

毛乌素沙地克隆植物沙鞭生长对 AM 真菌生态分布的影响

贺学礼^{1,*}, 李英鹏^{1,2}, 赵丽莉¹, 刘雪伟¹

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

摘要:从毛乌素沙地沙鞭群落间隔空地沙鞭根状茎延伸方向设置样地, 2007 年 5 月、7 月和 10 月在 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, 研究了 AM 真菌时空分布及沙鞭侵入间隔空地前后对 AM 真菌分布的影响。结果表明, 沙鞭能与 AM 真菌形成良好共生关系, 菌根结构为中间型(I-型), AM 真菌定殖率和孢子密度有明显的时空分布规律, 并与土壤因子密切相关。随采样时间后延 AM 真菌定殖率先增后降, 最大值出现在 7 月份; 孢子密度先降后增, 最大值出现在 10 月份。土壤采样深度对 AM 真菌定殖和孢子密度有显著影响, AM 真菌最高定殖率和最大孢子密度均出现在 0—20 cm 浅土层。孢子密度仅与泡囊定殖率显著正相关。土壤速效 N 与菌丝和总定殖率极显著负相关; 土壤温度与泡囊、丛枝、菌丝和总定殖率显著和极显著正相关, 与孢子密度显著负相关; 土壤湿度与丛枝、菌丝和总定殖率显著正相关, 与孢子密度显著负相关。克隆植物沙鞭的生长对土壤 AM 真菌活动和分布有很大影响, 沙鞭入侵前后样地中 AM 真菌孢子密度和定殖率变化显著。
关键词:AM 真菌; 生态分布; 克隆植物; 沙鞭; 毛乌素沙地

Effects of the growth of clonal plant *Psammochloa villosa* Trin. on ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in Mu Us Sandland

HE Xueli¹, LI Yingpeng^{1,2}, ZHAO Lili¹, LIU Xuewei¹

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

2 Xinxiang Municipal Bureau of Agriculture, Xinxiang 453003, China

Abstract: The sampling plots represented the typical *Psammochloa villosa* community and were chosen based on the presence of *P. villosa* to investigate the effects of its clonal growth on the distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in Mu Us sandland. The plots were established in May and sampled in May, July and October 2007. Soil samples 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 results showed that a functional symbiont is formed between AM fungi and *P. villosa*, with an intermediate mycorrhizal type. AM fungal colonization significantly ($P < 0.05$) increased initially and later decreased with sampling time, peaking in July. Spore density showed an inverted pattern of development and maximum numbers were recorded in October. The soil sampling depth had a significant ($P < 0.05$) effect on spore density and colonization of AM fungi with the highest percent colonization and spore density in the two topmost sections i. e., 0—20 cm. Spore density was significantly ($P < 0.05$) and positively correlated with vesicular colonization. Soil available N content was significantly ($P < 0.01$) and negatively correlated with hyphal and total root colonization. Soil temperature was significantly ($P < 0.05$) and positively correlated with vesicular, arbuscular, hyphal and total colonization, but had a significantly ($P < 0.05$) negative effect on spore density. Soil moisture was significantly ($P < 0.05$) and positively correlated with arbuscular, hyphal and total colonization but significantly ($P < 0.05$) and negatively correlated with spore density. The results suggest that the clonal growth of *P. villosa* has an influence on the colonization activity and spore density of AM fungi.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670371, 40471075)

收稿日期:2008-11-15; **修订日期:**2009-04-04

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

Key Words: AM fungi; ecological distribution; clonal plant; *Psammochloa villosa*; Mu Us sandland

丛枝菌根 (Arbuscular mycorrhiza, 简称 AM) 真菌广泛分布于自然界, 是自然生态系统的重要组成部分, 对植物根系具有广泛侵染性, 能够促进宿主植物对养分和水分的吸收与利用, 调节宿主体内代谢, 提高抗逆性和成活率^[1-3], 特别是在植物根际形成庞大菌丝网络系统, 能够提高土壤团聚体稳定性, 改善土壤理化性状, 在生态系统保护、恢复和重建中发挥着重要作用^[4-6]。

