

# 内蒙古荒漠沙柳AM真菌物种多样性

杨 静 贺学礼\* 赵丽莉

(河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

**摘要:** 分别于2009年5月、8月和10月在内蒙古黑城子、正蓝旗和元上都3个样地采集沙柳(*Salix psammophila*)根围0–50 cm土层土样, 研究了AM真菌群落组成及其生态分布特点。在分离的4属37种AM真菌中, 球囊霉属(*Glomus*)23种, 无梗囊霉属(*Acaulospora*)10种, 这两属是3样地共同优势属; 盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*)3种, 仅分布在黑城子和正蓝旗样地; 巨孢囊霉属(*Gigaspora*)1种, 仅分布在正蓝旗样地; 网状球囊霉(*G. reticulatum*)是3样地共同优势种。AM真菌种丰度、均匀度指数、Shannon多样性指数、Simpson多样性指数大小依次是正蓝旗>黑城子>元上都; 元上都样地的AM真菌组成与其他样地差异显著; 8月和10月的AM真菌种丰度、Shannon多样性指数显著高于5月。随土壤碱解N含量提高, AM真菌种丰度、均匀度指数、物种多样性指数先升后降。结果提示, 在评估荒漠环境沙柳和AM真菌共生关系时, AM真菌生态分布和丰富度是十分有用的指标。

**关键词:** Shannon多样性指数, 碱解N, 土壤因子, *Salix psammophila*, 荒漠环境

## Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Salix psammophila* in Inner Mongolia desert

Jing Yang, Xueli He\*, Lili Zhao

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

**Abstract:** *Salix psammophila* is an excellent sand-fixation plant that can not only thrive in arid desert environment, but also can fix sand and promote desert management by maintaining the balance and stability of desert ecosystems. To understand the species diversity and ecological distribution of AM fungi associated with *S. psammophila*, we collected soil samples (0–50 cm deep) from the rhizosphere of *S. psammophila* at three different sites (Heichengzi, Zhenglanqi and Yuanshangdu) in Inner Mongolia in May, August and October 2009. A total of 37 AM fungal species belonging to four genera were isolated. Of these, 23 species belong to *Glomus*, 10 to *Acaulospora*, 3 to *Scutellospora*, and 1 to *Gigaspora*. *Glomus reticulatum* was the dominant species at all three sites, *Scutellospora* was found only in Heichengzi and Zhenglanqi, and *Gigaspora decipiens* only in Zhenglanqi. Generally, species richness, evenness, Shannon diversity and Simpson diversity indices showed the following trend across sites: Zhenglanqi > Heichengzi > Yuanshangdu. Species diversity of AM fungi in Yuanshangdu was significantly lower than that at the other sites. Species richness and Shannon diversity index of AM fungi were higher in August and October than in May. Species richness, evenness, and diversity indices first increased and then decreased with increasing levels of soil available N. Our results suggest that the subtle complexities present in the symbiotic relationship between *S. psammophila* and AM fungi in desert ecosystems.

**Key words:** Shannon diversity index, available N, soil factors, *Salix psammophila*, desert

近年来, 人们从不同角度开展了AM(arbuscular mycorrhiza)真菌物种多样性及其环境影响因子的研究(王发园和刘润进, 2002; Piotrowski *et al.*, 2008;

彭岳林等, 2010; Li *et al.*, 2010), 但对荒漠土壤AM真菌的研究主要集中在菌根结构类型及其侵染(Masahide *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2009)、环境因子对

收稿日期: 2010-09-17; 接受日期: 2010-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(30670371, 40471075)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

菌根侵染的影响(Shi *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010)、菌根对植物群落结构的调节(陈志超等, 2008; 李岩等, 2010)等方面。有关AM真菌物种多样性与土壤因子的相互作用也开始得到关注。郭绍霞等(2007)研究证实AM真菌的种属分布受土壤pH值及各种营养成分的影响; AM真菌孢子密度、种丰度、物种多样性指数与土壤肥力有显著相关性(钱伟华和贺学礼, 2009; He *et al.*, 2010)。这些研究结果对于深入了解不同生态系统中AM真菌群落组成及其生态分布规律具有重要意义。但有关荒漠地区AM真菌多样性季节变化的研究报道较少(Dhillon & Anderson, 1993; Klironomos *et al.*, 2001), 对影响AM真菌物种多样性的主要土壤因子的筛选几近空白。

在严酷的荒漠生境中, 植物常通过与AM真菌共生来提高对逆境的耐受性。AM真菌侵染植物后, 在植物根围形成庞大的菌丝网络系统, 菌丝分泌的粘性物质对于稳定土壤结构、固定沙丘、改善土壤理化性质, 特别是对退化生态系统植被恢复和生态重建具有重要意义(Helena *et al.*, 2009; Sally *et al.*, 2009)。杨柳科柳属植物沙柳(*Salix psammophila*)具有抗逆性强、耐旱、抗风沙、耐盐碱、生长迅速、枝叶茂密、根系发达、固沙保土力强等特性, 现已成为北方荒漠地区防风固沙的优良树种。研究沙柳根围AM真菌群落组成、季节变化以及与土壤因子的关系, 对于探明植物、菌根和土壤三者之间相互作用, 充分利用AM真菌资源促进沙柳生长是十分必要的。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

