0a	134.7b	7.4a	18.4a	19.0a	13.7a	8.9a	79.6a	12.0a
	10~20	37.3ab	17.3ab	66.0a	74.0a	150.7a	7.5a	16.7a	15.0b	12.9a	1.8b	30.3b	10.0a
	20~30	28.0abc	10.0bc	64.7a	69.3ab	128.0bc	7.5a	15.6a	12.0bc	10.5ab	1.8b	17.0b	8.0b
	30~40	26.7bc	11.3bc	62.7a	66.7ab	120.0c	7.5a	13.7a	10.0c	8.9b	1.7b	20.2b	8.0b
	40~50	22.0c	7.3c	55.3a	61.3b	104.0d	7.5a	13.7a	8.0c	9.5b	1.5b	30.2b	7.0b
平均值 Average		30.8b	13.5a	62.8a	69.9a	128.5b	7.4b	15.6a	13.0a	11.1a	3.2a	35.5a	9.0a
绥德 Suide	0~10	55.3a	18.7a	72.0ab	78.0ab	168.0ab	7.6a	12.4a	11.0a	5.6a	0.7a	17.9a	6.0a
	10~20	53.3a	12.0a	58.0b	68.0bc	189.3a	7.6a	10.1ab	6.0b	5.7a	0.3b	12.1b	6.0a
	20~30	59.3a	14.0a	78.0a	82.0a	169.3ab	7.6a	8.4bc	7.0b	16.1a	0.3b	8.7c	6.0a
	30~40	58.0a	12.0a	65.3ab	70.7abc	148.0bc	7.7a	7.3bc	5.0b	7.5a	0.3b	7.8c	6.0a
	40~50	52.0a	16.0a	55.3b	62.7c	130.7c	7.8a	6.7c	6.0b	4.8a	0.3b	8.2c	6.0a
平均值 Average		55.6a	14.5a	65.7a	72.3a	161.1a	7.7a	8.9b	7.0c	8.1b	0.4b	10.9b	6.0c
横山 Hengshan	0~10	44.7a	16.7a	74.0a	80.0a	158.7ab	7.6a	4.2a	7.0a	3.2ab	1.3a	17.4a	7.0a
	10~20	36.0a	14.0a	52.7a	57.3a	181.3a	7.5a	3.6a	6.0ab	2.2b	1.0ab	10.2b	7.0a
	20~30	48.0a	16.0a	64.0a	71.3a	160.0ab	7.6a	3.9a	5.0ab	2.6b	0.9ab	6.3bc	6.0a
	30~40	62.0a	15.3a	59.3a	62.7a	142.7ab	7.6a	3.7a	4.0ab	4.1a	0.4b	5.6c	7.0a
	40~50	47.3a	14.7a	58.7a	68.0a	128.0b	7.3a	4.1a	3.0b	4.1a	0.5b	5.5c	7.0a
平均值 Average		47.6a	15.3a	61.7a	69.9a	154.1a	7.5b	3.9c	5.0d	3.3c	0.8b	8.9b	7.0b
榆林 Yulin	0~10	46.0a	22.0a	75.3a	84.0a	128.0ab	7.6b	4.5a	10.0a	4.9a	0.5a	10.4a	6.0ab
	10~20	33.3a	15.3a	47.3b	55.3b	145.3a	7.7ab	4.7a	8.0b	3.9ab	0.5a	8.7ab	6.0ab
	20~30	56.0a	18.7a	70.7ab	79.3ab	130.7ab	7.7a	4.3a	9.0ab	2.1b	0.2a	7.3ab	7.0a
	30~40	55.3a	22.0a	63.3ab	74.0ab	122.7b	7.7a	4.5a	10.0a	2.3ab	0.3a	6.4b	6.0b
	40~50	50.0a	17.3a	65.3ab	78.0ab	113.3b	7.7a	3.5a	10.0a	3.9ab	0.4a	5.6b	6.0ab
平均值 Average		48.1a	19.1a	64.4a	74.1a	128.0b	7.7a	4.3c	9.0b	3.5c	0.4b	7.7b	6.0c

同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著 Different letters in the same column means 5% significant differences

2.4 AM 真菌与土壤因子的相关性

相关性分析结果表明(表3),AM 真菌孢子密度与泡囊定殖率呈显著正相关,与丛枝定殖率呈显著负相关。孢子密度与土壤速效 P 和速效 K 呈显著负相关,与土壤有机质和 Cl⁻ 含量呈极显著负相关。泡囊定殖率与土壤 pH 呈极显著正相关,与土壤速效 K 和 Cl⁻ 含量呈显著负相关,与土壤湿度呈极显著负相关。丛枝、菌丝和总定殖率与土壤因子之间均无显著相关性。

