

漠境沙打旺根围 AM 真菌与土壤酶活性的关系

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

【摘要】 **【目的】**研究漠境 AM 真菌对宿主沙打旺(*Astragalus adsurgens*)的作用机理及对根部土壤酶活性的影响。**【方法】**分别采集陕西靖边、宁夏盐池、内蒙古包头和集宁等 4 个样地沙打旺根围 0~10, 10~20, 20~30, 30~40 和 40~50 cm 等 5 个土层的土壤样品, 研究 AM 真菌在土壤中的空间分布及其与土壤脲酶、蛋白酶、酸性磷酸酶活性和碱解 N、速效 P 含量的关系。**【结果】**AM 真菌定殖率及孢子密度与样地生态条件密切相关, 其中集宁样地孢子密度最高, 靖边样地泡囊定殖率最高, 包头样地丛枝、菌丝和总定殖率均高于其他样地; 孢子密度与 AM 真菌不同结构定殖率间无显著相关性。土壤酸性磷酸酶活性对孢子密度有极显著正的效应; 脲酶活性对孢子密度和丛枝定殖率有极显著的正效应; 蛋白酶活性对丛枝定殖率、菌丝定殖率、总定殖率均有极显著正效应。土壤蛋白酶与泡囊定殖率呈显著负相关。碱解氮、速效磷对与以上 3 种土壤酶活性均呈极显著正相关。**【结论】**沙漠生境下 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。

【关键词】 AM 真菌; 土壤酶; 荒漠环境; 沙打旺

【中图分类号】 S154.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2009)01-0084-07

Study on relationships between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and soil enzyme activities of *Astragalus adsurgens* in the desert

BAI Chun-ming¹, HE Xue-li^{1,2}, SHAN Bao-qin¹, ZHAO Li-li²

(1 College of Life Sciences, Northwest A& F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: **【Objective】** This paper assessed the influences of arbuscular mycorrhizal(AM) fungi on the host plant and compared the response of AM fungi to soil enzymes, i. e. urease, protease and acid phosphatase, and soil factors through analysing desert soil samples. **【Method】** Soil samples in the rhizosphere of *Astragalus adsurgens* were collected in 4 replicates and divided a depth of 50 cm into 5 sections, i. e. 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 and 40-50 cm. The author studied 4 sites: Jingbian (Shaanxi), Yanchi (Ningxia), Baotou (Inner Mongol), and Jining (Inner Mongol). With the samples of the roots, the distributions of AM fungi were observed and the relationships with soil enzymes were analyzed. **【Result】** The results showed that AM fungi and soil enzymes had salience correlations. AM fungal colonization and spore density had a similar dynamic variation which declined with soil depth. The spore density from Jining was the highest of all of the samples, just as the vesicular colonization of Jingbian was higher than that of other samples. Arbuscular colonization from the samples of Baotou, as well as the hyphal and total colonization, was much higher than that of other areas. But between the spore density and colonization, there was not enough correlation.

* [收稿日期] 2008-03-03
[基金项目] 国家自然科学基金项目(40471637)
[作者简介] 白春明(1983—), 男, 山东聊城人, 在读硕士, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: baicm1106@yahoo. com. cn
[通信作者] 贺学礼(1963—), 男, 陕西蒲城人, 教授, 博士, 主要从事生物多样性及土壤生态学研究。
E-mail: xuelh1256@yahoo. com. cn

Furthermore, higher soil acid phosphatase and soil urease tended to be correlated with higher spore density. Soil urease and protease might have a significant effect on arbuscular colonization. Soil protease also had a positive correlation with hyphal and total colonization. Different from other colonization, vesicular colonization had a negative correlation with soil protease. In contrast, available N and available P had a positive correlation with soil enzymes. 【Conclusion】 The results also advised that soil enzymic activities were strongly correlated to AM fungi in desert ecosystem, and that the soil spore density and the distribution of AM fungal colonization were useful indicators for the building and perfecting of index evaluation system of desert soil ecosystem.

