

荒漠油蒿(*Artemisia ordosica*)根围AM 真菌分布与土壤酶活性

山宝琴¹, 贺学礼^{1,2,*}, 白春明¹, 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. 河北大生命科学学院, 河北保定 071002)

摘要:于2007年10月在油蒿(*Artemisia ordosica*)集中分布区选取4个典型样地, 分别从0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm和40~50cm土层采集根围土样, 分离其丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌并测定了3种土壤酶活性。结果表明, 在各样地0~50cm土层中油蒿根系AM真菌菌丝定殖率均很高, 有典型的泡囊与丛枝结构。菌丝定殖率与泡囊定殖率呈显著正相关, 但菌丝、泡囊和丛枝定殖率与AM真菌孢子密度和土壤酶活性之间都无相关性; 孢子密度在不同样地及采样深度间差异明显, 与土壤有机质、速效磷和速效氮含量都呈一定正相关关系。孢子密度与脲酶和酸性磷酸酶活性有显著或极显著相关关系, 与碱性磷酸酶活性之间的相关性受到土壤pH的显著影响。孢子密度的峰值出现在0~10cm表层土, 并随土壤剖面深度增加而降低。土壤酶活性在土壤垂直剖面显示与孢子密度同样的规律。不同样地间AM真菌分布及油蒿根系定殖率的差异表明, 油蒿与AM真菌之间有良好共生性, 对维护荒漠生态环境系统结构的完整性具有重要意义。

关键词:丛枝菌根真菌; 油蒿; 土壤酶活性

文章编号:1000-0933(2009)06-3044-08 中图分类号:Q143,Q938,Q948,949.32 文献标识码:A

Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* in desert

SHAN Bao-Qin¹, HE Xue-Li^{1,2,*}, BAI Chun-Ming¹, ZHAO Li-Li²

1 College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3044~3051.

Abstract: Soil samples in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* distributed in west and northwest China desert were collected in October 2007 to isolate arbuscular mycorrhizal (AM) fungi, and to determine the soil enzyme activity in 0~10, 10~20, 20~30, 30~40 and 40~50 cm soil layers. The results showed that AM fungi had a relatively high hyphal colonization rate on the roots of *A. ordosica*, and the hyphal colonization rate was significantly and positively correlated with vesicular colonization rate. However, the colonization of hyphae, vesicles and arbuscules was not correlated to spore density and soil enzyme activities, while spore density was different among sites and soil depths, and was significantly and positively correlated with available P, N, and organic matter contents, urease and acid phosphatase activities. The correlation between the spore density and alkaline phosphatase activity was affected by pH. The maximal value of spore density occurred at the 0~10cm layer, and then gradually decreased with soil depth. The soil enzyme activities showed the same trend as the spore distribution. There was an obviously positive correlation between the activity of the three soil enzymes and soil fertility. This suggests that *A. ordosica* could establish well symbiosis with AM fungi, which was the main reason for maintaining integrity and stability of the desert ecosystem.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670371, 40471075)

收稿日期:2008-03-26; 修订日期:2009-03-12

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlh3615@tom.com

Key Words: Arbuscular mycorrhizal fungi; *Artemisia ordosica*; Soil enzyme activity

我国是世界上受沙漠化危害最为严重的国家之一,在北方风沙肆虐的农牧交错带通常以油蒿等耐旱灌木作为固沙植物,油蒿(*Artemisia ordosica*)又名黑沙蒿,隶属菊科蒿属,半灌木^[1,2]。油蒿多分枝的茎干与低矮稠密的树冠具有很强的防风固沙与水土保持能力,能够促进流动沙地的植被发育过程,最终达到植被固沙目的,在防沙固沙和维持区域生态系统健康等方面起着重要作用^[3]。