实验样地选在内蒙古额济纳旗黑城子北(42°09'817"N, 115°56'107"E)、锡林郭勒盟正蓝旗黄柳条村(42°15'842"N, 116°10'741"E)和正蓝旗元上都遗址(42°15'842"N, 116°10'741"E)。该区域土壤为风沙土, 以固定、半固定沙丘为主。海拔1,300–1,400 m, 年均气温0.1–5℃, 降水量185–387 mm, 季节分配不均, 6–8月降水占全年降水量的70%左右, 年蒸发量1,572–2,524 mm, 无霜期100–120 d。

### 1.2 样品采集

分别于2009年5月、8月和10月, 从所选样地随机选取4株生长良好的沙柳植株, 去掉表土2 cm, 在距植株主干0–30 cm范围内挖土壤剖面, 取沙柳

根围2–50 cm土层土样和根样约1 kg, 用土壤温度计、湿度计分别测量采集时各样品的温度和湿度, 并记录采样时间、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, 阴干后4℃冷藏。部分土样过2 mm筛, 用于土壤理化成分、AM真菌孢子密度及物种多样性测定; 收集根样并切成1 cm根段, 用于AM真菌侵染率测定。

### 1.3 AM真菌孢子分离鉴定

用湿筛倾析–蔗糖离心法(Ianson & Alle, 1986)分离孢子, 记录孢子数和孢子分类特征。用微吸管挑取孢子置于载玻片上, 加浮载剂如水、乳酸、乳酸甘油等观察压片, 并辅助使用Melzer's试剂观察孢子壁及内含物特异性反应。根据Schenck和Perez(1988)及国际AM真菌保藏中心(INVAM)的最新分类描述及图片(<http://invam.caf.wvu.edu>)并参阅有关鉴定材料和近年来发表的新种描述等, 进行种属鉴定。

### 1.4 AM真菌侵染率测定

AM真菌侵染率按Phillips和Hayman(1970)的方法测定。先将根样清洗后放入试管, 加入10% KOH约10 mL, 放进水浴锅中90℃煮至透明, 后用清水洗净根样上的KOH。再加入约10 mL酸性品红染液对根样染色后, 挑选50个细小根段压片, 在显微镜下观察各个结构侵染状况。

菌根侵染率 = 被侵染根段数/镜检总根段数 × 100%。

### 1.5 AM真菌物种多样性测定

参照吴丽莎等(2009)方法计算AM真菌种丰度、分离频度、相对多度、重要值及物种多样性指数等。

丰度(SR)指100 g土壤中含有的AM真菌种数, 即:  $SR = \text{AM真菌总种数} / \text{土样数}$ 。

分离频度(F)指AM真菌某属或种在样本总体中出现的频度, 即:  $F = (\text{AM真菌某属或种的出现次数} / \text{土样数}) \times 100\%$ 。

相对多度(RA)指该采样点AM真菌某属或种的孢子数占总孢子数的比率, 即:  $RA = (\text{该采样点AM真菌某属或种的孢子数} / \text{该采样点AM真菌总孢子数}) \times 100\%$ 。

重要值IV = (F+RA)/2, 即分离频度和相对多度的平均值。

本文将AM真菌的优势度按重要值划分为4个等级, 即: IV > 50%为优势属(种), 30% < IV ≤ 50%

为最常见属(种),  $10\% < IV \leq 30\%$  为常见属(种),  $IV \leq 10\%$  为稀有属(种)。

Shannon多样性指数:  $H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

Simpson多样性指数:  $D_s = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$

$s$ 为某采样点AM真菌种类数,  $P_i$ 为种 $i$ 所占比例。

均匀度指数:  $J = H/\ln SN$

$H$ 为Shannon指数,  $SN$ 为采样点AM真菌种数目。

Sørensen相似性系数:  $C_s = 2j/(a+b)$

$j$ 为AM真菌在两个样地都存在的物种数量,  $a$ 代表A样地总种数,  $b$ 代表B样地总种数。

1.6 土壤理化性质的测定

土壤有机质用重铬酸钾氧化法, 土壤pH值用电位法, 土壤碱解N用碱解扩散法, 土壤速效P用碳酸氢钠-钼锑抗比色法(鲁如坤, 1999)。

1.7 数据分析

数据经Excel 整理后, 采用SPSS 16.0统计软件对试验数据进行方差、相关性、主成分和回归分析。

2 结果

2.1 AM真菌群落组成

本实验共分离出AM真菌4属37种(图1), 尚有1个未定种。其中球囊霉属(*Glomus*)23种, 占62.2%; 无梗囊霉属(*Acaulospora*)10种, 占27%; 盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*)3种, 占8.1%; 巨孢囊霉属(*Gigaspora*)1种。球囊霉属和无梗囊霉属在3个样地都有分布, 盾巨孢囊霉属仅在黑城子和正蓝旗样地分布, 巨孢囊霉属仅在正蓝旗样地分布。

2.2 AM真菌属分离频度、相对多度和重要值

球囊霉属和无梗囊霉属的分离频度、相对多度、重要值在3个样地较高, 是共同优势属; 盾巨孢囊霉属在黑城子和正蓝旗是常见属, 在黑城子样地是稀有属; 巨孢囊霉属仅出现在正蓝旗1个样地, 重要值为1.07% (表1), 是其稀有属。

