

毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)根围 AM 真菌的时空分布研究

山宝琴¹, 贺学礼^{1,2}, 赵丽莉²

(1 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100;

2 河北大学 生命科学学院, 河北 保定 071002)

[摘要] 【目的】阐明荒漠地区 AM 真菌生态作用及其与沙生植物的互作关系, 为 AM 真菌资源的合理利用及荒漠环境的恢复提供理论依据。【方法】在毛乌素沙地东北缘的中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态站设立样地, 于 2007 年 4、8 和 10 月, 采集油蒿(*Artemisia ordosica*)根围 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 土层土样, 分离其丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)真菌并测定相关土壤因子, 系统研究油蒿根围 AM 真菌的时空分布。【结果】AM 真菌在油蒿根系的总定殖率(86.9%)和丛枝定殖率(24.8%)均较高, 说明二者间有良好的共生性; 油蒿根围 AM 真菌孢子密度和定殖率随季节和土壤深度的变化而具有明显的时空性差异, 并与土壤微环境显著相关。油蒿根围 0~40 cm 土层的菌丝定殖率和孢囊定殖率均较高且无显著变化, 丛枝定殖率以 30~40 cm 土层较大。AM 真菌孢子密度、土壤养分及土壤酶活性最大值均出现在 0~20 cm 土层, 并随土壤深度增加而递减。AM 真菌孢子密度、土壤速效磷含量、速效氮含量及土壤酶活性均随时间积累而增加, 于 10 月份达到最大值。AM 真菌孢子密度与土壤速效磷含量及磷酸酶活性呈显著正相关, 丛枝定殖率与有机质含量、速效氮含量及土壤脲酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶的活性均呈显著负相关, 仅与 pH 显著正相关。【结论】AM 真菌对提高寄主植物抵御外界干扰的能力维护荒漠土壤生态系统结构的完整性和功能稳定性具有重要意义。

[关键词] 油蒿; 毛乌素沙地; AM 真菌; 时空分布

[中图分类号] Q949.32; S718.81

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)04-0184-07

Studies on spatio-temporal distribution of AMF in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* in Mu Us desert

SHAN Bao-qin¹, HE Xue-li^{1,2}, ZHAO Li-li²

(1 College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Life Science, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: 【Objective】 The study elucidated the ecological function of AM fungi and interaction between sand fixation plants and AM fungi so as to provide more information for the utilization of AM fungi and for the environmental restoration in desert regions. 【Method】 The study was carried out at Ordos Sandland Ecological Station of Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, located in the north-east of Mu Su desert. The soil samples were collected from a depth of 50 cm into 5 sections, i. e. 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 and 40—50 cm in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* in 2007. The spatio-temporal distribution and colonization of AM fungi were measured in the rhizosphere of *A. ordosica*. 【Result】 AM fungi had a relatively high total colonization and arbuscular colonization on the roots of *A. ordosica*.

* [收稿日期] 2008-06-12

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30670371;40471075)

[作者简介] 山宝琴(1970—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 讲师, 在读博士, 主要从事生物多样性和植物生态学研究。

[通信作者] 贺学礼(1963—), 男, 陕西蒲城人, 教授, 博士生导师, 主要从事生物多样性和植物生态学研究。

The colonization of hyphae and vesicles were not significantly different in 0–40 cm soil layer. The highest arbuscular colonization existed at the 30–40 cm soil layer. The maximal value of the spore density occurred at 0–20 cm soil layer, and then decreased with soil depth, the soil factors and soil enzyme activities showed the same trend as well. Spore density, soil factors and soil enzyme activities had an increasing change with sampling time, and the highest values of them appeared in October. Spore density was significantly and positively correlated with available P and with phosphatase. Arbuscular colonization was negatively correlated with organic matter contents, available N and three soil enzyme activities, but positively correlated with pH. 【Conclusion】 *A. ordosica* could establish good symbiosis with AM fungi, which was the main reason for maintaining integrity and stability of the desert ecosystem.