在水分短缺、蒸散剧烈、基质养分贫瘠的半干旱内陆沙化生境里,通过与丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌共生是植物生存和生长的重要机制之一^[4,5]。AM真菌是一类能与绝大多数高等植物根系形成共生结构的有益微生物,不仅能改善植物营养状况,促进植物生长,而且能提高植物抗逆性和抗病性,对于维持生态系统功能和稳定性有重要意义^[6,7]。然而,油蒿根围土壤AM真菌群落物种组成、生态分布格局等研究鲜有报道,对荒漠环境中油蒿与AM真菌共生和适应极端环境的生态机制研究非常有限。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,作为土壤的重要组成部分,土壤酶活性一直是国内外研究的热点^[8~10]。近年AM真菌与土壤酶活性的相关性研究也渐受关注^[11~14],本文通过对采自毛乌素沙地和腾格里沙漠油蒿根围土壤AM真菌空间分布和土壤酶活性的测定分析,旨在重点探索AM真菌与土壤酶活性的相关性,为进一步评价荒漠土壤环境状况和生态安全提供依据。

1 材料与方法

1.1 油蒿分布特征及采样地选设

油蒿分布范围北至蒙古边境,东以黄河为界,向西可深入到腾格里沙漠西部边缘(但不进入巴丹吉林沙漠中心腹地),南面基本上与毛乌素沙区边界吻合,集中分布于毛乌素沙地和宁夏河东沙地,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^[15]。根据油蒿分布的集中区域,考虑毛乌素沙地荒漠化主要类型、区域差异性,分别在中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙生草地生态研究站、陕西省榆林小纪汉林场、宁夏盐池县沙生灌木园选设了一个典型样地,在腾格里沙漠东南缘的宁夏沙坡头地区选设了一个样地,共4个样地。表1为各样地的基本情况及0~50cm土层土壤理化性质的平均值。

表1 样地概况

Table 1 Introduction of different sites

样地 Site	速效磷 Available P (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	速效氮 Available N (mg/kg)	pH	土壤湿度 Soil moisture (%)	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Elevation (m)	土壤类型 Type of soil	油蒿分布格局 Distribution pattern
研究站 Research station	2.896	3.77	13.23	8.87	2.16	39°29'40" 110°11'22"	1280	风沙土 Aeolian sandy soil	集群分布 Clumped distribution
榆林 Yu lin	2.639	3.304	5.04	7.59	2.25	38°22'54" 109°41'75"	1114	原始栗钙土 Initial chestnut soil	集群分布 Clumped distribution
盐池 Yan chi	3.591	5.794	9.8	9.35	3.41	37°48'37" 107°23'39"	1350	原始棕钙土 Initial brown soil	均匀分布 Regular distribution
沙坡头 Sha po tou	1.657	3.457	9.45	8.96	1.55	37°32'37" 105°03'21"	1270	原始灰棕漠土 Grey-brown desert soil	集群分布 Clumped distribution

1.2 研究方法

2007年秋季分别在4个样地各采样1次。4个样地大小均为30m×30m,每个样地随机选取4株高度0.4~0.5m、冠幅直径在0.6m以上的油蒿植株,距植株约30cm处挖土壤剖面,按0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm和40~50cm共5个土层采集土壤样品约1kg,每个土样重复4次。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,4℃冷藏。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AM真菌定殖率测定和菌根形态学观察^[16]。

菌根定殖率测定:将收集的根样切成1cm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^[17]。将25条约1.0cm长的细根置于显微镜下观测,采用网格交叉法测定根系菌丝定殖率,并观察丛枝和泡囊等典型菌根结构,用“+”和“-”表示样品中丛枝和泡囊的存在与否,并计算相应的百分率。

孢子密度测定:用湿筛倾注蔗糖离心法^[18]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,将每克风干土中的含孢量计为孢子密度。

用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷,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,用碱解扩散法测定碱解氮^[19]。用靛酚比色法测定土壤脲酶活性($\text{mg NH}_4^+ \text{-N}/(\text{g} \cdot \text{h})$)^[20]。用改进的Tabatabai & Brimner法测定磷酸酶^[14]。测定酸性磷酸酶时,用0.1 mol/L pH5.2的醋酸缓冲液;测定碱性磷酸酶时,用0.5 mol/L pH8.5的NaHCO₃作缓冲液。酶活性单位(Eu)为每min每g土水解1μmolpNPP(对硝基苯磷酸二钠)的值。

1.3 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,不同因子之间两两相关分析采用Person法,绘图由Origin 75软件完成。