2.3 AM真菌种分离频度、相对多度和重要值

由表2可知, 37种AM真菌中, *Glomus reticulatum*分离频度、相对多度和重要值最高, 是3个样地的共同优势种。*Acaulospora bireticulata*、*G. constrictum*和*G. geosporum*是3个样地的共同最常见种; *A. laevis*、*G. convolutum*和*G. multicaule*是3个样地共同常见种; *G. magnicaule*是3个样地共同稀有种。*A. denticulata*、*A. spinosa*、*G. coremioides*、*G. halonatum*仅分布在黑城子样地, 是其稀有种; *G. deserticola*、*G. hyderabadensis*和*Scutellospora calospora*仅分布在黑城子和正蓝旗样地, 是其共同稀有种; *A. gerde-mannii*、*Acaulospora* sp.1、*G. clavispurum*、*G. glomerulatum*、*G. pustulatum*、*G. tenebrosus*、和*Gigaspora decipiens*仅分布在正蓝旗样地, 是其稀有种; *A. foveata*、*Glomus aggregatum*、*G. magnicaule*和*G. multiforum*是元上都样地的稀有种。

2.4 AM真菌分布的季节差异

AM真菌分布具有明显的季节性。8月和10月份AM真菌种丰度、Shannon多样性指数显著高于5月, 均匀度指数8月>10月>5月, Simpson多样性指数8月≈10月>5月(表3)。

2.5 AM真菌组成的相似性

由两样地间AM真菌组成的Sørensen相似性系

表1 不同样地沙柳根围AM真菌各属的分离频度(F)、相对多度(RA)和重要值(IV)  
Table 1 Frequency (F), relative abundance (RA) and importance value (IV) of AM fungal genera in different sampling sites of *Salix psammophila*

	黑城子 Heichengzi			正蓝旗 Zhenglanqi			元上都 Yuanshangdu		
	分离频度 F(%)	相对多度 RA(%)	重要值 IV(%)	分离频度 F(%)	相对多度 RA(%)	重要值 IV(%)	分离频度 F(%)	相对多度 RA(%)	重要值 IV(%)
无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	100 <sup>a</sup>	71.86 <sup>a</sup>	85.93 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	71.23 <sup>a</sup>	85.61 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	19.25 <sup>b</sup>	59.76 <sup>b</sup>
球囊霉属 <i>Glomus</i>	100 <sup>a</sup>	23.93 <sup>b</sup>	61.97 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>	23.79 <sup>b</sup>	61.90 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>	80.48 <sup>a</sup>	90.24 <sup>a</sup>
盾巨孢囊霉属 <i>Scutellospora</i>	15 <sup>b</sup>	4.20 <sup>c</sup>	9.60 <sup>c</sup>	15 <sup>b</sup>	4.50 <sup>c</sup>	11.42 <sup>c</sup>	—	—	—
巨孢囊霉属 <i>Gigaspora</i>	—	—	—	1.67 <sup>c</sup>	0.47 <sup>c</sup>	1.07 <sup>d</sup>	—	—	—

同一列数据中不同上标字母表示在 $P < 0.05$  水平上差异显著 Data with different superscripts in the same column indicate significant difference at  $P < 0.05$



图1 本研究分离的4属37种AM真菌(×400)

Fig. 1 37 AM fungal species isolated in the present study (×400)

1: 双网无梗囊霉(*Acaulospora bireticulata*); 2: 细齿无梗囊霉(*A. denticulata*); 3: 细凹无梗囊霉(*A. scrobiculata*); 4: 瘤状无梗囊霉(*A. tuberculata*); 5: 刺无梗囊霉(*A. spinosa*); 6: 凹坑无梗囊霉(*A. excavata*); 7: 詹氏无梗囊霉(*A. gerdemannii*); 8: 孔窝无梗囊霉(*A. foveata*); 9: 光壁无梗囊霉(*A. laevis*); 10: 荫性球囊霉(*Glomus tenebrosum*); 11: 黑球囊霉(*G. melanosporum*); 12: 网状球囊霉(*G. reticulatum*); 13: 地表球囊霉(*G. versiforme*); 14: 宽柄球囊霉(*G. magnicaule*); 15: 地球囊霉(*G. geosporum*); 16: 凹坑球囊霉(*G. multiforum*); 17: 缩球囊霉(*G. constrictum*); 18: 晕环球囊霉(*G. halonatum*); 19: 棒孢球囊霉(*G. clavisorum*); 20: 易误巨孢囊霉(*Gigaspora decipiens*); 21: 粘质球囊霉(*G. viscosum*); 22: 网纹盾巨孢囊霉(*Scutellospora reticulata*); 23: 具孢球囊霉(*G. pustulatum*); 24: 摩西球囊霉(*G. mosseae*); 25: 帚状球囊霉(*G. coremioides*); 26: 沙荒球囊霉(*G. deserticola*); 27: 海得拉巴球囊霉(*G. hyderabadensis*); 28: 聚丛球囊霉(*G. aggregatum*); 29: 卷曲球囊霉(*G. convolutum*); 30: 多梗球囊霉(*G. multicaule*); 31: 美丽盾巨孢囊霉(*Scu. calospora*); 32: 聚集球囊霉(*G. glomerulatum*); 33: 红色盾巨孢囊霉(*Scu. erythropha*); 34: 多产球囊霉(*G. fecundisporum*); 35: 集球囊霉(*G. fasciculatum*); 36: 长孢球囊霉(*G. dolichosporum*); 37: *Acaulospora* sp. 1.