Key words: *Artemisia ordosica*; Mu Us desert; AM fungi; Spatio-temporal distribution

丛枝菌根 (Arbuscular Mycorrhiza, 简称 AM) 在自然界分布十分广泛, 其是高等植物根系与 AM 真菌形成的共生联合体, 并因其在宿主植物根系皮层细胞内形成“丛枝”结构而得名^[1]。大量研究表明, 丛枝菌根是严重受扰群落和生态系统演替轨道的主要调节者, 在退化生态系统恢复和重建中具有重要作用^[2]。荒漠化是 21 世纪人类所面临的最严重的环境问题之一。荒漠化的危害是多方面的, 其可以破坏土地资源, 甚至使土地丧失生产能力; 加速地表水、土壤水的蒸发, 促使土地干旱和盐碱化。我国北方农牧交错带是荒漠化最为严重的地区, 而这一地区包含了油蒿群落的主要分布区^[3]。油蒿 (*Artemisia ordosica*) 又名黑沙蒿, 隶属菊科蒿属, 由于长期适应干旱的沙地环境, 其在形态解剖结构方面表现出耐旱、耐土壤贫瘠等特性^[4-5], 现在已成为我国北方温带荒漠和草原地带沙漠化的主要标志性半灌木。油蒿优良的固沙性能和其对群落演替的促进作用, 使关于其植物生态学的研究一直倍受重视。迄今为止, 我国对荒漠地区主要植物群落丛枝菌根的形成条件、影响因素等方面的研究还比较有限^[6], 且现有的研究主要集中在豆科植物上。目前关于油蒿根围 AM 真菌分布的研究尚少见报道^[7-8], 关于其根围 AM 真菌的分布及活性随季节变换的规律, 以及与土壤酶的相关性研究尚属空白。为此, 本研究分析了油蒿根围 AM 真菌时空分布、活跃性及与土壤因子的关系, 以阐明荒漠地区 AM 真菌的生态作用及 AM 真菌与沙生植物的互作关系, 旨在为充分利用 AM 真菌资源、合理利用油蒿重建我国北方沙地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

毛乌素沙地是我国温带半干旱地区的重要沙地,

位于内蒙古、陕西、宁夏的交界地带, 是鄂尔多斯高原向黄土高原的过渡地区。以油蒿为建群种的沙生植被, 约占毛乌素沙地总面积的 30% 以上^[9]。中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态站 (以下简称研究站) 位于毛乌素沙地的东北缘, 处于一个多层次、复杂的生态地理过渡带内, 沙化是本地区生态功能脆弱的最重要原因之一。该地属沙漠性气候, 有风大、沙多、干旱低温等特点。年日照时数为 2 716~3 194 h, 年平均气温 5.3~8.7℃, 年降水量 170~350 mm, 年蒸发量 2 000~3 000 mm, 降水主要集中在 7~9 月份, 全年 8 级以上大风日数在 40 d 以上, 无霜期 130~160 d^[10]。研究站试验地位于 39°29′40″N, 110°11′22″E。海拔 1 280 m, 属灌丛沙丘, 土壤类型为沙质栗钙土, 经破坏后则退化为流动风沙土。

1.2 研究方法

于 2007 年 4、8 和 10 月, 在大小为 30 m×30 m 的固定样地各采样 1 次, 在油蒿典型群落中, 随机选取 4 株高度为 0.4~0.5 m, 冠幅直径在 0.6 m 以上的油蒿植株, 先去掉 2 cm 表层土, 在距植株 0~30 cm 处挖土壤剖面, 按 0~10, 10~20, 20~30, 30~40 和 40~50 cm 共 5 个土层分别采集土壤样品, 每个土样重复 4 次。用土壤湿度计分层测量土壤湿度, 记录采样时间、地点和根围环境等并编号, 将土样装入隔热性能良好的塑料袋密封, 带回实验室于 4℃ 冷藏。部分土样自然风干, 过 2 mm 筛, 用于测定土壤理化性质和 AM 真菌孢子密度; 同时收集根样用于测定 AM 真菌的定殖率^[11]。

1.3 测定项目及其方法

1.3.1 菌根定殖率的测定 将收集的根样切成 1 cm 的根段, 用 KOH 透明-乳酸甘油酸性品红染色法测定根组织内丛枝、泡囊、菌丝等结构的侵染发育状况^[12]。将 25 条长约 1.0 cm 的细根置于 Olym-

pus BXSO 型显微镜下观测,采用网格交叉法测定根系的菌丝定殖率,并观察丛枝和泡囊等典型菌根结构,用“+”和“-”表示样品中典型菌根结构丛枝和泡囊的存在与否,并计算各自的定殖率。

1.3.2 孢子密度的测定 用湿筛倾注-蔗糖离心法^[13],将 25 g 风干土壤中的 AM 真菌孢子分离后,在体视显微镜下挑取 AM 真菌孢子,并对孢子进行计数,将每 g 风干土中的含孢量计为孢子密度。