克隆植物是指在定居前期通过与母株相连的芽、分蘖或枝条等繁殖体产生无性繁殖的植物。克隆植物具有生长的空间拓展性—觅食行为和宽广的生态对策谱, 较非克隆植物具有较强适应恶劣环境的能力和生存竞争能力, 在更新、恢复生态过程中有明显优势^[7-8]。沙鞭 (*Psammochloa villosa* Trin. Bor) 属于禾本科沙鞭属植物, 主要分布在我国陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆和内蒙古等省区及蒙古国境内, 是草原带、荒漠草原带及荒漠地区流动沙丘上特有的一类先锋植物, 其根系发达, 具有强耐旱和无性繁殖能力^[9], 通过其根状茎和分株的快速扩展实现对风蚀流动、半流动沙丘的固定, 使生境条件得以改善, 为其他物种定居提供了可能^[10]。

在自然群落中, 许多克隆植物能够与 AM 真菌形成共生关系^[11-14]。目前, 有关沙生克隆植物地理分布、生理生态方面的研究时有报道^[8,10], 但有关沙生克隆植物与 AM 真菌共生关系的研究甚少^[11,13], 特别是克隆植物生长对土壤 AM 真菌分布和活动影响的研究未见报道。本研究选取毛乌素沙地样地系统研究了自然条件下克隆植物沙鞭生长对 AM 真菌时空分布的影响, 以便为充分利用 AM 真菌资源促进沙鞭生长和植被恢复提供依据。

1 研究区域概况与研究方法

研究样地选在中国科学院植物研究所内蒙古鄂尔多斯沙地草地生态试验站。该站 (39°02'N, 109°51'E) 位于内蒙古自治区鄂尔多斯高原南部, 海拔 1355m, 年均气温 6.0—8.5℃, 年均降水量 358.3mm, 且主要集中在 6—9 月份。土壤以淡栗钙土和沙性淡栗钙土为主。

沙丘样地上生长着沙鞭群落, 群落内有较大的间隔空地, 这些间隔空地的植物再生动态必将受到其周围其他植物的影响, 与之形成共生关系的 AM 真菌分布和活动也会发生变化。2007 年 5 月在样地沙鞭群落内空地上, 沿沙鞭根状茎延伸方向分别随机选取 4 个 1 m² 样地。标记后按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50cm 共 5 个土层分别采集土样, 测定土壤温度和湿度, 样品编号后装入塑料袋密封, 并在 2007 年 7 月和 10 月份在标记的空地上分 5 个土层各采样 1 次, 重复 4 次。土样带回实验室过 2mm 筛, 用于土壤理化性质和 AM 真菌孢子观测, 收集的根样切成 1cm 根段, 用于 AM 真菌定殖率测定。

AM 真菌定殖率按 Phillips 和 Hayman^[15] 方法测定。从每份土样中称取 25g 风干土, 用湿筛倾析—蔗糖离心法分离 AM 真菌孢子^[16], 在体视显微镜下记录孢子数量, 将每 100g 风干土中的孢子量定义为孢子密度。土壤有机质用重铬酸钾氧化法, 土壤速效 N 用碱解扩散法, 土壤速效 P 用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定^[17]。

采用 SPSS13.0 生物统计分析软件对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 丛枝菌根共生体结构

沙鞭为须根系, 在横走根状茎上产生大量侧生根, 其外覆浓密的毛细根。显微观察发现, 沙鞭侧生根和毛细根均能被 AM 真菌侵染, 并能形成大量菌丝、泡囊和丛枝, 侵染率高达 70% 以上, 丛枝菌根结构为 I-型。大量胞间菌丝沿侧生根细胞间隙延伸生长, 一直扩展到侧生根和毛细根整个根尖分生区 (图 1:1, 2), 同时根细胞内有胞内圈状菌丝圈 (图 1:2, 5)。胞内菌丝在侧生根和毛细根上均能发育形成树枝状和花椰菜状 (图 1:3, 4) 丛枝结构, 但以树枝状为主。有的丛枝在分解过程中能形成隔膜, 有的在分解后的残屑中遗留有油滴。随着菌丝不断延伸, 胞内菌丝和胞间菌丝顶端膨大发育形成泡囊 (图 1:1, 7), 大部分为圆形、椭圆形、棒形, 偶有不规则形等。有的根内形成大量泡囊并连续成片, 有的根内泡囊储有浓厚营养物质。根系表面附有丰富的根外菌丝 (图 1:6)。在一定发育阶段菌丝顶端可形成根内孢子、根外孢子和孢子果 (图 1:7, 8)。