表2 不同样地沙柳根围AM真菌种的分离频度(F)、相对多度(RA)、重要值(IV)和优势度(Dom)  
Table 2 Frequency (F), relative abundance (RA) and importance value (IV) and dominance(Dom) of the AM fungal species in the different sampling sites of *Salix psammophila*

	黑城子 Heichengzi				正蓝旗 Zhenglanqi				元上都 Yuanshangdu			
	F(%)	RA(%)	IV(%)	Dom	F(%)	RA(%)	IV(%)	Dom	F(%)	RA(%)	IV(%)	Dom
双网无梗囊霉	73.33 <sup>bc</sup>	7.38 <sup>bc</sup>	40.36 <sup>b</sup>	B	71.67 <sup>bc</sup>	7.72 <sup>b</sup>	39.69 <sup>bc</sup>	B	78.33 <sup>b</sup>	10.22 <sup>b</sup>	44.28 <sup>b</sup>	B
<i>Acaulospora bireticulata</i>												
细齿无梗囊霉 <i>A. denticulata</i>	5.00 <sup>j</sup>	0.26 <sup>h</sup>	2.63 <sup>f</sup>	D	—	—	—	—	—	—	—	—
凹坑无梗囊霉 <i>A. excavata</i>	45.00 <sup>de</sup>	3.18 <sup>e</sup>	24.09 <sup>d</sup>	C	28.33 <sup>ghi</sup>	3.14 <sup>e</sup>	15.73 <sup>cd</sup>	C	—	—	—	—
孔窝无梗囊霉 <i>A. foveata</i>	26.67 <sup>f</sup>	2.84 <sup>ef</sup>	14.75 <sup>e</sup>	C	25.00 <sup>ghi</sup>	3.28 <sup>e</sup>	14.14 <sup>d</sup>	C	8.33 <sup>e</sup>	2.82 <sup>e</sup>	5.58 <sup>d</sup>	D
詹氏无梗囊霉 <i>A. gerdemannii</i>	—	—	—	—	13.33 <sup>i</sup>	1.63 <sup>f</sup>	7.48 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
光壁无梗囊霉 <i>A. laevis</i>	53.33 <sup>d</sup>	3.14 <sup>e</sup>	28.37 <sup>cd</sup>	C	53.33 <sup>cde</sup>	4.41 <sup>d</sup>	28.87 <sup>c</sup>	C	26.67 <sup>d</sup>	3.13 <sup>e</sup>	14.90 <sup>cd</sup>	C
细凹无梗囊霉 <i>A. scrobiculata</i>	35.00 <sup>e</sup>	2.76 <sup>ef</sup>	18.88 <sup>de</sup>	C	23.33 <sup>ghi</sup>	1.89 <sup>f</sup>	12.61 <sup>d</sup>	C	—	—	—	—
刺无梗囊霉 <i>A. spinosa</i>	6.67 <sup>jk</sup>	2.55 <sup>ef</sup>	4.61 <sup>f</sup>	D	—	—	—	—	—	—	—	—
瘤状无梗囊霉 <i>A. tuberculata</i>	21.67 <sup>f</sup>	2.34 <sup>f</sup>	12.00 <sup>e</sup>	C	21.67 <sup>ghi</sup>	2.66 <sup>ef</sup>	12.16 <sup>d</sup>	C	—	—	—	—
无梗囊霉属1种 <i>Acaulospora</i> sp.1	—	—	—	—	5.00 <sup>j</sup>	0.28 <sup>g</sup>	2.63 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
聚丛球囊霉 <i>Glomus aggregatum</i>	18.33 <sup>fi</sup>	1.21 <sup>g</sup>	9.77 <sup>f</sup>	D	25.00 <sup>ghi</sup>	1.69 <sup>f</sup>	13.34 <sup>d</sup>	C	8.33 <sup>e</sup>	2.06 <sup>c</sup>	5.20 <sup>d</sup>	D
棒孢球囊霉 <i>G. clavisporum</i>	—	—	—	—	5.00 <sup>j</sup>	0.47 <sup>g</sup>	2.74 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
缩球囊霉 <i>G. constrictum</i>	80.00 <sup>ab</sup>	4.83 <sup>de</sup>	42.42 <sup>b</sup>	B	71.67 <sup>bc</sup>	4.73 <sup>d</sup>	38.20 <sup>bc</sup>	B	55.00 <sup>bc</sup>	6.25 <sup>bc</sup>	30.63 <sup>bc</sup>	B
卷曲球囊霉 <i>G. convolutum</i>	43.33 <sup>de</sup>	2.89 <sup>ef</sup>	23.11 <sup>d</sup>	C	36.67 <sup>def</sup>	3.43 <sup>e</sup>	20.05 <sup>c</sup>	C	26.67 <sup>d</sup>	3.43 <sup>c</sup>	15.05 <sup>cd</sup>	C
帚状球囊霉 <i>G. coremioides</i>	3.33 <sup>j</sup>	0.34 <sup>h</sup>	1.84 <sup>f</sup>	D	—	—	—	—	—	—	—	—
沙荒球囊霉 <i>G. deserticola</i>	13.33 <sup>i</sup>	1.08 <sup>g</sup>	7.21 <sup>f</sup>	D	16.67 <sup>hi</sup>	1.33 <sup>f</sup>	9.00 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
长孢球囊霉 <i>G. dolichosporum</i>	25.00 <sup>f</sup>	1.92 <sup>fg</sup>	13.46 <sup>e</sup>	C	8.33 <sup>j</sup>	0.80 <sup>g</sup>	4.57 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
集球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>	21.67 <sup>f</sup>	3.10 <sup>e</sup>	12.38 <sup>e</sup>	C	20.00 <sup>ghi</sup>	1.78 <sup>f</sup>	10.89 <sup>d</sup>	C	—	—	—	—
多产球囊霉 <i>G. fecundisporum</i>	60.00 <sup>c</sup>	3.94 <sup>e</sup>	31.97 <sup>c</sup>	B	35.00 <sup>efg</sup>	3.82 <sup>de</sup>	19.41 <sup>cd</sup>	C	35.00 <sup>c</sup>	2.90 <sup>c</sup>	18.95 <sup>cd</sup>	C