1.3.3 土壤理化性质的测定 用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量,用 1:1 水浸提液测定土壤 pH,用重铬酸钾容量法(外加热法)测定土壤有机质含量,用碱解扩散法测定碱解氮含量^[14]。

1.3.4 土壤酶活性的测定 用靛酚比色法测定土壤脲酶活性^[15],以每 h 每 g 土壤中 NH_4^+-N 的毫克数表示。用改进的 Tabatabai & Brimner 法测定磷酸酶^[16-17]。测定酸性磷酸酶时,用 0.1 mol/L pH 5.2 的醋酸缓冲液;测定碱性磷酸酶时,用 0.5 mol/L pH 8.5 的 NaHCO_3 作缓冲液;1 个酶活性单位(Eu)表示每 min 每 g 土水解 1 μmol pNPP(对硝基苯磷酸二钠)。

1.4 数据处理

数据经 Excel 整理后,采用 SPSS13.0 生物统计

分析软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析和 Person 法两两相关分析。

2 结果与分析

2.1 油蒿根围 AM 真菌的时空分布

由表 1 可见,油蒿根围 AM 真菌的平均总定殖率为 86.9%,其中菌丝定殖率和丛枝定殖率最大值均出现在 8 月,10 月次之,4 月最低。泡囊定殖率随季节变化表现为 8 月>4 月>10 月。丛枝定殖率随季节变化差异显著,最大月的定殖率是最低月的 2.3 倍。AM 真菌孢子密度随时间积累而增加,平均孢子密度表现为 10 月>8 月>4 月,并在各月间有显著差异($P<0.05$)。

在 0~40 cm 土层,各土层土样的菌丝定殖率和泡囊定殖率无显著差异,而在 40~50 cm 土层均有所降低;总定殖率在数值上与菌丝定殖率相同,变化规律也基本一致。对丛枝定殖率而言,油蒿根围 0~10 cm 的土层较低,最大值出现在 30~40 cm 土层,但各土层间差异不显著。孢子密度在土壤垂直剖面上随季节有所变化,4 月的最大值出现在 10~20 cm 土层,8 月和 10 月的最大值出现在 0~10 cm 土层,但均随土层深度的增加而减少(表 1)。

表 1 油蒿根围 AM 真菌和土壤因子的时空分布

Table 1 Spatio-temporal distribution of AMF and soil factors in the rhizosphere of *Artemisia ordosica*

月份 Month	土层深度 /cm Soil layer	定殖率/% Colonization rate				孢子密度/ g^{-1} Spore density	土壤湿度/% Soil moisture	土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$ Soil temperature
		总定殖率/% Total rate	菌丝 Hyphal	泡囊 Vesicular	丛枝 Arbuscular			
4	0~10	93.21±3.56 b	93.21±3.56 b	69.39±3.35 b	13.48±4.72 a	1.10±0.10 a	1.57±0.28 a	12.65±0.60 a
	10~20	95.55±2.56 b	95.55±2.56 b	60.22±7.68 b	17.90±4.62 a	2.16±1.49 a	2.37±0.25 ab	14.80±0.21 b
	20~30	94.95±2.94 b	94.95±2.94 b	48.45±1.32 ab	19.77±7.5 a	1.24±0.23 a	3.07±0.27 ab	16.10±0.12 bc
	30~40	88.89±5.19 b	88.89±5.19 b	53.33±1.23 ab	27.08±6.4 a	0.44±0.16 a	3.50±0.87 ab	16.77±0.08 c
	40~50	25.00±2.50 a	25.00±2.50 a	12.50±1.25 a	0.00±0 a	0.88±0.27 a	4.37±0.80 b	16.87±0.13 c
	平均值 Average	79.52±3.40 A	79.52±3.40 A	48.78±2.97 A	15.65±4.64 A	1.16±0.31 A	2.98±0.31 B	15.44±0.38 B
8	0~10	92.92±5.38 a	92.92±5.38 a	61.89±8.47 a	9.98±3.91 a	15.31±3.34 a	2.12±0.16 a	24.20±0.68 b
	10~20	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	61.98±7.40 a	39.69±12.30 a	13.76±6.02 a	3.02±0.08 ab	21.87±0.26 a
	20~30	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	65.35±3.91 a	36.52±9.10 a	9.92±2.28 a	2.95±0.26 ab	22.02±0.18 a
	30~40	99.00±0.96 a	99.00±0.96 a	61.22±4.30 a	48.64±4.40 a	5.02±1.03 a	4.12±0.43 b	22.22±0.31 a
	40~50	75.00±2.50 a	75.00±2.50 a	35.43±13.45 a	42.36±16.30 a	5.50±1.49 a	3.40±0.52 b	21.85±0.18 a
	平均值 Average	93.39±2.04 A	93.39±2.04 A	57.17±4.13 A	35.44±5.12 B	9.90±1.63 B	3.13±0.20 B	22.44±0.25 C
10	0~10	98.50±1.50 a	98.50±1.50 a	57.35±8.01 b	19.03±4.25 a	20.06±3.73 b	1.97±0.02 a	4.32±0.18 a
	10~20	97.76±0.90 a	97.76±0.90 a	43.35±4.97 ab	29.43±3.09 a	15.85±4.60 ab	1.92±0.04 a	6.10±0.49 b
	20~30	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	62.16±8.66 b	28.84±9.35 a	7.68±2.90 ab	2.07±0.11 a	7.65±0.47 bc
	30~40	93.45±5.80 a	93.45±5.80 a	36.84±7.98 ab	29.47±1.11 a	3.38±0.37 a	2.42±0.19 a	8.60±0.33 c
	40~50	49.24±2.80 a	49.24±2.80 a	18.91±1.07 a	9.21±0.73 a	4.35±1.09 a	2.40±0.20 a	8.97±0.33 c
	平均值 Average	87.79±2.82 A	87.79±2.82 A	43.72±4.85 A	23.2±3.50 AB	10.27±1.92 B	2.16±0.07 A	7.13±0.42 A