Key words: AM fungi; soil enzyme; desert; *Astragalus adsurgens*

AM 真菌能与绝大多数高等植物根系形成稳定的共生体系,在生态系统中被描述为“基石共生体”^[1]。AM 真菌侵染植物根系后扩大了根系的吸收面积,从而促进了植物对矿质养分和水分的吸收^[2],改善了植物磷和微量元素的营养状况,对植物生长不仅具有促进作用,且在一定程度上可提高植物对于干旱和盐碱的抵抗能力^[3]。AM 真菌可在植物根围形成庞大的菌丝网络系统,对于稳定土壤结构,促进生物圈和土壤圈中的氮^[4]、磷^[5]等元素的循环,实现植物根围土壤生态系统的可持续发展具有重要意义^[5]。研究表明,AM 真菌对土壤侵蚀和退化也有一定的遏制作用^[6],对沙化土壤的恢复有很强的促进作用^[3]。

土壤酶是土壤组分中最活跃的有机成分之一,与土壤微生物一起推动土壤的代谢过程,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的方向和强度^[7]。有研究表明,接种丛枝真菌可增强植物根围土壤磷酸酶、脲酶、蛋白酶活性^[6,8],各种酶活性的增加幅度与宿主菌根侵染率显著相关;Dodd 等^[9]发现,受 *Glomus mosseae* 侵染的植物根系和丛枝菌根是磷酸酶的主要来源。

有研究表明,豆科植物不仅能与 AM 真菌形成良好的共生联合体^[3,10],而且能够通过调节根系碳水化合物分配、产生次生代谢物质、改变根际土壤微环境等途径影响 AM 真菌的活动和分布^[11]。隶属于深根系豆科植物的沙打旺 (*Astragalus adsurgens*),不仅抵御风沙能力强,而且还具有耐盐碱、耐瘠薄、抗寒和抗旱等特性,广泛分布在黄土高原和毛乌素沙漠等地区。目前,绝大部分对 AM 真菌与土壤酶之间相互作用的研究主要集中于盆栽试验,对于自然生态环境下,AM 真菌与土壤酶相互作用的关系研究鲜见报道,尤其是在贫瘠干旱的沙漠环境下丛枝菌根与土壤酶相互作用关系的研究更少。为此,本试验以沙打旺为研究对象,对其根围 AM 真

菌空间分布及其与土壤酶等因子的关系进行研究,以期为进一步探讨 AM 真菌与根系共生的生态学意义、进一步筛选优良 AM 真菌菌种和利用菌根生物技术促进荒漠植被恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

在我国北方典型荒漠地区选取陕西靖边(109°06'E, 37°56'N)、宁夏盐池(107°23'E, 37°48'N)、内蒙古包头(108°39'E, 40°45'N)和集宁(113°34'E, 40°56'N)4个样地用于试验。该地区年平均气温 6.0~8.5℃,8月平均气温 22~24℃,年降水量 250~440 mm(主要集中于 7~9月),年均蒸发量 2 000 mm。靖边样地属灰褐土半荒漠;盐池样地属灰钙土半荒漠;包头样地属棕钙土半荒漠;集宁样地属淡栗钙土干草原,土壤 pH 值为 8.5~9.4。

1.2 样品的采集与处理

2007-08月从4个样地中分别随机选取4株沙打旺植株,在距植株主根30cm以内挖土壤剖面,分别从0~10、10~20、20~30、30~40和40~50cm等5个土层采集土壤样品约1kg。将土样装入隔热性能良好的塑料袋中密封带回实验室,一部分土样阴干后4℃冷藏,用于测定土壤酶活性;另一部分土样自然风干,过2mm筛,用于土壤理化成分和AM真菌孢子密度测定。选取直径小于2mm的根样,切成0.5~1cm的根段,用于测定AM真菌定殖率。

1.3 测定项目与方法

土壤碱解N用碱解扩散法测定;土壤速效P用碳酸氢钠-钼锑抗比色法^[12]测定;土壤脲酶用改进的Hoffmann与Teicher比色法^[7]测定,活性以每g风干土中的脲酶在1h内转化尿素产生 NH_4^+-N 的质量(μg)表示;蛋白酶用茆三酮显色法^[7]测定,活性以每g风干土培养1h蛋白酶转化蛋白产生甘氨酸Gly的质量(μg)表示;酸性磷酸酶用改进的Taba-

tabai 和 Brimner 方法^[8]测定,活性以每 g 风干土培养 1 h 酸性磷酸酶转化对硝基苯磷酸二钠(pNPP)的量(μmol)表示。

AM 真菌丛枝、泡囊、菌丝定殖率及总定殖率均按 Phillips 等^[13]的方法测定。根样用清水冲洗 2 次后,置于 100 g/L KOH 溶液中,100 ℃水浴 40 min 后,用 0.5 g/L 酸性品红-乳酸溶液在 100 ℃下染色 20 min。随机选取 50 根 0.5~1 cm 长的根段,40~100 倍镜检。计算 AM 真菌不同结构(丛枝、泡囊、菌丝)的定殖率及总定殖率。