地球囊霉 <i>G. geosporum</i>	85.00 <sup>ab</sup>	7.67 <sup>bc</sup>	46.34 <sup>ab</sup>	B	83.33 <sup>ab</sup>	6.98 <sup>bc</sup>	45.16 <sup>b</sup>	B	76.67 <sup>b</sup>	10.45 <sup>b</sup>	43.56 <sup>b</sup>	B
聚集球囊霉 <i>G. glomerulatum</i>	—	—	—	—	11.67 <sup>i</sup>	1.54 <sup>f</sup>	6.60 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
晕环球囊霉 <i>G. halonatum</i>	6.67 <sup>j</sup>	0.68 <sup>h</sup>	3.67 <sup>f</sup>	D	—	—	—	—	—	—	—	—
海得拉巴球囊霉 <i>G. hyderabadensis</i>	6.67 <sup>j</sup>	0.79 <sup>h</sup>	3.73 <sup>f</sup>	D	5.00 <sup>j</sup>	0.98 <sup>fg</sup>	2.99 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
宽柄球囊霉 <i>G. magnicaule</i>	11.67 <sup>i</sup>	1.44 <sup>g</sup>	6.56 <sup>f</sup>	D	15.00 <sup>hi</sup>	1.60 <sup>f</sup>	8.30 <sup>e</sup>	D	5.00 <sup>e</sup>	0.31 <sup>d</sup>	2.65 <sup>d</sup>	D
黑球囊霉 <i>G. melanosporum</i>	100.00 <sup>a</sup>	7.64 <sup>bc</sup>	53.82 <sup>a</sup>	A	93.33 <sup>a</sup>	6.09 <sup>cde</sup>	49.71 <sup>b</sup>	B	93.33 <sup>a</sup>	11.06 <sup>ab</sup>	52.20 <sup>a</sup>	A
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	26.67 <sup>f</sup>	2.68 <sup>ef</sup>	14.67 <sup>e</sup>	C	20.00 <sup>ghi</sup>	3.11 <sup>e</sup>	11.55 <sup>d</sup>	C	—	—	—	—
多梗球囊霉 <i>G. multicaule</i>	21.67 <sup>f</sup>	1.63 <sup>fg</sup>	11.65 <sup>e</sup>	C	33.33 <sup>gh</sup>	2.63 <sup>ef</sup>	17.98 <sup>cd</sup>	C	18.33 <sup>de</sup>	2.82 <sup>c</sup>	10.58 <sup>cd</sup>	C
凹坑球囊霉 <i>G. multiforum</i>	46.67 <sup>de</sup>	3.23 <sup>e</sup>	24.95 <sup>d</sup>	C	33.33 <sup>gh</sup>	3.67 <sup>e</sup>	18.50 <sup>cd</sup>	C	15.00 <sup>de</sup>	2.59 <sup>c</sup>	8.80 <sup>d</sup>	D
具孢球囊霉 <i>G. pustulatum</i>	—	—	—	—	13.33 <sup>i</sup>	1.36 <sup>f</sup>	7.35 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
网状球囊霉 <i>G. reticulatum</i>	100.00 <sup>a</sup>	11.22 <sup>a</sup>	55.61 <sup>a</sup>	A	100.00 <sup>a</sup>	10.83 <sup>a</sup>	55.41 <sup>a</sup>	A	100.00 <sup>a</sup>	19.15 <sup>a</sup>	59.57 <sup>a</sup>	A
荫性球囊霉 <i>G. tenebrosum</i>	—	—	—	—	13.33 <sup>i</sup>	1.12 <sup>f</sup>	7.23 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
地表球囊霉 <i>G. versiforme</i>	58.33 <sup>d</sup>	5.17 <sup>cd</sup>	31.75 <sup>c</sup>	B	55.00 <sup>cd</sup>	4.59 <sup>d</sup>	29.79 <sup>c</sup>	C	48.33 <sup>c</sup>	7.55 <sup>bc</sup>	27.94 <sup>c</sup>	C
粘质球囊霉 <i>G. viscosum</i>	91.67 <sup>ab</sup>	8.43 <sup>b</sup>	50.05 <sup>a</sup>	A	93.33 <sup>a</sup>	6.86 <sup>cde</sup>	50.10 <sup>a</sup>	A	76.67 <sup>b</sup>	11.29 <sup>ab</sup>	43.98 <sup>b</sup>	B
易误巨孢囊霉 <i>Gigaspora decipiens</i>	—	—	—	—	6.67 <sup>j</sup>	1.27 <sup>f</sup>	3.97 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
美丽盾巨孢囊霉	16.67 <sup>i</sup>	1.50 <sup>fg</sup>	9.08 <sup>f</sup>	D	15.00 <sup>hi</sup>	1.15 <sup>f</sup>	8.08 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
<i>Scutellospora calospora</i>												
红色盾巨孢囊霉 <i>Scu. erythropha</i>	21.67 <sup>f</sup>	1.76 <sup>fg</sup>	11.71 <sup>e</sup>	C	18.33 <sup>hi</sup>	1.39 <sup>f</sup>	9.86 <sup>e</sup>	D	—	—	—	—
网纹盾巨孢囊霉 <i>Scu. reticulata</i>	26.67 <sup>f</sup>	2.10 <sup>f</sup>	14.38 <sup>e</sup>	C	25.00 <sup>ghi</sup>	2.13 <sup>ef</sup>	13.57 <sup>d</sup>	C	—	—	—	—

A: 优势种; B: 最常见种; C: 常见种; D: 稀有种; — 未出现。同一列数据中不同上标字母表示在 $P < 0.05$  水平上差异显著。  
A, Dominant species; B, Most common species; C, Common species; D, Rare species; — Absent. Data with different superscripts in the same column indicate significant difference at  $P < 0.05$ .