续表1 Continued table 1

月份 Month	土层深度/cm Soil layer	速效磷/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Available P	有机质/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Organic matter	速效氮/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Available N	pH	脲酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Urease	酸性磷酸酶 / $\times 10^{-3}$ Eu Acid phosphatase	碱性磷酸酶 / $\times 10^{-3}$ Eu Alkaline phosphatase
4	0~10	2.24±0.09 b	6.21±0.42 b	15.89±0.65 a	7.97±0.01 a	15.69±1.19 b	104.88±18.54 b	152.30±6.86 c
	10~20	1.43±0.21 a	4.01±0.40 a	10.01±2.00 a	8.33±0.01 b	6.17±1.00 a	66.71±13.83 ab	44.87±1.96 b
	20~30	1.39±0.15 a	3.32±0.10 a	12.32±1.24 a	8.30±0.02 b	5.93±1.28 a	64.87±10.56 ab	39.61±1.28 b
	30~40	1.12±0.08 a	3.23±0.05 a	11.34±1.12 a	8.19±0.08 ab	3.73±1.46 a	46.44±4.26 a	6.18±1.73 a
	40~50	1.52±0.25 ab	3.20±0.21 a	13.86±2.21 a	7.94±0.11 a	3.73±0.73 a	48.02±12.06 a	49.08±3.15 b
	平均值 Average	1.54±0.11 A	3.99±0.27 A	12.68±0.78 A	8.15±0.05 B	7.05±1.12 A	66.19±6.99 B	58.40±11.5 AB
8	0~10	3.87±1.40 a	7.18±1.67 b	17.85±3.97 b	8.32±0.41 a	11.78±2.22 b	91.72±20.33 b	118.82±6.10 c
	10~20	1.56±1.00 a	2.78±0.27 a	5.95±0.88 a	8.58±0.13 a	3.73±1.61 a	30.39±8.53 a	34.07±2.16 b
	20~30	1.02±0.29 a	2.17±0.19 a	5.40±0.91 a	8.79±0.10 a	3.24±2.23 a	6.44±2.45 a	19.07±1.00 a
	30~40	0.52±0.18 a	2.63±0.34 a	5.25±0.67 a	8.79±0.04 a	1.29±0.73 a	14.86±5.67 a	18.02±2.37 a
	40~50	0.54±0.29 a	3.53±0.61 a	8.75±3.89 ab	8.79±0.04 a	1.27±0.93 a	33.82±12.06 a	23.28±3.20 ab
	平均值 Average	1.50±0.42 A	3.66±0.53 A	8.64±1.49 A	8.65±0.09 B	4.27±1.11 A	35.45±8.25 A	42.66±8.93 A
10	0~10	5.96±1.05 b	6.95±0.62 b	22.05±6.72 a	8.58±0.08 a	12.76±2.07 b	124.62±15.95 b	146.5±15.60 b
	10~20	2.87±0.47 a	3.96±0.74 a	11.55±2.24 a	8.83±0.05 ab	7.64±1.20 ab	87.77±8.85 ab	83.03±9.19 a
	20~30	1.41±0.20 a	2.55±0.34 a	8.75±2.93 a	8.98±0.05 b	7.15±1.90 ab	52.76±8.11 a	61.45±2.36 a
	30~40	1.88±0.53 a	2.46±0.15 a	15.05±6.34 a	9.00±0.06 b	5.20±1.97 a	58.29±4.61 a	68.82±8.97 a
	40~50	2.35±0.20 a	2.94±0.49 a	8.75±2.64 a	8.98±0.05 b	4.46±1.16 a	49.34±7.53 a	67.51±12.4 a
	平均值 Average	2.89±0.44 B	3.77±0.44 A	13.23±2.20 A	8.87±0.04 C	7.44±0.95 C	74.56±7.60 B	85.46±8.33 B