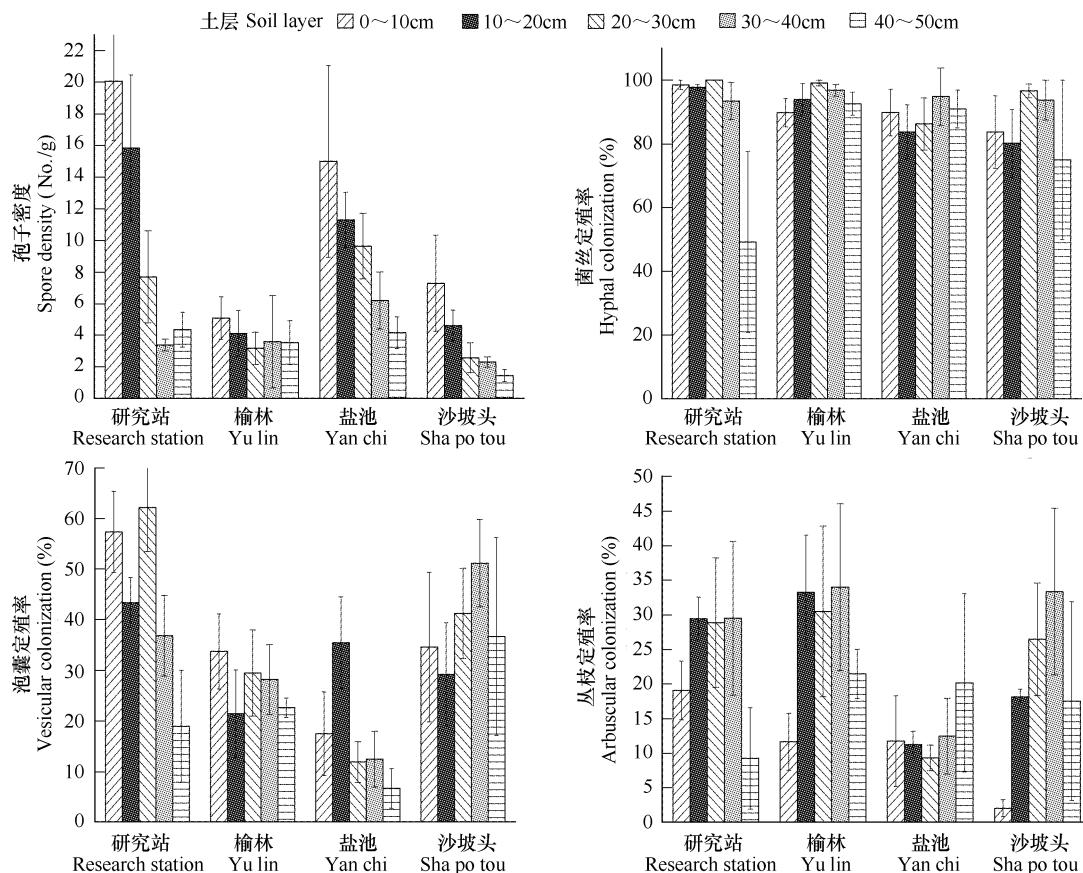


图1 不同样地AM真菌孢子密度和定殖率

Fig. 1 Spore density and the percent colonization of AMF in different site

短柱表示均数的标准误(下同); Bar means standard error of the mean (the same below)

2 结果与分析

2.1 AM真菌孢子密度和根系定殖率的空间分布

0~50cm土层中的AM真菌孢子密度和根系定殖率均值在不同样地间变化规律是:孢子密度为盐池>研

究站>沙坡头>榆林,泡囊定殖率为研究站>沙坡头>榆林>盐池,丛枝定殖率为榆林>沙坡头>研究站>盐池;菌丝定殖率在4个样地间无明显差异(图1)。结合表1分析可知,随土壤立地条件改变,孢子密度与土壤有机质含量成正比,水肥条件越好,孢子密度越大;丛枝定殖率恰好相反。

各样地AM真菌孢子密度和根系定殖率随土壤剖面垂直变化如图1所示:孢子密度最大值都出现在0~10cm表层土,并随土壤深度增加而呈递减趋势;菌丝定殖率在0~40cm土层均较高,且各土层间无明显差异,40~50cm土层略有降低;泡囊定殖率在各土层间虽有差异,但未显示出一致规律。丛枝定殖率最大值出现在30~50cm较深层土壤,0~10cm表层土反而较低。