定殖率/%=(AM 真菌感染根段数/检测总根段数) $\times 100\%$

从每份风干土样中称取 25 g,用湿筛倾析-蔗糖离心法分离 AM 真菌孢子^[14],在体视显微镜下记录孢子数量,将每 kg 风干土中的孢子数量计为孢子密

度。各指标重复测 4 次,结果取其平均值。

1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 生物统计分析软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 沙打旺根围 AM 真菌的空间分布

表 1 表明,随土壤深度的增加,沙打旺根围 AM 真菌总定殖率和孢子密度无明显变化规律;包头样地 AM 真菌孢子密度随土层深度的增加而减少;集宁样地 0~30 cm 土层孢子密度无明显变化,30~40 cm 土层最高,40~50 cm 土层最低。4 个样地中,集宁样地平均孢子密度最大,为 8 210 个/kg,显著高于包头样地。

表 1 沙打旺根围 AM 真菌空间分布

Table 1 Spatial distribution of AM fungi in the rhizosphere of *Astragalus adsurgens*

样地 Site	土层/cm Soil Layer	丛枝定殖率/% Arbuscule Colonization	泡囊定殖率/% Vesicule Colonization	菌丝定殖率/% Hypha Colonization	总定殖率/% Total Colonization	孢子密度/(个 $\cdot\text{kg}^{-1}$) Spore density
靖边 Jingbian	0~10	9.70 Bc	45.8 Ba	69.3 Bb	73.0 Bb	8 860 Ab
	10~20	25.7 Ab	60.5 Aa	71.9 Bb	77.6 ABb	7 130 Aa
	20~30	28.5 Ab	57.1 Aa	72.6 ABb	78.3 ABb	3 560 Bb
	30~40	13.5 Bb	64.8 Aa	76.8 Ab	82.0 Ab	2 970 Bb
	40~50	16.5 Bc	59.1 Aa	69.4 Bb	74.4 Bb	3 150 Bb
	平均 Average	18.8 c	57.5 a	72.0 a	77.0 b	5 134 ab
盐池 Yanchi	0~10	33.3 Bb	50.2 Aa	72.8 Bb	78.3 Bb	13 530 Aa
	10~20	44.2 Aa	45.1 Ab	82.1 Aa	88.1 Aa	9 310 Bb
	20~30	47.4 Aa	43.6 ABb	86.1 Aa	92.2 Aa	10 080 Bb
	30~40	34.2 Ba	37.7 Bc	71.6 Bc	76.3 Bc	4 080 Cb
	40~50	26.5 Bb	31.9 Bc	65.7 Cb	69.6 Cb	3 320 Cb
	平均 Average	37.1 ab	41.7 b	75.7 a	80.9 ab	8 064 a
包头 Baotou	0~10	58.2 Aa	48.1 Aa	82.4 Aa	89.5 Aa	3 610 Ac
	10~20	49.0 ABa	44.2 Bb	81.5 Aa	87.7 Aa	1 920 Bb
	20~30	52.2 Aa	42.5 Bb	82.8 Aa	89.1 Aa	1 640 Bb
	30~40	39.9 Ba	50.8 Ab	82.9 Aa	88.9 Aa	1 200 BCc
	40~50	35.7 Ba	48.2 Ab	74.9 Ba	80.5 Ba	940 Cc
	平均 Average	47.0 a	46.8 b	80.9 a	87.1 a	1 862 b
集宁 Jining	0~10	29.5 Bb	32.8 Bb	80.4 Aa	84.6 Aab	7 810 Bb
	10~20	28.0 Bb	35.1 Bc	73.1 Bb	77.3 Ab	8 400 Ba
	20~30	35.9 Ab	37.8 Bb	80.2 Aab	85.1 Aa	7 790 Bab
	30~40	30.6 Ba	46.1 Ab	78.1 Ab	83.1 Ab	10 300 Aa
	40~50	26.3 Bb	49.3 Ab	78.3 Aa	83.3 Aa	6 750 Ba
	平均 Average	30.1 b	40.2 b	78.0 a	82.7 ab	8 210 a

注:同列数据后标不同大写字母表示同一样地不同土层之间差异显著($P<0.05$);标不同小写字母表示同一土层不同样地之间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note:Data with different capital letters in the same column indicate statistically significant differences at $P<0.05$ between layers in the same sample site,and the small letters between sample sites of the same layer. The same as below.