注:同列数据后标不同小写字母者表示相同月份不同土层在 $P<0.05$ 水平上差异显著,标不同大写字母者表示不同月份在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: Data with different small letters in the same column indicate statistically significant differences at $P<0.05$ in different soil layers, different capital letters indicate statistically significant differences at $P<0.05$ in different months.

2.2 油蒿根围土壤因子的时空分布

由表1可知,油蒿根围土壤因子及土壤酶活性表现出明显的季节变化。4月和8月的土壤湿度显著大于10月,土壤温度表现为8月>4月>10月。平均土壤速效磷、速效氮及脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的最大值均出现在10月,最低值均出现在8月,土壤有机质含量在4~10月间无显著差异。土壤pH最大值出现在10月,最低值出现在4月,土壤pH值为7.94~9.0,属碱性土壤。8月和10月均以碱性磷酸酶活性略大于酸性磷酸酶。

由表1可以看出,在土壤垂直剖面上,土壤湿度随土层加深而增大;土壤温度在垂直剖面上的变化与季节相关,在4月和10月均是以表层温度最低,深层土温较高;8月则相反,表现为表层土壤温度最高。土壤速效磷、有机质含量、速效氮最大值均出现在0~10 cm土层,10~40 cm土层明显降低,40~50 cm土层有所回升。4月和10月0~10 cm土层的速效磷含量与10~40 cm土层差异显著,8月份各土层间无显著差异。有机质在各月不同土层间均有显著差异。0~50 cm土层速效氮含量在4月和10月间差异不显著,8月各土层间变化较大;8月和10月土壤pH随土层加深基本呈增加趋势,4月和

10月各土层间pH差异显著。脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性规律变化一致,即0~10 cm土层酶活性均最大,并随土层深度的增加酶活性递减。3种酶活性在各月不同土层间均有显著差异。

2.3 油蒿根围 AM 真菌与土壤因子的相关性

油蒿根围 AM 真菌的孢子密度、定殖率及土壤酶活性与各土壤因子的相关性分析见表2。由表2可知,菌丝定殖率、泡囊定殖率、孢子密度及脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性均与土层深度呈极显著负相关;菌丝定殖率和泡囊定殖率与土壤湿度呈显著负相关;丛枝定殖率与有机质含量、速效氮含量和3种酶活性均呈极显著负相关,但与pH呈极显著正相关;孢子密度与速效磷含量、有机质含量和酸性磷酸酶活性呈极显著正相关,与碱性磷酸酶和pH呈显著正相关,与土壤湿度呈显著负相关;孢子密度、土壤温度和速效磷含量与AM真菌的各种定殖率均无相关性;3种土壤酶活性与土壤速效磷、速效氮、有机质含量都呈极显著正相关,且3种土壤酶活性之间也呈极显著正相关,表明3种土壤酶在促进土壤养分转化中存在共性关系;3种土壤酶活性还与土壤温度和土壤湿度呈显著负相关。此外,脲酶活性与pH也呈负相关关系。

表 2 油蒿根围 AM 真菌与土壤因子的相关性分析($n=60$)Table 2 Correlation analysis between AM fungi and soil factors of *Artemisia ordosica* ($n=60$)