2.2 土壤酶活性的空间分布

根据不同样地分析结果,土壤脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性的最大值均出现在盐池沙生灌木园(图2),其次为研究站,榆林和沙坡头偏低。结合表1分析可知,这与4个样地有机质含量的差异成正比。脲酶的活性值为盐池>研究站>榆林>沙坡头,与不同样地土壤湿度显著正相关($r=0.966, p<0.01$),说明脲酶对土壤水分变化较为敏感;碱性磷酸酶的活性值为盐池>沙坡头>研究站>榆林,与不同样地pH显著正相关($r=0.973, p<0.01$);酸性磷酸酶的最大活性值依次为研究站>盐池>沙坡头>榆林,与不同样地孢子密度呈正相关($r=0.924, p<0.01$),与不同样地土壤速效磷含量也显著正相关($r=0.924, p<0.01$)。

土壤酶是土壤的一个重要组分,在土壤发生发育以及土壤肥力形成过程中起着重要作用。土壤酶活性与土壤养分密切相关,反映土壤养分转化的强弱,表征土壤肥力。实验结果表明,3种酶的活性最大值均出现在0~10cm表层土,并随土壤剖面深度增加而降低。随着土壤剖面加深,各种酶活性变化略有差异(图2)。不同样地土壤酶的垂直分布规律也不同。研究站样地,土壤脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性在0~30cm土层随土层加深而明显降低,30~50cm土层趋于稳定。盐池样地3种酶活性在0~20cm土层锐减,随后变化平