靖边和包头样地 AM 真菌泡囊定殖率随土层深度的增加呈现波动性变化,且在 30~40 cm 土层达最高值,分别为 64.8%和 50.8%;集宁样地 AM

真菌泡囊定殖率随土层深度的增加而增加,在 40~50 cm 土层达到最大值(49.3%);盐池样地 AM 真菌泡囊定殖率随土层深度的增加呈下降趋势。4 个

样地中,靖边样地平均泡囊定殖率最高。

4 个样地中,20~30 cm 土层 AM 真菌丛枝定殖率均显著高于 30~50 cm 土层,且包头样地 0~10 cm 及盐池样地 10~20 cm 土层 AM 真菌丛枝定殖率亦显著高于 30~50 cm 土层。在 0~30 cm,靖边和盐池样地 AM 真菌丛枝定殖率随土层深度的增加而逐渐升高,20~30 cm 土层达到最大值,在 30~50 cm 随土层深度的增加而下降;包头样地 AM 真菌丛枝定殖率随土层深度的增加呈降低趋势。同一土层不同样地之间,包头样地 AM 真菌丛枝定殖率最高,且显著高于靖边和集宁(30~40 cm 土层除外)样地;盐池样地显著高于靖边(0~10 cm 土层除外)样地;在 10~30 cm 土层,盐池样地显著高于集宁样地。包头样地丛枝定殖率平均值显著高于靖边、集宁样地。

AM 真菌总定殖率和菌丝定殖率的空间变化,在各样地之间各不相同。在包头样地,0~40 cm 土层总定殖率和菌丝定殖率均显著高于 40~50 cm 土层;在靖边样地,30~40 cm 土层总定殖率和菌丝定殖率均显著高于 40~50 cm 土层;在盐池样地,0~40 cm 土层的总定殖率和菌丝定殖率显著高于 40~50 cm 土层,10~30 cm 土层 AM 真菌的总定殖率和菌丝定殖率显著高于 0~10 cm 和 30~40 cm 土层。4 个样地同一土层间,包头样地 AM 真菌总定殖率和菌丝定殖率均显著高于靖边样地;0~10 cm 土层,包头样地 AM 真菌菌丝定殖率和总定殖率最高;20~30 cm 土层,盐池样地 AM 真菌菌丝定殖率和总定殖率最高。

2.2 土壤酶活性及土壤氮、磷含量的空间分布

脲酶参与的酶促反应可以产生一种能被植物有效利用的氮源——氨,而且脲酶活性也反映了土壤转化有机态氮为有效态氮及土壤供应无机氮的能力。由表 2 可知,靖边和包头样地 0~20 cm 土层脲酶活性显著高于 20~50 cm 土层;盐池和集宁样地 0~30 cm 土层土壤脲酶活性显著高于 30~50 cm 土层;集宁样地土壤脲酶活性在 10~20 cm 土层达最大值 $21.4 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,在 10~50 cm 随土层深度的增加而降低,且 0~30 cm 土层与 30~50 cm 土层差异显著。靖边样地各土层脲酶活性显著低于其他 3 个样地。在 0~10 cm 土层,盐池样地土壤脲酶活性在 4 个样地所有土层中最高,为 $24.5 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

4 个样地蛋白酶活性平均值存在显著差异。集宁样地土壤蛋白酶活性随土层深度的增加而减小;包头样地 20~30 cm 土层土壤蛋白酶活性在 4 个样

地所有土层中最高,达 $14.6 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。同一土层,蛋白酶活性由大到小依次是包头样地>集宁样地>盐池样地>靖边样地,靖边样地蛋白酶活性显著低于其他 3 个样地,盐池样地蛋白酶活性显著低于包头和集宁样地。