数计算方法得到, 黑城子和正蓝旗样地的相似性系数为0.84, 而元上都与黑城子和正蓝旗间的相似性系数分别为0.70和0.67。统计分析表明, 仅元上都与黑城子和正蓝旗间AM真菌组成差异显著。

2.6 AM真菌物种多样性与土壤因子的相关性

AM真菌平均孢子密度236.03个/100 g土, 平均总侵染率为61.07%。黑城子的孢子密度最大, 正蓝旗的总侵染率最高。黑城子和正蓝旗的种丰度、

Simpson多样性指数显著高于元上都; Shannon多样性指数大小是正蓝旗>黑城子>元上都。元上都的土壤湿度、pH值、碱解N、速效P和有机质显著高于黑城子, 但孢子密度和种丰度显著低于黑城子(表4)。

2.6.1 AM真菌物种多样性与土壤因子的相关性

AM真菌孢子密度与种丰度、均匀度指数、Shannon多样性指数和Simpson多样性指数极显著正相关。土壤速效P与孢子密度和Simpson多样性指数显著负相关; 土壤碱解N与孢子密度、Shannon多样性指数和Simpson多样性指数极显著负相关, 与种丰度和均匀度指数显著负相关;土壤有机质与

Simpson多样性指数极显著负相关, 与孢子密度、种丰度和Shannon多样性指数显著负相关(表5)。

2.6.2 多元线性回归分析

不同因子间存在相关关系, 互相制约, 有时会掩盖某一变量对结果的真实效应。为此, 利用多元线性回归原理, 分别以AM真菌分布指标为因变量, 各土壤因子为自变量进行多元线性回归, 利用stepwise法剔除不显著因子和相关关系因子, 最终确定有明显影响的因子, 得到标准回归方程:

方程I:  $Y_1=180.33+15.611X_1-54.053X_2-14.988X_4$   
(F=21.08, sig=0.000)

表3 不同月份AM真菌孢子密度、种丰度、Shannon多样性指数、Simpson多样性指数和均匀度指数

Table 3 Spore density, species richness, Shannon diversity index, Simpson diversity index and evenness of AM fungi in different months

	孢子密度 Spore density (inds./100 g)	种丰度 Species richness	Shannon diversity index	Simpson's diversity index	均匀度 Evenness
5月 May	108.25 <sup>b</sup>	15.67 <sup>b</sup>	2.52 <sup>b</sup>	0.90 <sup>a</sup>	0.92 <sup>b</sup>
8月 August	315.83 <sup>a</sup>	24.67 <sup>a</sup>	2.95 <sup>a</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.94 <sup>a</sup>
10月October	284.00 <sup>a</sup>	24.67 <sup>a</sup>	2.93 <sup>a</sup>	0.93 <sup>a</sup>	0.93 <sup>ab</sup>
均值 Average	236.03	21.67	2.80	0.92	0.93

同一列数据中不同上标字母表示在P < 0.05 水平上差异显著 Data with different superscripts in the same column indicate significant difference at P<0.05

表4 不同样地AM真菌物种多样性和土壤因子

Table 4 AM fungal species diversity and soil factors in the different sampling sites

样地 Site	孢子密度 Spore density (inds./100 g)	总侵染率 Total coloniza- tion (%)	种丰度 Species richness	均匀度 Even- ness	Shannon diversity index	Simpson diversity index	温度 Tem- perature (°C)	湿度 Mois- ture	pH	速效P Available P (μg/g)	碱解N Available N (μg/g)	有机质 Organic matter (mg/g)
黑城子 Heichengzi	317.33 <sup>a</sup>	57.49 <sup>a</sup>	24.33 <sup>a</sup>	0.931 <sup>a</sup>	2.94 <sup>ab</sup>	0.935 <sup>a</sup>	13.72 <sup>a</sup>	2.00 <sup>b</sup>	7.35 <sup>b</sup>	1.28 <sup>b</sup>	8.96 <sup>c</sup>	0.51 <sup>b</sup>
正蓝旗 Zhenglanqi	281.50 <sup>b</sup>	64.24 <sup>a</sup>	27.00 <sup>a</sup>	0.934 <sup>a</sup>	3.05 <sup>a</sup>	0.942 <sup>a</sup>	14.17 <sup>a</sup>	1.93 <sup>b</sup>	7.45 <sup>a</sup>	2.41 <sup>a</sup>	10.35 <sup>b</sup>	0.62 <sup>b</sup>
元上都 Yuanshangdu	109.25 <sup>c</sup>	61.48 <sup>a</sup>	13.67 <sup>b</sup>	0.919 <sup>a</sup>	2.40 <sup>b</sup>	0.893 <sup>b</sup>	12.56 <sup>a</sup>	3.13 <sup>a</sup>	7.46 <sup>a</sup>	2.37 <sup>a</sup>	16.31 <sup>a</sup>	1.74 <sup>a</sup>
平均值 Average	236.03	61.07	21.67	0.93	2.80	0.92	13.66	2.36	7.42	2.02	11.87	0.96