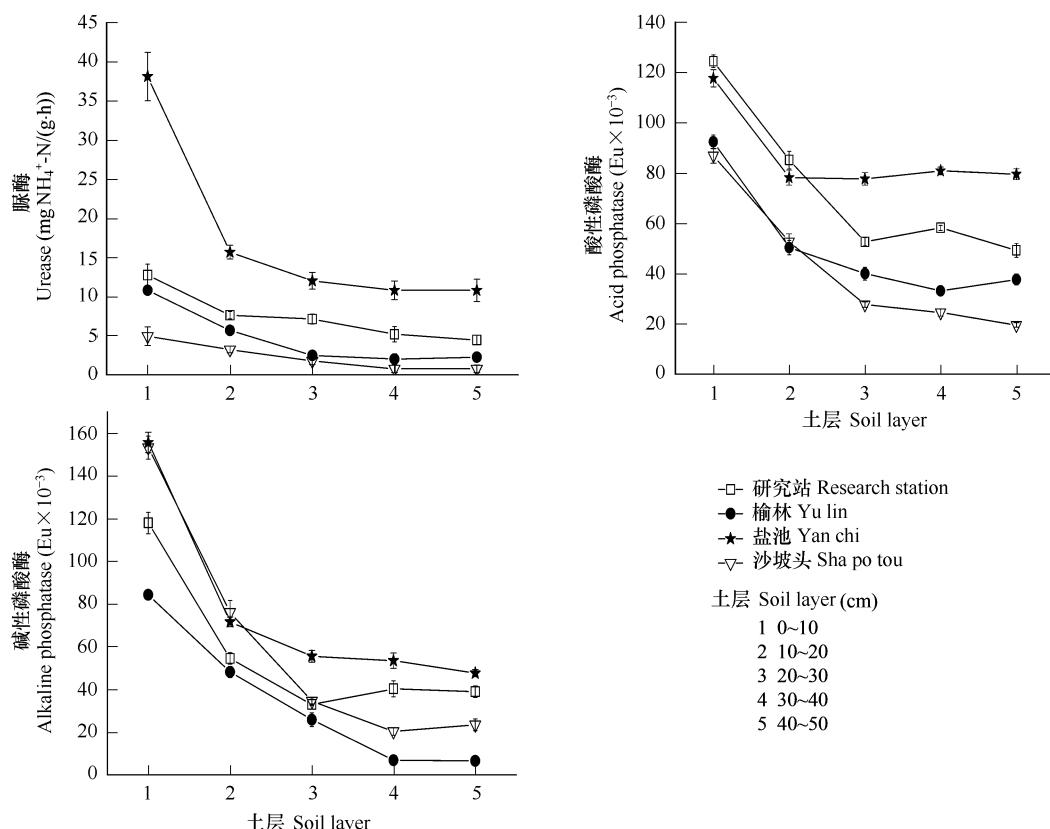


图2 不同样地土壤酶活性
Fig. 2 Soil enzyme activity in different sites

稳。榆林样地,3种酶活性都随土深增加而递减。沙坡头样地,土壤脲酶活性垂直变化不显著,磷酸酶随土深增加而显著递减。

2.3 AM真菌与土壤酶活性的相关性分析

表2可见,AM真菌孢子密度和3种酶在各样地都与土层深度呈显著负相关;孢子密度与有机质含量在研究站、盐池和沙坡头均呈正相关,与土壤速效磷含量和速效氮含量在研究站和沙坡头样地呈极显著或显著正相关;在研究站、盐池和沙坡头3样地,脲酶和酸性磷酸酶活性均与孢子密度呈显著或极显著相关关系;碱性磷酸酶活性与孢子密度的相关性受到土壤pH的影响,榆林样地($pH < 8.0$)和盐池样地($pH > 9.0$),碱性磷酸酶活性与孢子密度无显著相关性,研究站和沙坡头样地($pH 8.5 \sim 9.0$),碱性磷酸酶活性随土壤剖面深度增加与孢子密度呈显著正相关。土壤pH对孢子密度的影响也随样地有所差异,榆林样地($pH 7.59$)pH与孢子密度呈显著正相关,其余3个样地($pH > 8.8$)均为负相关。另外,泡囊定殖率与菌丝定殖率在研究站($r = 0.694, p < 0.01$)、沙坡头($r = 0.61, p < 0.01$)样地呈显著正相关。菌丝、泡囊和丛枝定殖率都与孢子密度及土壤酶活性无任何相关性。

表2 油蒿根围AM真菌与土壤酶活性的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between AM fungi and soil enzyme activity of *Artemisia ordosica*

样地 Site	指标 Index	土层 Soil layer	菌丝 Hypha	泡囊 Vesicle	丛枝 Arbuscule	速效磷 Available P	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	pH	孢子密度 Spore density
研究站	脲酶	-0.647 **	0.096	0.411	-0.185	0.671 **	0.633 **	0.051	-0.351	0.518 *
Research station	酸性磷酸酶	-0.768 **	0.378	0.188	-0.147	0.882 **	0.934 **	0.414	-0.822 **	0.820 **
	碱性磷酸酶	-0.669 **	0.106	0.108	-0.207	0.711 **	0.739 **	0.520 *	-0.683 **	0.522 *
	孢子密度	-0.740 **	0.271	0.262	0.102	0.756 **	0.800 **	0.288	-0.710 **	1.00
榆林 Yu lin	脲酶	-0.810 **	-0.369	0.160	-0.262	0.907 **	0.766 **	0.739 **	0.287	0.041
	酸性磷酸酶	-0.770 **	-0.213	0.223	-0.398	0.911 **	0.833 **	0.775 **	0.383	0.188
	碱性磷酸酶	-0.866 **	-0.346	0.162	-0.272	0.809 **	0.877 **	0.675 **	0.496 *	0.252
	孢子密度	-0.164	0.122	0.022	0.040	0.038	0.341	0.305	0.464 *	1.00
盐池 Yan chi	脲酶	-0.698 **	-0.067	0.061	0.021	0.681 **	0.687 **	0.825 **	-0.560 **	0.721 **
	酸性磷酸酶	-0.507 *	-0.077	-0.050	-0.170	0.450 *	0.426	0.481	-0.159	0.549 *
	碱性磷酸酶	-0.712 **	-0.010	0.164	0.063	0.680 **	0.657 **	0.782 **	-0.443	0.295
	孢子密度	-0.574 **	-0.238	0.056	0.027	0.306	0.561 **	0.443	-0.479 *	1.00
沙坡头	脲酶	-0.703 **	0.167	0.081	-0.336	0.649 **	0.789 **	0.626 **	0.065	0.741 **
Sha po tou	酸性磷酸酶	-0.826 **	0.009	-0.157	-0.419	0.738 **	0.908 **	0.621 **	-0.169	0.582 **
	碱性磷酸酶	-0.817 **	0.064	-0.133	-0.433	0.904 **	0.924 **	0.629 **	-0.023	0.822 **
	孢子密度	-0.590 **	0.210	-0.024	-0.340	0.800 **	0.707 **	0.503 *	-0.015	1.00