3 结论与讨论

试验结果表明,AM 真菌在黄土高原广泛分布,并以球囊霉属种类最多,无梗囊霉属次之,其它属的种类较少。球囊霉属的 *G. constrictum* 和 *G. mosseae* 分布最广,孢子数量最多,应为柠条锦鸡儿 AM 真菌的优势种,这与张美庆等人的研究结果相似^[9]。在黄土高原 4 个样地中,柠条锦鸡儿 AM 真菌总定殖率达 70% 左右,土壤孢子平均密度为 142.7 个/100g 土。说明柠条锦鸡儿能与 AM 真菌形成良好的共生关系,而丛枝菌根的形成也可能是柠条锦鸡儿适应贫瘠干旱环境的有效对策之一。

AM 真菌的空间分布和定殖与土壤因子密切相关^[10,11]。本试验结果也充分证实了这一点,如土壤 pH 与泡囊定殖率呈极显著正相关,土壤速效 K、Cl⁻ 含量和湿度与泡囊定殖率呈显著和极显著负相关;土壤速效 P、速效 K、有机质和 Cl⁻ 含量与孢子密度呈显著和极显著负相关。

不同样地和土壤深度对 AM 真菌定殖率和孢子密度有明显影响。4 个样地 AM 真菌最大定殖率发生在 0~10cm 或 20~30cm 土层,最大孢子密度均出现在 10~20cm 土层,并随土壤深度增加而减少。这是由于土壤

物理、化学和通气特性直接影响着土壤生物的分布,而土壤真菌对低氧环境特别敏感的缘故^[12]。

表 3 柠条锦鸡儿 AM 真菌与土壤因子的相关性分析

Table 3 Relativity analysis between arbuscular mycorrhizal fungi and soil factors of Caragana korshinskii										
		孢子密度 Spore density (No. /100g Soil)		pH	湿度 Soil moisture	有机质 Organic matter	速效 N Available N	速效 P Available P	速效 K Available K	Cl ⁻ 含量 Cl ⁻ content
标准差 Standard deviations		26.3		0.163	5.14	0.415	4.99	2.32	18.9	0.152
平均值 Means		142.7		7.6	8.2	0.9	6.4	1.2	15.8	0.7
泡囊 Vesicule	15.2	45.5	0.325 *	0.405 **	- 0.373 **	- 0.224	- 0.185	- 0.201	- 0.278 *	- 0.299 *
丛枝 Arbuscule	6.09	15.6	- 0.465 *	0.230	- 0.146	0.197	- 0.152	0.127	- 0.0723	0.0465
菌丝 Hypha	12.8	63.7	- 0.149	0.0549	0.0033	0.0626	0.107	- 0.0756	0.0182	- 0.0114
总 Total	12.3	71.5	- 0.199	0.125	- 0.0286	0.143	0.0329	0.0257	0.0202	0.0266
孢子密度 (No. /100g Soil)	26.3	142.7	1.000	- 0.0066	- 0.245	- 0.526 **	- 0.116	- 0.287 *	- 0.316 *	- 0.341 **

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

AM 真菌定殖率和孢子密度的空间变化可能由多种潜在机制共同影响,包括各样地生态环境的差异,宿主植物根际的生物学特性,AM 真菌的依赖性,土壤微环境变化以及其它未知的因素^[11,13]。本项研究中,样地可能通过土壤微环境的变化对 AM 真菌孢子密度和定殖产生直接影响。例如 AM 真菌泡囊定殖率和孢子密度均在安塞最低,而其他样地相对较高,这可能缘于安塞样地海拔最高和土壤相对肥沃导致了 AM 真菌泡囊定殖率和孢子密度较低^[10,11,14]。

有些研究表明,AM 真菌最高定殖率经常伴随着较大的孢子密度^[15,16],而另一些研究结果则相反^[17]。本研究结果表明,不同样地和土层中 AM 真菌定殖率并不总是与孢子密度相一致。4 个样地中安塞样地泡囊和丛枝定殖率,绥德样地泡囊和菌丝定殖率与孢子密度相一致;而横山和榆林样地的情况并不一致。5 个土层中安塞和绥德样地泡囊、菌丝和总定殖率,横山样地丛枝和菌丝定殖率,榆林样地泡囊定殖率与孢子密度在 20 ~ 50cm 土层相一致,而在 0 ~ 20cm 土层并不一致。这可能与宿主植物的生长状况,产孢特性,植物根际微环境以及土壤营养物质的有效性等有关^[11,15 ~ 17]。