同一列数据中不同上标字母表示在P < 0.05 水平上差异显著 Data with different superscripts in the same column indicate significant difference at P<0.05

表5 AM真菌物种多样性和土壤因子相关性分析

Table 5 Correlation analysis between AM fungal species diversity and soil factors

	孢子密度 Spore density	温度 Temperature	湿度 Moisture	pH	速效P Available P	碱解N Available N	有机质 Organic matter
孢子密度 Spore density	1.000	0.615	-0.399	0.648	-0.771 <sup>*</sup>	-0.823 <sup>**</sup>	-0.687 <sup>*</sup>
总侵染率 Total colonization	-0.155	0.118	0.116	0.547	0.174	0.254	0.194
种丰度 Specie richness	0.943 <sup>**</sup>	0.491	-0.528	0.263	-0.618	-0.781 <sup>*</sup>	-0.735 <sup>*</sup>
均匀度 Evenness	0.862 <sup>**</sup>	0.657	-0.365	0.617	-0.543	-0.797 <sup>*</sup>	-0.627
Shannon diversity index	0.954 <sup>**</sup>	0.506	-0.531	0.267	-0.637	-0.824 <sup>**</sup>	-0.772 <sup>*</sup>
Simpson diversity index	0.951 <sup>**</sup>	0.493	-0.540	0.255	-0.674 <sup>*</sup>	-0.881 <sup>**</sup>	-0.812 <sup>**</sup>

\*P<0.05; \*\*P<0.01

方程II:  $Y_2=39.553-1.507X_5$  ( $F=10.923$ ,  $\text{sig}=0.013$ )  
方程III:  $Y_3=3.697-0.076X_5$  ( $F=14.838$ ,  $\text{sig}=0.006$ )  
方程IV:  $Y_4=0.994-0.006X_5$  ( $F=24.342$ ,  $\text{sig}=0.002$ )  
方程V:  $Y_5=0.671-0.002X_5+0.038X_3$  ( $F=30.301$ ,  $\text{sig}=0.001$ )。  
式中:  $Y_1$ : 孢子密度;  $Y_2$ : 种丰度;  $Y_3$ : Shannon多样性指数;  $Y_4$ : Simpson多样性指数;  $Y_5$ : 均匀度指数;  $X_1$ : 温度;  $X_2$ : 湿度;  $X_3$ : pH;  $X_4$ : 速效P;  $X_5$ : 碱解N。

经检验, 各方程检验值F的显著性概率均小于0.05, 说明回归效果好, 回归方程均有显著意义; 对各系数进行t检验, 各显著性水平都小于0.05, 说明各因子对Y的影响都很显著。

2.6.3 土壤因子主成分分析

对土壤因子进行主成分分析, 根据相关矩阵特征值大于1, 方差累积贡献率大于80%的原则, 选择2个主成分(表6)。第一主成分中, 土壤碱解N、有机质有较高载荷, 权重分别为0.977和0.944; 第二主成分中, 土壤温度有较高载荷, 权重为0.932。因第一主成分占信息量的47.35%, 综合分析, 土壤碱解N是主要土壤因子。

2.6.4 碱解N曲线回归

综合AM真菌物种多样性与土壤因子相关性分析、多元线性回归方程及土壤因子主成分分析, 土壤碱解N是荒漠生境中影响AM真菌物种多样性的主要土壤因子。为进一步探明显著相关的两者之间的关系, 应用SPSS曲线进行回归分析。

根据Curve Estimation过程, 从拟合的11种模型中, 在 $P<0.05$ 的曲线模型中根据修正的 $R^2$ 值来确定最优模型, 结果表明呈显著相关的两因素之间的最优模型如表7所示。

3 讨论

本研究发现, 沙柳根围AM真菌各属孢子密度、分离频度、相对多度、重要值在总体上呈球囊霉属 > 无梗囊霉属 > 盾巨孢囊霉属 > 巨孢囊霉属的趋势, 球囊霉属和无梗囊霉属在不同样地都占绝对优势, 这与张美庆等(1994)认为球囊霉属和无梗囊霉属是广谱生态型的结论一致。Klironomos等(2001)研究表明, 不同种类AM真菌对低温冷冻和干旱的耐受能力不同, 低温冷冻对*G. intraradices*和*G. mosseae*影响较小,而对*A. denticulata*和*S. calospora*影响较大, 干旱环境对*G. intraradices*影响不大。本实验中, 网状球囊霉是3个样地共同优势种, 黑球囊霉、粘质球囊霉和地球囊霉等在3样地各月份分布均较多, 说明这几种AM真菌适应能力较强, 可能具有某些独特的生物学功能, 同时与沙柳有较强亲和力, 这为筛选沙柳高效AM菌种提供了依据。

本研究中分离到37种AM真菌, 多于以前对其

表6 主成分载荷矩阵、特征值、贡献率  
Table 6 Principle component loading matrix, eigenvalue and contribution rate

理化因子 Physico-chemical factors	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
温度 Temperature	-0.226	0.932
湿度 Moisture	0.716	0.579
pH	-0.079	0.755
速效P Available P	0.654	-0.469
碱解N Available N	0.977	-0.030
有机质 Organic matter	0.944	0.204
特征值 Eigenvalue ( $\lambda$ )	2.841	2.037
贡献率 Contribution rate (%)	47.353	33.942