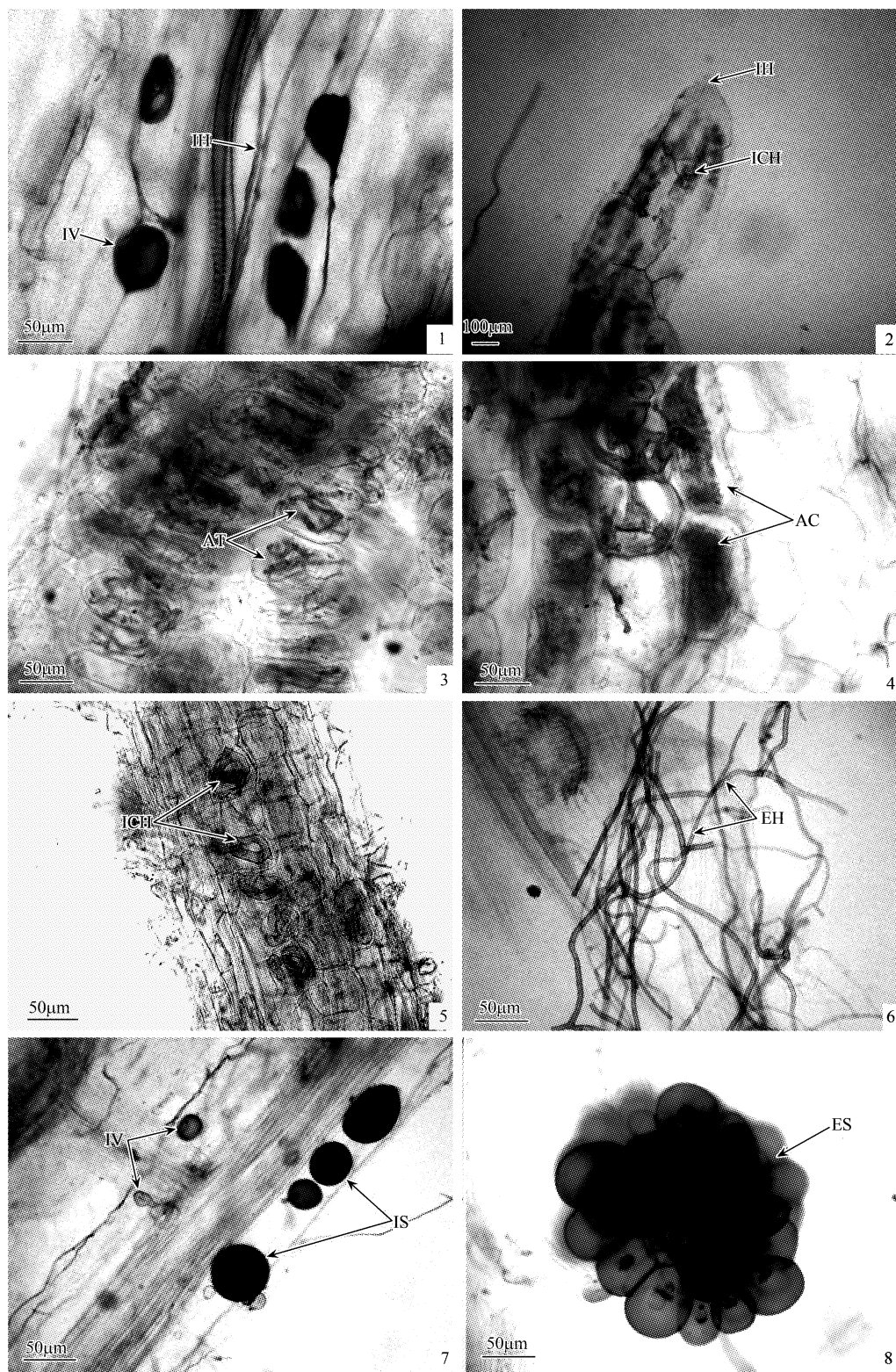


图 1 沙鞭菌根形态结构

Fig. 1 The mycorrhizal structure of *Psammochloa villosa*

1. 胞间菌丝 (IH) 和孢囊 (IV); 2. 侵入毛细根尖的胞间菌丝 (IH) 和圈状菌丝 (ICH); 3. 树枝状丛枝 (AT); 4. 花椰菜状丛枝 (AC); 5. 胞内菌丝圈 (ICH); 6. 根外菌丝 (EH); 7. 根内孢子 (IS) 和孢囊; 8. 根外孢子果 (SP)

2.2 AM 真菌时空分布

AM 真菌泡囊、丛枝、菌丝和总定殖率在时间分布上变化一致,随采样时间后延各菌根结构先升后降,月份间差异显著。随着土层加深,各菌根结构定殖率也表现先升后降趋势。泡囊和丛枝定殖率最大值出现在7月份10—20cm 土层,菌丝和总定殖率最大值在7月份0—10cm 土层。泡囊定殖率在0—20cm 土层显著高于20—50cm 土层,丛枝定殖率在0—30cm 土层显著高于30—50cm 土层。孢子密度随月份增加先降后升,5月份和10月份显著高于7月份;随土层加深先降后升,最大值为91.25 个/100g 土,出现在10月份0—10cm 土层,0—10cm 土层显著高于20—40cm 土层(表1,表2)。

表1 沙鞭群落空地 AM 真菌和土壤因子时间分布

Table 1 Temporal distribution of AM fungi and soil factors in the vacant land of *Psammochloa villosa* community

月份 Month	泡囊定殖率/% Vesicule	丛枝定殖率/% Arbuscule	菌丝定殖率/% Hypha	总定殖率/% Total	孢子密度/(No./100g soil) Spore density
5	5.45c	1.34c	15.66c	16.03c	42.00a