集宁样地的土壤酸性磷酸酶活性平均值显著高于其他 3 个样地。集宁样地 30~40 cm 土层土壤酸性磷酸酶活性在 4 个样地中最高,达 $0.646 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。同一土层中,集宁样地的酸性磷酸酶活性显著高于其他 3 个样地。靖边样地酸性磷酸酶活性随土层深度的增加而减小;4 个样地 0~10 cm 土层酸性磷酸酶活性均显著高于 40~50 cm 土层。

在 4 个样地中,集宁样地碱解 N 含量最高,显著高于其他 3 个样地。靖边、盐池和包头样地碱解 N 最小值均出现在 30~40 cm 土层,集宁样地在 40~50 cm 土层。0~10 cm 土层靖边样地的碱解 N 含量($10.2 \mu\text{g}/\text{g}$)显著低于盐池和集宁样地。形成这种差异的原因可能与样地所处地带有关,靖边、盐池和包头样地处于半荒漠地带,集宁样地处于半荒漠与干草原的交错地带。半荒漠地带的土壤贫瘠、植被单一,沙打旺根系分布可能随土层深度变化比较明显;相对而言干草原地带的养分充足,植被丰富,根系分布较均匀,导致不同深度土层养分变化不明显。

集宁样地速效 P 含量平均值最高($1.73 \mu\text{g}/\text{g}$),盐池样地的 0~10 cm 土层速效 P 含量最高($3.06 \mu\text{g}/\text{g}$)。靖边、盐池和包头样地,0~10 cm 土层速效 P 含量显著高于 40~50 cm 土层,且速效 P 均在 40~50 cm 土层最小。同一土层中,集宁样地速效 P 含量显著高于靖边样地(10~20 cm 土层除外)。

2.3 沙打旺根围 AM 真菌与土壤酶活性及氮、磷含量的相关性

由表 3 可知,AM 真菌孢子密度与泡囊定殖率、菌丝定殖率和总定殖率呈负相关;孢子密度与碱解 N 含量及脲酶和酸性磷酸酶活性呈极显著正相关,与速效 P 含量呈显著正相关。泡囊定殖率与土壤蛋白酶活性呈显著负相关。丛枝定殖率与土壤脲酶活性和蛋白酶活性呈极显著正相关。菌丝定殖率与土壤蛋白酶活性呈极显著正相关,与速效 P 含量呈显著正相关。总定殖率与蛋白酶活性呈极显著正相关,与速效 P 含量呈显著正相关。土壤脲酶、蛋白酶及酸性磷酸酶活性间呈极显著正相关,并分别与碱解 N、速效 P 含量呈极显著正相关。

表 2 沙打旺根围土壤酶、碱解氮、速效磷的空间分布

Table 2 Spatial distribution of soil enzymes, available N and P in the rhizosphere of <i>Astragalus adsurgens</i>						
样地 Site	土层/cm Soil Layer	脲酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Urease	蛋白酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Protease	酸性磷酸酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Acid phosphatase	碱解 N/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Available N	速效 P/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Available P
靖边 Jingbian	0~10	13.5 Ab	5.6 Ac	0.219 Ab	10.2 Ac	0.97 Ac
	10~20	8.50 Ab	6.1 Ac	0.140 ABb	9.70Ac	0.76 Aa
	20~30	6.00 Bc	6.0 Ad	0.124 ABb	8.50 Ac	0.72 Ab
	30~40	5.70 Bb	6.1 Ac	0.093 Bb	7.70 Ab	0.63 Ab
	40~50	4.10 Bb	6.1 Ac	0.074 Bb	8.30 Ab	0.38 Bc
	平均 Average	7.56 b	6.0 d	0.130 b	8.88 c	0.69 a
盐池 Yanchi	0~10	24.5 Aa	9.1 Ab	0.170 Ab	23.7 Ab	3.06 Aa
	10~20	21.6 Aa	9.9 Ab	0.176 Ab	21.7 Ab	1.07 Ba
	20~30	19.8 Aa	8.6 Ac	0.163 Ab	22.7 Ab	1.34 Ba
	30~40	13.3 Ba	9.1 Ab	0.123 ABb	10.6 Bb	0.46 Cb
	40~50	10.5 Ba	8.9 Ab	0.098 Bb	15.3 ABb	0.28 Cc
	平均 Average	17.9 a	9.1 c	0.145 b	18.8 b	1.24 a
包头 Baotou	0~10	24.1 Aa	13.1 Aa	0.144 Ab	12.3 Ac	1.85 Ab
	10~20	19.1 Aa	12.7 Aa	0.089 Bb	7.50 Ac	1.40 ABa
	20~30	15.1 Bb	14.6 Aa	0.095 Bb	8.80 Ac	1.2 0ABa
	30~40	12.1 Ba	12.9 Aa	0.109 ABb	7.18 Ab	1.68 Aa
	40~50	12.1 Ba	12.1 Aa	0.089 Bb	7.35 Ab	0.85 Bb
	平均 Average	16.5 a	13.0 a	0.105 b	8.62 c	1.40 a
集宁 Jining	0~10	19.4 Aab	12.6 Aa	0.632 Aa	56.5 Aa	2.01 Ab
	10~20	21.4 Aa	11.9 Aa	0.644 Aa	47.6 Aa	1.57 Aa
	20~30	20.9 Aa	11.1 Ab	0.642 Aa	40.6 Aa	1.49 Aa
	30~40	16.4 Ba	11.5 Aa	0.646 Aa	41.9 Aa	1.95 Aa
	40~50	13.5 Ba	9.90 Aab	0.504 Ba	36.2 Aa	1.61 Aa
	平均 Average	18.3 a	11.4 b	0.613 a	44.6 a	1.73 a