*表示两者之间在 $p < 0.05$ 水平上有显著相关性 correlation coefficients significant at $p < 0.05$; **表示两者之间在 $p < 0.01$ 水平上有极显著相关性 correlation coefficients significant at $p < 0.01$; 脲酶 Urease; 酸性磷酸酶 Acid phosphatase; 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase; 孢子密度 spore density

脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性与土壤有机质含量、速效磷含量、速效氮含量呈极显著或显著正相关,尤其酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性都与土壤速效磷含量呈极显著正相关,可见在极端贫瘠的荒漠环境,磷酸酶活性的强弱对土壤磷素供应极为重要。碱性磷酸酶活性在榆林样地与土壤pH呈显著正相关,其它3个样地都呈负相关关系。

3 讨论

AM真菌是严格的活体共生营养菌,其存在和活跃性受到宿主植物和土壤条件的显著影响。4种不同荒漠环境下,油蒿在0~40cm土层均有很高的菌丝定殖率,有典型的丛枝菌根共生体结构——泡囊与丛枝,说明油蒿与AM真菌有良好的共生性。油蒿根围孢子密度和定殖率在不同样地及土壤垂直剖面上差异显著,可

能受到宿主植物生物学特性、土壤微环境变化、AM真菌依赖性和AM真菌生物学特性等多种机制的共同影响。

油蒿植株萌芽力强,株丛沙埋后可由根颈发出无数纤细小根,这些短而成簇状数量庞大的次生须根为AM真菌提供了特殊的生存环境。油蒿主根垂直沙面向下可伸至1.0~1.7m的沙层^[15],近地面的侧根甚为发达,尤其20~50cm沙层,分枝多Ⅲ、Ⅳ级侧根,幼嫩根系周皮尚未形成,表皮阻力小易于侵入^[21],这可能正是油蒿根系菌丝侵染率高的主要原因之一。研究站和沙坡头样地菌丝定殖率与泡囊定殖率呈显著正相关,菌丝定殖率与丛枝定殖率无任何相关性,说明菌丝侵入宿主根皮层并大量繁殖的同时,并不意味着丛枝结构的必然形成。丛枝定殖率最大值出现在30~50cm土层,可能是由于丰富的须根分布,其皮层组织内有大量薄壁细胞和发达的细胞间隙,有利于丛枝结构的形成。

AM真菌孢子密度在4个样地间差异显著,表现出随海拔高度增加而增加的趋势,这是气候、植被密度、土壤类型、地理位置等生态因子综合影响的结果。盐池样地为松沙质原始棕钙土,有机质、速效磷和碱解氮含量高于其它样地,油蒿种群的空间分布格局为均匀分布,种群的空间关联性减弱意味着油蒿植株之间对土壤养分等生活资源竞争的弱化,也即对AM真菌共生依赖的弱化,因此孢子密度值最大,而丛枝定殖率却最小。研究站样地原土壤类型为沙质栗钙土,经破坏后则退化为流动风沙土。榆林虽为原始栗钙土,但极度贫瘠,土壤板结通透性极差。沙坡头样地属于极干旱的半固定沙地。由于对资源的竞争或为抵御风沙危害和提高存活机会,植株间需要相互庇护,这3个样地油蒿种群的空间分布格局都为集群分布。严峻生态环境下,高的植物种群密度伴随着较高的丛枝定殖率。群落的地上分布格局与地下丛枝菌根共生体的一致性,说明在油蒿群落适应荒漠环境过程中,AM真菌有重要作用,其分布与活跃性可作为荒漠生态系统评价的重要指标。