7	22.83a	18.50a	61.72a	63.82a	18.75b
10	19.15b	3.23b	43.92b	45.23b	47.5a
月份 Month	有机质/% Organic matter	速效 P/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Available P	速效 N/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Available N	土壤温度/°C Soil temperature	土壤湿度/% Soil moisture
5	0.56c	1.15b	7.76a	15.22b	1.72b
7	0.78b	1.29a	5.64b	30.01a	2.12a
10	0.88a	1.22ab	5.50b	10.88b	2.02a

表1 数据由4个重复各5个土层总共20个样品得出的平均值;同一列数据中字母不同者表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

2.3 土壤因子时空分布

沙鞭群落空地土壤因子随沙鞭根系侵入表现出明显的时空变化规律(表1,表2)。土壤有机质含量随月份和土层增加而增加,各月份间差异显著,最大值0.97%出现在10月份40—50cm 土层,0—10cm 土层显著低于30—50cm 土层。土壤速效P随月份增加先升后降,7月份显著高于5月份;随土层加深先降后升,最大值为1.51 $\mu\text{g}/\text{g}$,出现在5月份0—10cm 土层,0—10cm 土层显著高于其它土层。土壤速效N随月份增加而下降,5月份显著高于7月份和10月份,而7月份与10月份无显著差异;随土层加深先降后升,最大值9.24 $\mu\text{g}/\text{g}$ 出现在5月40—50cm 土层,0—10cm 和40—50cm 土层显著高于10—40cm 土层。