表 3 沙打旺根围 AM 真菌与土壤酶活性及 N、P 含量的相关系数(n=80)

Table 3 Relativity analysis between arbuscular mycorrhizal fungi and soil enzymes,available N,available P under the canopy of *Astragalus adsurgens* (n=80)

指标 Index	碱解 N 含量 Available N	速效 P 含量 Available P	脲酶活性 Urease	蛋白酶活性 Protease	酸性磷酸酶活性 Acid Phosphatase	孢子密度 Spore density
脲酶活性 Urease	0.398* *	0.466* *	1			
蛋白酶活性 Protease	0.339* *	0.419* *	0.394* *	1		
酸性磷酸酶活性 Acid Phosphatase	0.932* *	0.312* *	0.356* *	0.324* *	1	
孢子密度 Spore density	0.428* *	0.263*	0.461* *	−0.9	0.434* *	1
菌丝定殖率 Hypha Colonization	0.122	0.254*	0.192	0.34* *	0.084	−0.050
泡囊定殖率 Vesicule Colonization	−0.217	−0.045	−0.033	−0.261*	−0.187	−0.059
丛枝定殖率 Arbuscule Colonization	0.008	0.217	0.324* *	0.543* *	−0.029	−0.094
总定殖率 Total Colonization	0.088	0.250*	0.205	0.337* *	0.053	−0.062

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

3 讨论与结论

3.1 丛枝菌根检测指标之间的关系

宿主植物根围土壤酶和土壤理化特性对 AM 真菌的分布和活动有直接影响,同时 AM 真菌的分布和定殖也有一定的空间异质性^[15]。本研究结果显示,在半干旱气候的荒漠地区,沙打旺根围 AM 真菌总定殖率平均在 81.9%,孢子平均密度为5 818 个/kg,说明沙打旺能与 AM 真菌形成良好的共生

关系,丛枝菌根共生体的形成可能是沙打旺适应贫瘠干旱环境的有效对策之一^[10]。

本研究同一土层中,4 个样地的泡囊定殖率有显著差异;同一样地,不同土层之间差异也达显著水平,10~40 cm 土层泡囊定殖率较高,这可能与荒漠地区独特的气候和土壤特性有关。泡囊在丛枝结构接近衰老时开始形成,定殖时间较长,一般作为养分储存和繁殖侵染的器官^[16]在根组织中大量存在。泡囊的这些特点可能也决定了好气性 AM 真菌能

在沙打旺深根系中形成泡囊结构^[17]。

丛枝是菌根最重要的结构,是真菌进入根系皮层细胞内部后进一步延伸的端点,丛枝也是确定 AM 真菌侵染根系形成菌根的必要条件。本试验中,沙打旺根际平均丛枝定殖率为 33.2%,在 20~30 cm 土层均显著高于 30~50 cm 土层,同一土层不同样地之间丛枝定殖率有显著差异,这可能与丛枝菌根对干旱贫瘠的土壤条件产生生态适应性有关^[17]。