指标 Index	土层深度 Soil layer	速效磷 Available P	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	pH	土壤湿度 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	孢子密度 Spore density
菌丝定殖率 Hypha rate	-0.45**	0.11	-0.12	-0.09	0.15	-0.45**	-0.02	0.12	0.17	0.05	0.24
泡囊定殖率 Vesicular rate	-0.53**	0.015	0.13	-0.14	-0.12	-0.33**	0.14	0.25	0.02	0.09	0.09
丛枝定殖率 Arbuscule rate	0.08	-0.19	-0.36**	-0.34**	0.33**	0.04	0.19	-0.34**	-0.34**	-0.38**	0.16
脲酶 Urease	-0.67**	0.59**	0.71**	0.40**	-0.31*	-0.52**	-0.33**	1.00	0.64**	0.75**	0.19
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	-0.56**	0.74**	0.78**	0.55**	-0.23	-0.52**	-0.48**	0.64**	1.00	0.74**	0.38**
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.65**	0.61**	0.66**	0.54**	-0.15	-0.56**	-0.47**	0.75**	0.74**	1.00	0.31*
孢子密度 Spore density	-0.45**	0.67**	0.42**	0.14	0.31*	-0.30*	-0.11	0.19	0.38**	0.31*	1.00

注:标*者表示两者之间在 $P<0.05$ 水平上显著相关,标**者表示两者之间在 $P<0.01$ 水平上极显著相关。

Note: * means significant correlation at $P<0.05$; ** means significant correlation at $P<0.01$.

3 讨 论

油蒿是荒漠和荒漠化草原地区固定、半固定沙地上最大的植物群落之一,对其根围 AM 真菌的分布和活跃性研究具有一定的代表性。本研究结果表明,油蒿根围 AM 真菌有很高的总定殖率(86.9%)和丛枝定殖率(24.8%),说明油蒿是典型的丛枝菌根植物,其与 AM 真菌有良好的共生关系,这可能也是油蒿适应干旱贫瘠荒漠环境的生态对策之一。本研究发现,油蒿根围 AM 真菌的孢子密度和定殖率随土壤深度变化表现出一定的差异性,并呈现出明显的季节性变化,这可能是因为 AM 真菌受到宿主植物根际的生物学特性、土壤微环境变化及 AM 真菌依赖性和 AM 真菌本身的生物学特性等多种机制的共同影响所致。

从土壤垂直剖面上看,0~40 cm 土层的菌丝定殖率和泡囊定殖率均较高且在各土层间无显著差异,丛枝定殖率仅在 30~40 cm 土层较大。首先,这可能与 AM 真菌本身的生物学特性有关,菌丝在植物根组织中作为 AM 真菌物质传递的器官而广泛存在,泡囊是一个静止的器官,可以长期保持活力,在不同阶段、不同条件下分别起着营养储存和繁殖的功能;丛枝是共生体之间营养交换的场所和信息交流的界面,但其存活时间较短,仅为 5~25 d^[18];

其次可能与油蒿根系的分布特点有关^[19],油蒿植株萌芽力强,株丛沙埋后由根颈萌发出无数纤细小根,幼嫩须根皮层中具有丰富的薄壁细胞,十分利于丛枝结构的形成。AM 真菌孢子密度在土壤垂直剖面上的分布与土壤养分及土壤酶活性一致,最大值均出现 0~20 cm 土层,并随土壤深度增加而降低。这可能是土壤表层累积了较多的枯枝落叶和腐殖质,土壤养分好,AM 真菌生长旺盛,有助于土壤酶活性的增强;另一方面也可能是由于沙地表层土的通透性好,土壤真菌对低氧环境特别敏感的缘故^[20]。

本研究发现,在季节变化中,AM 真菌的孢子密度与土壤速效磷、速效氮含量及土壤酶活性均于 10 月达到最大值,最低值均出现在 8 月。AM 真菌的种群数量和活性受到气候、土壤理化性质、土壤酶活性以及宿主植物的直接或间接影响,并且各种因素之间也存在着互作效应。其中土壤酶活性的变化与 Fioretto 等^[21]的研究结果相符,而与“Sardans 等^[22]认为土壤酶活性在春季达到最大”的结论不一致。这可能是因为:(1)AM 真菌的活性促使植物或其他微生物群落分泌更多的胞外酶,使土壤酶活性随 AM 真菌种群数量的增加而增加。这可以从土壤酶与土壤养分、孢子密度显著相关得到印证。许多研究也表明,接种 AM 真菌可以提高土壤酶的活性^[23]。(2)荒漠环境干旱贫瘠,植被少而单一,夏季