结果表明,不同地区不同种类的酶活性与AM真菌孢子密度显示相同的垂直变化特征,即峰值都出现在0~10cm的表土层,其活性随土壤剖面深度增加而降低,与Sardans^[22]的研究结果一致。AM真菌为好气性真菌,喜生于营养丰富、透气性好的表层土,并受到土壤垂直剖面微环境变化的显著影响^[16]。土壤酶活性与土壤因子密切相关,脲酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性在剖面垂直分布与土壤有机质含量、速效磷含量、速效氮含量均呈极显著或显著正相关,表明土壤有机磷转化与氮素转化之间关系密切并相互影响。此外,4个样地均为碱性土壤,pH对土壤碱性磷酸酶活性的影响较显著,碱性磷酸酶活性在弱碱性土壤随pH增加而增强,但在强碱性土壤中反而随pH增加受抑制,酸性磷酸酶与pH相关性不显著。土壤酶活性与土壤养分含量有不同程度的相关关系,表明土壤是一个复杂的平衡系统,各种因子之间相互依存、相互拮抗、相互作用^[23]。

脲酶活性反映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。研究表明,AM真菌孢子密度与脲酶活性呈显著正相关,AM真菌对土壤脲酶活性有贡献,有助于油蒿对土壤有效态氮的吸收利用。土壤磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶,土壤有机磷在磷酸酶作用下才能转化成可供植物吸收的无机磷。AM真菌是否能分泌胞外磷酸酶曾一度成为争论焦点,许多研究表明接种AM真菌可以提高土壤磷酸酶活性^[11~14],本实验结果表明,AM真菌在极端贫瘠的荒漠环境中改变了植物的磷养分。荒漠土低磷的刺激,可能使AM真菌不断向周围介质分泌酸性磷酸酶,加速土壤有机磷的转化分解。当然也不排除AM真菌活跃从而促进其它微生物群落分泌更多胞外酶,或两者并存共同作用。进一步的研究应关注AM真菌促进土壤磷酸酶活性的作用机理,这对于利用菌根技术重建退化生态系统有重要意义。

油蒿群落是荒漠植被中的优势群落,其根围AM真菌的分布和活跃性研究有一定的代表性,在不同荒漠生态条件下,AM真菌种群数量不同,而且不同程度的与油蒿根系互惠共生。AM真菌能促进土壤有效态氮和有机磷的转化分解,供给植物吸收利用,从而增强了宿主植物对外界环境的抵御能力。分析AM真菌种群数量、土壤酶活性和各种理化指标,综合评价4个样地土壤条件,由高到底依次为宁夏盐池县沙生灌木园>鄂尔多斯沙地草地生态研究站>榆林小纪汉林场>沙坡头样地,由此可见,在生态脆弱地区,由于土壤生态系统结构不稳定,各要素相互影响和制约,而AM真菌种群分布和活跃性对增强系统结构各要素间物质、能量和信息流通与转换,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。

References:

- [1] Lin L R, Lin Y R. Flora of China. Volume 76(2). Beijing: Science Press, 1991. 1—250.
- [2] Ma Y Q, Fu X Q, Cheng S, et al. Flora IntraMongolica. Volume 6. Hohhot: The Inner Mongolia People's Publishing House, 1982. 103—158.
- [3] Yang H X, Zhang J T, Wu B. Adaptation of *Artemisia ordosica* to temperate arid sandy land and its roles in habitat shift. Journal of Beijing Normal university, 2004, 40(5):684—690.
- [4] Lynd J Q, Ansman T R. Mycorrhizal ecology of favorable proteoid rhizogenesis, nodulation, and nitrogenase of lupines. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18 (11):2365—2377.
- [5] Ferrol N, Calvent R, Cano C, et al. Analysing arbuscular mycorrhizal fungal diversity in shrub-associated resource islands from a desertification threatened semiarid Mediterranean ecosystem. Applied Soil Ecology, 2004, 25: 123—133.
- [6] Cai X B, Qian C, Peng Y L, et al. Effects of environmental factors on AM fungi around steppe plant roots in Tibet Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (5):859—864.
- [7] Liang Y, Guo L D, Ma K P. The role of mycorrhizal fungi in ecosystems. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26 (6):739—745.
- [8] Turner B L, Haygarth P M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. Science of the Total Environment, 2005, 344: 27—36.
- [9] Renella G, Ortigozab A L R, Landi L, et al. Additive effects of copper and zinc on cadmium toxicity on phosphatase activities and ATP content of soil as estimated by the ecological dose (ED50). Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35:1203—1210.
- [10] Shen G Q, Lu Y T, Hong J B. Combined effect of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons on urease activity in soil. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 63:474—480.
- [11] Caravaca F, Alguacil M M, Azcon R, et al. Comparing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and amendment with sugar beet, rock phosphate and *Aspergillus niger* to enhance field performance of the leguminous shrub *Dorycnium pentaphyllum* L. Applied Soil Ecology, 2004, 25:169—180.
- [12] Wang F Y, Lin X G, Yin R, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth of *Elsholtzia splendens* and *Zea mays* and the activities of phosphatase and urease in a multi-metal-contaminated soil under unsterilized conditions. Applied Soil Ecology, 2006, 31:110—119.
- [13] He Y J, Zong Z C, Liu J M, et al. Response of N and P absorption on *Broussonetia papyrifera* seedling to inoculate vesicular arbuscular mycorrhizal fungus. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (11):4840—4847.
- [14] Song Y C, Feng G, Li X L. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in the rhizosphere of clover. China Journal Apply Environbiol, 2000, 6 (2):171—175.
- [15] Wang L Q, Chen S H, Hao L Z. The study of ecological biological characters & geological distribution law of *Artemisia ordosica* Krasch. Journal of Arid and Resources and Environment, 2002, 16 (4):95—99.
- [16] He X L, Zhao J L, Yang H Y. Diversity and spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* in the loess plateau. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (11):3835—3841.
- [17] 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.
- [18] Ianson D C, Allen M F. The effects of soil texture on extraction of vesicular arbuscular mycorrhizal fungal spores from arid soils. Mycologia, 1986, 78:164—168.
- [19] Lu R K. Analysis Methods of Soil Agro-Chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [20] Zhong L K. Soil enzymomogy. Beijing: Science Press, 1987. 267—286.
- [21] Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology. Beijing: Science Press, 2007. 22—31.
- [22] Sardans J, Penuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 455—461.
- [23] Gao X F, Zhang G, Lu P. Research on dynamic changes of soil enzymes and some ecologic factors with seasons in *stipa breviflora* desert steppe. Journal of Inner Mongolia Normal University, 2006, 35(2):226—228.

参考文献:

- [1] 林鎔,林有润.中国植物志(第七十六卷第二分册).北京:科学出版社,1991. 1~250.

- [2] 马毓泉,富象乾,陈山,等. 内蒙古植物志(第六卷). 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1982,103~158.
- [3] 杨洪晓,张金屯,吴波,等. 油蒿 *Artemisia ordosica* 对半干旱区沙地生境的适应及其生态作用. 北京师范大学学报,2004,40(5):684~690.
- [6] 蔡晓布,钱成,彭岳林,等. 环境因子对西藏高原草地植物丛枝菌根真菌的影响. 应用生态学报,2005,16(5):859~864.
- [7] 梁宇,郭良栋,马克平. 菌根真菌在生态系统中的作用. 植物生态学报,2002,26(6):739~745.
- [13] 何跃军,钟章成,刘济明,等. 构树 *Broussonetia papyrifera* 幼苗氮、磷吸收对接种AM真菌的响应. 生态学报,2007,27(11):4840~4847.
- [14] 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. 应用与环境生物学报,2000,6(2):171~175.
- [15] 王立群,陈世璜,郝利忠. 黑沙蒿生态生物学特性及群落地理分布规律相关性研究. 干旱区资源与环境,2002,16(4):95~99.
- [16] 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. 生态学报,2006,26(11):3835~3841.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国科学技术出版社,1999.
- [20] 周礼恺. 土壤酶学. 北京:科学出版社,1987. 267~286.
- [21] 刘润进,陈应龙. 菌根学. 北京:科学出版社,2007. 22~31.
- [23] 高雪峰,张功,卢萍. 短花针茅草原土壤的酶活性及其生态因子的季节动态变化研究. 内蒙古师范大学学报,2006,35(2):226~228.