本研究中,AM 真菌总定殖率与孢子密度间无显著相关性,这与前人的研究结果一致^[18]。根外孢子的形成表示 AM 真菌生活史的完成,形成的孢子能在土壤中存活较长时间。根外孢子的形成一般受宿主植物生长周期的直接影响较小,但是与 AM 真菌孢子萌发、产孢特性及与宿主根系形成共生关系的程度有关^[19]。

3.2 AM 真菌与土壤因子的关系

本研究结果表明,沙打旺根围 AM 真菌空间分布与土壤酶活性密切相关。这是因为在丛枝菌根形成过程中,AM 真菌菌丝最初侵染的位置是幼嫩的细根^[20],而土壤酶主要来自高等植物根系中细根的顶端^[7,21];AM 真菌对细根的侵染,会影响宿主,促使丛枝菌根分泌土壤酶^[19],或通过根外菌丝分泌土壤酶^[18]。

土壤中磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶,其能将有机磷酸酯水解为无机态的磷酸。丛枝菌根和 AM 真菌成熟的根外菌丝不但可以分泌酸性磷酸酶^[9],而且根外菌丝作为细根的延伸,增加了根系表面积,可以辅助根系吸收土壤中的磷^[8]。本研究结果显示,集宁样地土壤酸性磷酸酶活显著高于其他样地,这可能与集宁样地处于干草原地带的土壤类型(淡栗钙土)及其氮、磷含量较丰富有关。速效 P 含量与酸性磷酸酶活性呈极显著正相关,这验证了前人的观点^[9,15]。AM 真菌孢子密度与酸性磷酸酶极显著相关,这可能与根外孢子的形成过程^[20]或孢子外表面共生的微生物^[22]有关。

本研究中,孢子密度、丛枝定殖率与脲酶呈极显著正相关,这可能与 AM 真菌的生长发育和生态功能有关,即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、菌丝和丛枝结构的主要作用是辅助细根吸收转移无机氮、磷等元素^[20];孢子密度与碱解 N、速效 P 也呈显著正相关,与前人的研究结果^[10,17]一致。荒漠地区土壤碱解 N、速效 P 含量较农田或草原含量低,土壤透气性好,有利于 AM

真菌产生孢子和丛枝结构,有利无机氮的吸收交换^[16],从而提高了沙打旺的耐贫瘠性^[3]。

土壤蛋白酶在功能上与脲酶类似,直接参与土壤含氮有机化合物(主要是蛋白质)的转化,其活性强度常用来表征土壤氮素供应强度。本试验中,菌根各个结构的定殖率与土壤蛋白酶活性呈显著相关性,说明土壤蛋白酶与各种菌根结构的功能密切相关。这也从土壤酶的角度说明了丛枝菌根在氮元素转化、转运中的独特作用^[23]。

本研究结果表明,AM 真菌定殖率及孢子密度与样地生态条件密切相关,特别是与土壤酶活性有密切联系,这一方面说明土壤因子对 AM 真菌在植物根系中的侵染、定殖产生了影响^[24],另一方面也说明丛枝菌根通过土壤酶的作用增加了土壤有效成分,改善了土壤结构。因此,AM 真菌孢子密度和菌根不同结构的定殖程度,可作为检测荒漠土壤生态系统环境状况的有效指标。通过检测 AM 真菌孢子密度和菌根不同结构的定殖程度及其与土壤酶的关系,可以更全面地认识荒漠地区 AM 真菌的生态作用和意义,也有助于土壤生态系统评价体系中生物酶和微生物指标的建立和完善,为菌根生物技术在荒漠植被恢复和生态重建中的应用提供理论依据。