干旱高温加剧了土壤水分和可利用养分的缺乏,不仅不利于AM真菌的繁殖,而且又抑制了土壤酶活性。土壤酶催化土壤中的生物化学反应,影响着土壤养分的形成与积累,从而改变了土壤微环境,进而影响到土壤AM真菌的种群数量和活跃性,反之亦然。

有资料表明,鄂尔多斯沙地的油蒿于4月初返青,6~7月生物量达到最大值,以后生长趋缓,9月末期呈现负增长,10月底停止生长并开始落叶,季节性十分明显^[24]。油蒿根内菌丝、泡囊和丛枝定殖率随季节的变换,与土壤因子有较大差异,而与油蒿的物候期相一致,可能是油蒿生长变化导致其根际分泌物及土壤微环境发生变化,进而影响AM真菌与其形成菌根结构。另一方面可能是伴随着油蒿的高速生长,其需要大量的土壤养分,使得其对AM真菌的共生依赖性增强,这或许是其能在逆境生存的主要原因之一。丛枝的存在是AM真菌侵染宿主植物根系并形成菌根的必要条件,也是两者资源和信息交流的界面,丛枝结构的功能不仅与养分的吸收、释放有关,而且还与植物的抗病性有关^[25]。本研究中,丛枝定殖率与有机质含量、速效氮含量和3种酶活性均呈显著负相关,只与pH显著正相关,说明宿主植物对AM真菌的共生依赖度,随土壤条件的改善而减弱,但受到土壤微环境变化的显著影响。

土壤酶在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用,其活性反映了土壤营养循环的速率,是反映土壤生产力和土壤微生物活性的一个指标^[26]。脲酶活性反映了土壤有机态氮向有效态氮的转化能力和土壤无机氮的供应能力。本研究的相关性分析表明,脲酶活性与土壤速效氮呈显著正相关,并受到土壤水热条件及pH的显著影响,但与AM真菌孢子密度的相关性较低。AM真菌的孢子密度与土壤速效磷和酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性均呈显著正相关,这与前人的研究结果一致^[27]。表明在极端贫瘠的沙丘上,AM真菌很可能改变了植物的磷养分。土壤磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶,能够以难溶性有机磷化合物如核酸、磷脂等作为底物,使其转化为植物能够直接吸收利用的速效磷。一方面,AM真菌的活性能促进植物或其他微生物群落分泌更多的胞外酶,加速有机磷的矿化过程,荒漠低磷的刺激也可以诱导并促进磷酸酶活性的增加;另一方面,AM真菌根外菌丝可穿越根际贫磷区,从而扩展磷的吸收范围。

4 结 论

研究表明,油蒿与AM真菌有良好的共生性,其根围AM真菌的孢子密度和定殖率随季节和土壤深度的变化,而表现出明显的时空差异,并与土壤养分及土壤酶活性显著相关,可作为荒漠土壤的评价指标。AM真菌种群分布和活跃性,对提高自然生态系统抵御外界干扰的能力、维护荒漠土壤生态系统结构的完整性和功能稳定性具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 刘润进,陈应龙. 菌根学 [M]. 北京:科学出版社,2007:28-29.
Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 28-29. (in Chinese)
- [2] 王力华,韩桂云,李琳,等. 菌根技术在沙地植被恢复中的研究 [J]. 生态学报, 2004, 23(5): 236-240.
Wang L H, Han G Y, Li L, et al. Applying research of mycorrhizae technology in the restoration of sand vegetation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 236-240. (in Chinese)
- [3] 张德魁,王继和,马全林,等. 油蒿研究综述 [J]. 草业科学, 2007, 24(8): 30-36.
Zhang D K, Wang J H, Ma Q L, et al. Summary of *Artemisia ordosica* studies [J]. Pratacultural Science, 2007, 24(8): 30-36. (in Chinese)
- [4] 马毓泉,富象乾,陈山,等. 内蒙古植物志:第4卷 [M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1992:643-644.
Ma Y Q, Fu X Q, Cheng S, et al. Flora IntraMongolica: Volume 4 [M]. Hohhot: The Inner Mongolia People's Publishing House, 1992: 643-644. (in Chinese)
- [5] 山宝琴,贺学礼. 毛乌素沙地12种蒿属植物叶的解剖特征 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(6): 211-217.
Shan B Q, He X L. Leaf anatomic characteristics of 12 species of *Artemisia* in Mu Us desert [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(6): 211-217. (in Chinese)
- [6] 赵文治,程国栋. 菌根及其在荒漠化土地恢复中的作用 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 947-950.
Zhao W Z, Cheng G D. Mycorrhizae and its application in desertification land restoration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 947-950. (in Chinese)
- [7] Lynch J M, The Rhizosphere [M]. London: Johnwiley and Sons Chichester, 1990: 27.
- [8] 张焕仕,贺学礼. 干旱胁迫下AM真菌对油蒿叶片保护系统的影响 [J]. 生物技术通报, 2007(3): 129-134.
Zhang H S, He X L. Effect of AM fungi on the protective system in leaves of *Artemisia ordosica* under drought stress [J]. Biotechnology Bulletin, 2007(3): 129-134. (in Chinese)
- [9] 杨洪晓,张金屯,吴波,等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 563-570.