土壤温度随月份增加先升后降,7月份显著高于5月份和10月份,5月份和10月份无显著差异;随土层加深而下降,0—10cm 土层显著高于20—50cm 土层,各个土层在月份间差异显著。土壤湿度随月份增加先升后降,7月份和10月份显著高于5月,7月份和10月份无显著差异;随土层加深而增加,30—50cm 土层显著高于0—10cm 土层。

2.4 相关性分析

由表3可知,AM 真菌孢子密度与总定殖率无显著相关性,但与泡囊定殖率显著正相关。土壤速效N与菌丝和总定殖率极显著负相关;土壤温度与泡囊、丛枝、菌丝和总定殖率显著和极显著正相关,与孢子密度显著负相关;土壤湿度与丛枝、菌丝和总定殖率显著正相关,与孢子密度显著负相关。

3 讨论与结论

3.1 AM 真菌定殖

试验结果表明,AM 真菌平均定殖率为42%,最高为73.2%,平均孢子密度为36 个/100g 土,最高为91.3 个/100g 土。说明毛乌素沙地生长的沙鞭能与AM 真菌形成良好共生关系,而菌根的形成可能是沙鞭适应干旱贫瘠环境的有效对策之一。

AM 真菌分布和活动受地理环境、宿主植物和真菌特性、根域微环境以及其它未知因素等多种潜在机制共同影响^[18-19]。本试验中,土壤采样深度对AM真菌定殖率影响不大,但对孢子密度有显著影响,最大定殖

表 2 沙鞭群落空地 AM 真菌和土壤因子时空分布

Table 2 Spatio-temporal distribution of AM fungi and soil factors in the vacant land of <i>Psammochloa villosa</i> community						
土层/cm Soil layer	月份 Month	泡囊定殖率/% Vesicule	丛枝定殖率/% Arbuscule	菌丝定殖率/% Hypha	总定殖率 / % Total	孢子密度 /(No. /100g soil) Spore density
0—10	5	11.72c	1.10b	18.84c	19.2c	67.00b
	7	24.75b	16.93a	70.29a	73.16a	20.00c
	10	33.48a	2.07b	48.76b	50.11b	91.25a
	均值 Average	23.32A	9.50A	45.96A	47.49A	59.42A
10—20	5	13.33c	2.00c	22.47b	24.37b	37.00a
	7	35.32a	24.43a	61.91a	62.36a	25.00b
	10	27.34b	7.23b	57.23a	57.75a	47.50a
	均值 Average	25.33A	11.22A	47.20A	48.16A	36.50AB
20—30	5	3.75c	1.25b	15.17c	15.17c	30.00a
	7	24.64a	22.53a	62.11a	62.82a	16.25b
	10	9.90b	2.83b	38.56b	42.73b	25.00ab
	均值 Average	12.76B	8.87A	38.61A	40.24A	23.75B
30—40	5	4.03b	1.67b	16.60b	16.60b	25.00ab
	7	16.4a	13.23a	44.29a	47.98a	16.25b
	10	12.5a	2.50b	43.10a	43.10a	30.00a
	均值 Average	10.98B	5.80B	34.66A	35.89A	23.75B
40—50	5	0.37b	0.75b	6.91c	6.91c	51.00a
	7	13.02a	15.34a	69.99a	72.77a	16.25b
	10	12.57a	1.5b	31.99b	32.49b	43.75a
	均值 Average	8.65B	5.86B	36.30A	37.39A	37.00AB
土层 /cm Soil layer	月份 Month	有机质 / % Organic matter	速效 P /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Available P	速效 N /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Available N	土壤温度 /℃) Soil temperature	土壤湿度 / % Soil moisture
0—10	5	0.53b	1.51a	7.56a	17.38b	1.50b
	7	0.81a	1.34b	6.51ab	34.60a	2.13a
	10	0.74a	1.22c	5.53b	12.50c	1.62ab
	均值 Average	0.69B	1.36A	6.53A	21.49A	1.75B
10—20	5	0.57b	0.97c	7.00a	14.45b	1.73b
	7	0.76a	1.18b	5.60b	32.70a	2.25a
	10	0.81a	1.39a	5.40b	11.78c	1.9b
	均值 Average	0.71AB	1.18B	6.00B	19.64AB	1.96AB
20—30	5	0.50c	0.98c	7.56a	14.23b	1.7b
	7	0.71b	1.2b	5.74b	29.65a	2.18a
	10	0.95a	1.35a	5.35b	10.24c	2.02a
	均值 Average	0.72AB	1.18B	6.22B	18.04BC	1.97AB
30—40	5	0.58b	1.07b	7.42a	14.70b	1.87b
	7	0.87a	1.35a	5.39b	27.53a	2.00ab
	10	0.94a	1.15b	5.60b	9.82c	2.22a
	均值 Average	0.80A	1.19B	6.14B	17.35BC	2.03A
40—50	5	0.62c	1.17b	9.24a	15.35b	1.77b
	7	0.74b	1.42a	4.97b	25.58a	2.05ab
	10	0.97a	0.99c	5.60b	10.10c	2.34a
	均值 Average	0.78A	1.19B	6.60A	17.01C	2.05A