相关性分析表明,孢子密度与 AM 真菌泡囊定殖率呈显著正相关,与丛枝定殖率呈显著负相关。这个结果与 AM 真菌的发育阶段密切相关。孢子作为 AM 真菌的主要繁殖体,能在土壤中存活较长时间;AM 真菌在宿主根细胞内形成的丛枝生命较短,仅几天至十多天就完全消解;而泡囊在丛枝快衰老的时候开始形成,定殖时间长,在根组织内大量存在,有时还可随受损组织进入土壤中,起繁殖体的作用来继续感染其他植物根系^[18,19]。因此,通过检测 AM 真菌孢子密度、泡囊和丛枝定殖程度,不仅可评估黄土高原生态系统中植物的发育进程和同一种植物在不同环境中与 AM 真菌形成菌根的能力,而且可检测黄土高原植物根围土壤环境状况的变化规律。

References :

[1] Allen M F. Formation of vesicular mycorrhizae in *Atriplex gardneri* (Chenopodiaceae) : Seasonal response in a cold desert. *Mycologia* , 1983 , 75 : 773 ~ 776.

[2] Dhillon S S , Zak J C. Microbial dynamics in arid ecosystem-Desertification and the potential role of mycorrhizas. *Revista Chilena de Historia Natural* , 1993 , 66 :253 ~ 270.

[3] Bethlenfalvai G J , Brown M S , Ames R S. Effects of drought on host and endophyte development in mycorrhizal soybeans in relation to water-use and

- phosphate-uptake. *Physiologia Plantarum*, 1988, 72: 565 ~ 571.
- [4] Ortega-Larrocea M P, Siebe C, Becard G *et al.* Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 149 ~ 157.
- [5] Lu R K. *Agricultural and chemical analysis method for soil*. Beijing: Chinese Science Technology Press, 1998.
- [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. *Transactions 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] Zhang M Q, Wang Y S, Zhang C. The ecological distribution characteristics of some genera and species of VAM fungi in northern China. *Acta Mycologica Sinica*, 1994, 13 (3): 166 ~ 172.
- [10] Lorgio E A, Julio R G, Peter L M. Variation in soil micro-organisms and nutrients underneath and outside the canopy of *Adesmia bedwellii* (Papilionaceae) shrubs in arid coastal Chile following drought and above average rainfall. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42: 61 ~ 70.
- [11] Xueli He, 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.
- [12] Kabir Z, Halloran I P O, Widden P, *et al.* Vertical distribution of arbuscular mycorrhizal fungi under corn (*Zea mays* L.) in no-till and conventional tillage systems. *Mycorrhiza*, 1998, 8: 53 ~ 55.
- [13] Eom A H, David C, Hartnett A, *et al.* Host plant species effects on arbuscular mycorrhizal fungal communities in tallgrass prairie. *Oecologia*, 2000, 122: 435 ~ 444.
- [14] Pan X L, Wang Y J, Zhang Y G. Study on the number of VAM fungal spore of the Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 (Sup. Sum.): 64 ~ 70.
- [15] Ebberts B C, Anderson R C, Liberta A E. Aspects of the mycorrhizal ecology of prairie dropseed *Sporobolus heterolepis* (Poaceae). *American Journal of Botany*, 1987, 74: 564 ~ 573.
- [16] Sigüenza C, Espejel I, Allen E B. Seasonality of mycorrhizae in coastal sand dunes of Baja California. *Mycorrhiza*, 1996, 6: 151 ~ 157.
- [17] Fontenla S, Godoy R, Rosso P, *et al.* Root associations in Austrocedrus forests and seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizas. *Mycorrhiza*, 1998, 8: 29 ~ 33.
- [18] Brundrett M. Mycorrhizas in natural ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1991, 21: 171 ~ 313.
- [19] Smith S E. Discoveries, discussions and directions in mycorrhizal research. In: Verma A & B Hock eds. *Mycorrhiza*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 3 ~ 24.

参考文献:

- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.
- [9] 张美庆, 王幼嫻, 张驰. 我国北方 VAM 真菌属种生态分布. *真菌学报*, 1994, 13(3): 166 ~ 172.
- [14] 潘幸来, 王永杰, 张贵云, 等. 黄土高原 VAM 真菌孢子数量的调查研究初报. *土壤学报*, 1994, 31(增刊): 64 ~ 70.