- Yang H X, Zhang J T, Wu B, et al. Point pattern analysis of *Artemisia ordosica* population in the mu us sandy land [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 563-570. (in Chinese)
- [10] 罗海江, 白海玲, 方修琦, 等. 农牧交错带近十五年生态环境变化评价——以鄂尔多斯地区为例 [J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 474-485.
- Luo H J, Bai H L, Fang X Q, et al. ecosystem change and assessment of ecolone between agriculture and animal husbandry regions in North China in the last fifteen years — A case study of Ordos Prefecture, Inner Mongolia [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 474-485. (in Chinese)
- [11] 贺学礼, 赵丽莉, 杨宏宇. 黄土高原柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性及空间分布 [J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3835-3841.
- He X L, Zhao L L, Yang H Y. Diversity and spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3835-3841. (in Chinese)
- [12] 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]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55: 158-161.
- [13] 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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Lu R K. Analysis methods of soil agro-chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 267-286.
- Zhong L K. Soil enzymology [M]. Beijing: Science Press, 1987: 267-286. (in Chinese)
- [16] Tabatabai M A, Bremner J M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity [J]. Soil Biol Biochem, 1969, 1(3): 301-307.
- [17] 宋勇春, 冯 固, 李晓林. 泡囊丛枝菌根对红三叶草根际土壤磷酸酶活性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 171-175.
- Song Y C, Feng G, Li X L. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in the rhizosphere of clover [J]. China Journal Apply Environbiol, 2000, 6(2): 171-175. (in Chinese)
- [18] Biermann B, Linderman R G. Use of vesicular arbuscular mycorrhizal roots, intraradical vesicles and extraradical Vesicles as inoculum [J]. New Phytologist, 1983, 95: 97-105.
- [19] 陈世璜. 内蒙古草原植物根系类型 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1987.
- Chen S H. The root system type of plant in Inner Mongolia Steppe [M]. Hohhot: The Inner Mongolia People's Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [20] Brady N C, Wei R R. Organism sand ecology of the soil [J]. The Nature and Properties of Soil, 1996, 11: 328-360.
- [21] Fioretto A, Papa S, Sorrentino G, Fuggi A. Decomposition of *Cistus incatus* leaf litter in a Mediterranean maquis ecosystem: mass loss, microbial enzyme activities and nutrient changes [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 311-321.
- [22] Sardans J, Penuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 455-461.
- [23] Wang F y, Lin X g, Yin R. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth of *Elsholtzia splendens* and *Zea mays* and the activities of phosphatase and urease in a multietal contaminated soil under unsterilized conditions [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31: 110-119.
- [24] 王庆锁, 李 博. 鄂尔多斯沙地油蒿群落生物量初步研究 [J]. 植物生态学报, 1994, 18(4): 347-353.
- Wang Q S, Li B. Preliminary study on biomass of *Artemisia ordosica* community in Ordos Plateau Sandland of China [J]. Journal of Plant Ecology, 1994, 18(4): 347-353. (in Chinese)
- [25] 黄京华, 骆世明, 曾任森. 丛枝菌根菌诱导植物抗病的内在机制 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 819-822.
- Huang J H, Luo S M, Zen R S. Mechanisms of plant disease resistance induced by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 819-822. (in Chinese)
- [26] Margarita S, Fernando G P, Lillian F. Soilmicrobial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial Eucalyptus grand is plantations in Uruguay [J]. Applied Soil Ecology, 2004, 3: 1-9.
- [27] O'Connor P J, Smith S E, Smith F A. Arbuscular mycorrhizal associations in the Simpson Desert [J]. Aus J Bot, 2001, 49: 493-499.