表中数据由 4 个重复分别在 5 个土层得出的平均值；同一列数据中大写字母不同者表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,同一列同一土层数据中小写字母不同者表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

表 3 沙鞭群落空地 AM 真菌与土壤因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis between AM fungi and soil factors in the vacant land of *Psammodochloa villosa* community

项目 Item	有机质 Organic matter	速效 P Available P	速效 N Available N	土壤温度 Soil temperature	土壤湿度 Soil moisture	孢子密度 Spore density
总定殖率 Total	0.264	0.231	-0.466 **	0.686 **	0.334 *	0.068
菌丝定殖率 Hypha	0.242	0.24	-0.440 **	0.675 **	0.333 *	0.074
泡囊定殖率 Vesicule	0.048	0.081	-0.206	0.342 *	0.223	0.323 *
丛枝定殖 Arbuscule	0.03	0.068	-0.259	0.490 **	0.31 *	-0.127
孢子密度 Spore density	-0.118	-0.052	0.096	-0.368 *	-0.354 *	1

表中数值为 AM 真菌定殖与土壤因子的相关性系数; * 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

率和孢子密度均出现在 0—20cm 土层,并随土层加深而下降。这可能与沙鞭根系类型、真菌特性及沙质生境有关。沙鞭的每一根茎节都产生不定根,不定根分枝较少,木质化程度低,常分布在 20—40cm 沙土层,连续的不定根系层具有固沙保水作用^[10],能在根系层及根际产生良好的水热和养分微域环境,从而为 AM 真菌活动和定殖创造了条件。同时沙鞭作为“游击型”克隆植物^[20],其根茎扩展需要消耗大量矿质营养和水分,而 AM 真菌对整个根系侵染的菌根效应正符合沙鞭的需求。在每一土层根段显微观察中均能见到大量根外菌丝(图 1:6)就证明了这一点。关于自然条件下 AM 真菌定殖程度与产孢能力的关系,目前仍存在不同的试验结果。有些研究表明,AM 真菌最高定殖率常伴随有最大孢子密度^[21-22],而另一些研究结果则相反^[23-24]。本试验中 AM 真菌菌丝和总定殖率与孢子密度无显著相关性,但泡囊定殖率与孢子密度显著正相关,这在其它研究中也类似结果^[22],可能与菌根不同结构发育和功能有关。泡囊作为真菌的碳源,可以为孢子形成提供营养,也可作为繁殖器官如孢子一样在根内和土壤中长期保持活力。

3.2 AM 真菌与土壤因子的关系

沙鞭群落空地土壤速效 N、土壤温度和湿度与 AM 真菌定殖率和孢子密度有显著或极显著相关性,说明 AM 真菌活动与土壤因子密切相关,这与其它研究结果相一致^[2,18,21]。AM 真菌能够增加植物对氮的吸收已被证实,其根外菌丝能够从土壤中直接吸收和转运 NH_4^+ 、 NO_3^- 和氨基酸^[1]。AM 真菌定殖率与土壤速效 N 极显著的相关性表明菌根在沙鞭根系氮的吸收过程中扮演着十分重要的角色。