〔参考文献〕

- [1] O'Neill E G, O'Neill R V, Norby R J. Hierarchy theory as a guide to mycorrhizal research on large-scale problems [J]. Environmental Pollution, 1991, 73: 271-284.
- [2] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. 2nd Edition. London: Academic Press, 1995: 1-889.
- [3] 杨宏宇, 赵丽莉, 贺学礼. 丛枝菌根在退化生态系统恢复和重建中的作用 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 836-841.
Yang H Y, Zhao L L, He X L. Function of arbuscular mycorrhiza in the restoration and reconstruction of degraded ecosystems [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(6): 836-841. (in Chinese)
- [4] Egerton-Warburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal fungal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient [J]. Ecological Applications, 2000, 30: 70-102.
- [5] Tarafdar J C, Marschner H. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26: 387-395.
- [6] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 等. 构树 (*Broussonetia papyrifera*) 幼苗氮、磷吸收对接 AM 真菌的响应 [J]. 生态学报, 2007, 24(11): 4840-4847.
He Y J, Zhong Z C, Liu J M, et al. Response of N and P absorp-

- tion on *Broussonetia papyrifera* seedlings to inoculate vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 24(11): 4840-4847. (in Chinese)
- [7] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Zhou L K. Soil enzymology [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [8] 宋勇春, 李晓林, 冯 固. 菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草生境中土壤有机磷亏缺的影响 [J]. *生态学报*, 2001(7): 1130-1135.
Song Y C, Li X L, Feng G. Effect of phosphatase activity on soil organic phosphorus loss in the environment of clover growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001(7): 1130-1135. (in Chinese)
- [9] Dodd J C, Burton C C, Burns R G, et al. Phosphatase activity associated with the roots and the rhizosphere of plants infected with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *New Phytologist*, 1987, 107: 163-172.
- [10] 贺学礼, 赵丽莉, 杨宏宇. 毛乌素沙地豆科植物丛枝真菌分布研究 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 684-688.
He X L, Zhao L L, Yang H Y. Study on the distribution of arbuscular mycorrhizal fungal infections of legumes species in Maowusu sandy land [J]. *Progress in Natural Sciences*, 2006, 16(6): 684-688. (in Chinese)
- [11] 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.
Lu R K. Methods for soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [12] Bever J D, Morton J, Antonovics J, et al. Host-dependent sporulation and species diversity of mycorrhizal fungi in a mown grassland [J]. *Journal of Ecology*, 1996, 75: 1965-1977.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 苏友坡, 林 春, 张福锁, 等. 不同 AM 菌根菌分泌的磷酸酶对根际土壤有机磷的影响 [J]. *土壤*, 2003, 35(4): 334-338.
Su Y B, Lin C, Zhang F S, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on phosphatase activities and soil organic phosphate content in clover rhizosphere [J]. *Soils*, 2003, 35(4): 334-338. (in Chinese)
- [16] 丁 蕾, 胡海波, 王人潮. 半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(2): 13-18.
Ding H, Hu H B, Wang R C. The relationships between soil enzyme activity and soil physical-chemical properties or microbial biomass in semi-arid area [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2007, 31(2): 13-18. (in Chinese)
- [17] He X L, Mouratov S, Steinberger Y. Spatial distribution and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi under the canopies of desert halophytes [J]. *Arid Land Research & Management*, 2002, 16(2): 149-160.
- [18] 安秀娟, 贺学礼. 土壤因子对毛乌素沙地豆科植物 AM 真菌侵染的影响 [J]. *河北农业大学学报*, 2007, 30(1): 45-49.
An X J, He X L. Influence of soil factors on arbuscular mycorrhizal fungal infections of four legumes species in Maowusu sandy land [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2007, 30(1): 45-49. (in Chinese)
- [19] 贺学礼, 李生秀. 陕西农田土壤中 VA 菌根真菌资源及生态分布 [J]. *菌物系统*, 1999, 18(3): 337-340.
He X L, Li S X. Resources ecological distribution of VA mycorrhizal fungi in cultivated soil from Shaanxi [J]. *Mycosystema*, 1999, 18(3): 337-340. (in Chinese)
- [20] 刘润进, 陈应龙. 菌根学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10-171.
Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 10-171. (in Chinese)
- [21] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine root production in forest ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 131-139.
- [22] Roesti D, Ineichen K, Braissant O, et al. Bacteria associated with spores of the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus geosporum* and *Glomus constrictum* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 11: 6673-6679.
- [23] Manjula G, Philip E P, Jin H R, et al. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. *Nature*, 2005, 435: 819-823.
- [24] Jitendra P, Tarafdar J C. Arbuscular mycorrhizal fungal dynamics under *Mitragyna parvi folia* (Roxb.) Korth. in Thar Desert [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34: 200-208.