本试验中土壤温度和湿度对 AM 真菌的影响较其它因子更为明显。较高的温度和水分条件有利于 AM 真菌生长发育,但不利于产孢。这可能与所处位置水热同季的气候特点对 AM 真菌的直接影响和对沙鞭的间接作用有关。在雨季里光照强度大,降水充足,导致植物光合效率提高,进而增加光合产物向根部和 AM 真菌的供应,促进了菌根的生长发育;但过量降水会使土壤含水量处于饱和状态,导致极差的土壤通透性,这对好气性 AM 真菌的繁殖具有显著抑制作用。此外,是否与该条件下 AM 真菌特定生理种群的效应及作用机制等有关,还有待进一步研究。

3.3 克隆植物生长对 AM 真菌的影响

沙鞭入侵群落空地前后样地中 AM 真菌定殖率和孢子密度变化明显。随着沙鞭克隆生长,其根状茎逐渐入侵附近土地,使得空地中的 AM 真菌孢子迅速萌发,菌丝侵入沙鞭根组织形成共生关系。但 5 月份的毛乌素沙地气温较低,根系生长缓慢,孢子萌发和侵染能力低,致使菌根各个结构定殖率均为最低值。7 月份为该地区的雨季,随着土壤湿度加大,一方面沙鞭旺盛生长,产生大量幼嫩根,利于 AM 真菌侵染,另一方面大量孢子萌发,菌根各个结构定殖率均达到最大值,而孢子密度降为最小值。特别是作为植物和真菌营养物质交换场所的丛枝大量出现,充分反映了沙鞭克隆生长和 AM 真菌在资源获取方面的相互作用。10 月份随着沙鞭生长成熟进入衰退期,根系生长减缓,菌根各个结构均有所降低,而植株地上部和根系营养消耗的降低,致使供给 AM 真菌的营养增加,利于产孢,孢子密度达到最大值。此阶段孢子数量多可能也与其作为静止繁殖器官,生长发育较晚,主要发生在植物生长后期和存在于植物老根内有关^[1]。而且,克隆植物的生长直接影响着其附近土壤中 AM 真菌的生长发育,从而对改善土壤条件有重要作用。

试验结果表明,AM 真菌不同定殖结构和孢子密度与土壤因子密切相关,特别是与土壤速效 N、土壤温度、土壤湿度呈正相关或负相关。因此,在评估沙鞭群落土壤生态系统和沙鞭形成菌根的能力时,AM 真菌孢子密度、不同菌根结构定殖程度是十分有用的指标。同时,系统研究 AM 真菌分布和定殖,筛选适合土壤—植物—菌根最佳组合的优势菌种,可为菌根化育苗和荒漠植被恢复提供材料和依据。

References:

- [1] Smith S E, Read D J. Mineral, nutrition, heavy metal accumulation and water relations of VA mycorrhizal plants. *Mycorrhizal Symbiosis*, 2nd edn. London: Academic Press, 1997: 11-33, 105-160.
- [2] He X L, Zhao F G, Li B, Sun W. Effects of AM fungi on the growth and chemical composition of tobacco leaf under different P levels. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 761-764.
- [3] 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: 188-193.
- [4] Wright S F, Upadhyaya A A. Survey of soils for aggregate stability and glomalina glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhiza fungi. *Plant and Soil*, 1998, 198: 97-107.
- [5] Bearden B N, Petersen L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. *Plant and Soil*, 1999, 218: 173-183.
- [6] Yang H Y, Zhao L L, He X L. Function of arbuscular mycorrhiza in the restoration and reconstruction of degraded ecosystems. *Arid Land Geography*, 2005, 28: 836-841.
- [7] Alpert P. Nutrient sharing natural clonal fragments of *Fragaria chiloensis*. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 395-406.
- [8] Jiang G M, Dong M. A comparative study on photosynthesis and water use efficiency between clonal and non-clonal plant species along the Northeast China Transect (NECT). *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(18): 855-863.
- [9] Yin Z B. *Gehas Psammochloa villosa* // Ma Y Q. Flora of Inner Mongolia (vol. 15), 2nd edn. Huhhot: Inner Mongolia. People Press, 1994: 115-152.
- [10] Chen Y F, Yu F H, Zhang C Y, Dong M. Role of clonal growth of the rhizomatous grass *Psammochloa villosa* in patch dynamics of Mu Us sandy land. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1745-1750.
- [11] Onipchenko V G, Zobel M. Mycorrhiza, vegetative mobility and responses to disturbance of alpine plants in the Northwestern Caucasus. *Folia Geobotanica*, 2000, 35: 1-11.
- [12] Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders I R. Clonal growth traits of two *Prunella* species are determined by co-occurring arbuscular mycorrhizal fungi from a calcareous grassland. *Journal of Ecology*, 1997, 85: 181-191.
- [13] Streitwolf-Engel R, Van der Heijden M G A, Wiemken A, Sanders I R. The ecological significance of arbuscular mycorrhizal fungal effects on clonal reproduction in plants. *Ecology*, 2001, 82: 2846-2859.
- [14] Watson M A, Scott K, Griffith J, Dieter S, Jones C S, Nanda S. The developmental ecology of mycorrhizal associations in mayapple, *Podophyllum peltatum*, Berberidaceae. *Evolutionary Ecology*, 2002, 15: 425-442.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Agricultural Chemistry Committee of Soil Science Society of China. *Conventional Methods for the Agricultural Chemical Analysis of Soil*. Beijing: Science Press, 1983.
- [18] Lorigia 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.
- [19] Eom A H, Hartnett D C, Wilson G W T. Host plant species effects on arbuscular mycorrhizal fungal communities in tallgrass prairie. *Oecologia*, 2000, 122: 435-444.
- [20] Dong M, Alateng B, Xing X R, Wang Q B. Genet features and ramet population features in the rhizomatous grass species *Psammochloa villosa*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 23(4): 302-310.
- [21] 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.
- [22] He X L, Zhao L L, Yang H Y. Colonization of arbuscular mycorrhizal fungi from the rhizosphere of legume species in Mao wu su Sandland. *Progress*

in Natural Science, 2006, 16(6): 684-688.

- [23] Friese C F, Koske R E. The spatial dispersion of spores of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in a sand dune: Microscale patterns associated with the root architecture of American beachgrass. *Mycological Research*, 1991, 95: 952-957
- [24] Fontenla S, Godoy R, Rosso P. Root associations in Austrocedrus forests and seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizas. *Mycorrhiza*, 1998, 8: 29-33.

参考文献:

- [2] 贺学礼,赵方贵,李斌,孙渭. AM 真菌和施磷量对不同叶位烟叶生长和化学成分的交互效应. *应用生态学报*, 2001, 12 (5): 761-764.
- [3] 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.
- [6] 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. *干旱区地理*, 2005, 28: 836-841.
- [8] 蒋高明,董鸣. 沿中国东北带 (NECT) 分布的若干克隆植物与非克隆植物光合速率与水分利用效率的比较. *植物学报*, 2000, 42 (18): 855-863.
- [9] 音扎布. 沙鞭属//马毓泉主编. 内蒙古植物志(第五卷), 第二版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1994. 115-152.
- [10] 陈玉福,于飞海,张称意,董明. 根茎禾草沙鞭的克隆生长在毛乌素沙地斑块动态中的作用. *生态学报*, 2001, 21 (11): 1745-1750.
- [17] 中国土壤学会农业专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983.
- [20] 董鸣,阿拉腾宝,邢雪荣,王其兵. 根茎禾草沙鞭的克隆基株及分株种群特征. *植物生态学报*, 1999, 23 (4): 302-310.
- [22] 贺学礼,赵丽莉,杨宏宇. 毛乌素沙地豆科植物丛枝菌根真菌分布研究. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 684-688.