表7 显著相关关系的因素间最优拟合模型  
Table 7 The models of curve estimation regression

因素 Factor	模型名称 Model name	回归方程 Regression equation	修正 $R^2$ Amendment $R^2$
孢子密度与碱解N Spore density and available N	Quadratic	$y = 2.745x^2 - 99.279x + 984.68$	0.765
丰度与碱解N Richness and available N	Power	$y = 181.017x^{-0.904}$	0.682
均匀度与碱解N Evenness and available N	Quadratic	$y = 7.023 \times 10^{-5}x^2 - 0.004x + 0.967$	0.643
Shannon多样性指数与碱解N Shannon diversity index and available N	Power	$y = 6.239x^{-0.335}$	0.716
Simpson多样性指数与碱解N Simpson diversity index and available N	Cubic	$y = 4.720 \times 10^{-6}x^3 - 0.008x + 1.013$	0.786



他荒漠土壤的调查结果。如钱伟华和贺学礼(2009)在毛乌素沙地和腾格里沙漠油蒿(*Artemisia sphaerocephala*)根围分离到28种, Shi等(2007)在准噶尔盆地南缘怪柳根围分离到21种, Kennedy等(2002)在北美西南部*Sporobolus wrightii*根围分离到15种, Ferrol等(2004)在地中海荒漠土壤仅分离到5种。AM真菌种类丰富程度可能与宿主植物有关。Tawarayama等(1994)研究证实, 宿主植物类型和根系特性是AM真菌发生和分布的重要因子, 宿主植物不同, AM真菌侵染、产孢量和种属构成也不同。沙柳为多年生灌木、根系丰富, 特别是数量庞大的次生须根为AM真菌侵染和共生提供了适宜的生态生境。同时, 沙柳常生长在疏松的沙丘, 沙质松软、土壤透气性好, 有利于好氧性AM真菌生长。调查地区植被类型、土壤质地、土壤湿度等生态因子的差异也可能形成生态环境特异性的AM真菌多样性。

本研究中, 8月和10月AM真菌孢子密度、种丰度、多样性指数显著高于5月。这主要因为在干旱贫瘠的荒漠环境中, AM真菌必须依靠寄主植物提供的碳水化合物才能完成生活史。5月份沙柳刚萌芽, 而8–10月是旺盛生长期, 沙柳光合作用和生理代谢活动强, 根系分泌的碳水化合物有利于AM真菌生长发育, 其种丰度较高; 另外温度、降水量、光照条件、土壤因子等随季节的变化, 也使AM真菌多样性呈现明显的季节性。

作为宿主植物根系与土壤环境之间沟通的桥梁, AM真菌的分布必然受到宿主植物和根围土壤环境的直接影响。本实验结果表明, 土壤碱解N是影响AM真菌生态分布及物种多样性的主要土壤因子, 随着土壤碱解N含量提高, AM真菌种丰度、均匀度指数和物种多样性指数先增后降。刘润进和陈应龙(2007)以及陈宁等(2007)研究表明, 一定程度的土壤养分含量增加能提高AM真菌多样性, 但含量过高或过低均不利于菌根生长发育和功能发挥。AM真菌与植物共生后, 能吸收铵态氮、硝态氮、氨基酸和复杂的有机氮素, 吸收的氮素在根外菌丝中转化成精氨酸, 运输到根内菌丝, 进一步转化为 $\text{NH}_4^+$ 后参与植物氮素代谢(李侠和张俊伶, 2008)。同时, 土壤碱解N也影响着土壤其他微生物活动、有机质合成和分解、土壤磷素转运和释放、微量元素有效性以及植物生长等(杨玉海等, 2008)。因此, 当研究某一生态因子对AM真菌的影响时, 不能忽略

其他因子的作用。

## 参考文献

- Chen N (陈宁), Wang YS (王幼珊), Yang YJ (杨延杰), Lin D (林多), Qiu HW (仇宏伟), Ni XH (倪小会), Zhang MQ (张美庆) (2007) Effects of nutrient solutions with different ratios of N to P on development of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), **13**, 143–147. (in Chinese with English abstract)
- Chen ZC (陈志超), Shi ZY (石兆勇), Tian CY (田长彦), Feng G (冯固) (2008) Community characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi associated with ephemeral plants in southern edge of Gurbantunggut Desert. *Mycosystema* (菌物学报), **27**, 663–672. (in Chinese with English abstract)
- Dhillon SS, Anderson RC (1993) Seasonal dynamics of dominant species of arbuscular mycorrhizae in burned and unburned sand prairies. *Canadian Journal of Botany*, **71**, 1625–1630.
- Ferrol N, Calvente R, Cano C, Barea JM, Aguilar CA (2004) Analysing arbuscular mycorrhizal fungal diversity in shrub-associated resource islands from a desertification-threatened semiarid Mediterranean ecosystem. *Applied Soil Ecology*, **25**, 123–133.
- Guo SX (郭绍霞), Zhang YG (张玉刚), Li M (李敏), Liu RJ (刘润进) (2007) AM fungi diversity in the main tree-peony cultivation areas in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **15**, 425–431. (in Chinese with English abstract)
- He XL, Li YP, Zhao LL (2010) Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* Krasch. in Mu Us Sandland, China. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**, 1313–1319.
- Helena K, Elise K, Mauritz V (2009) Contribution of arbuscular mycorrhiza to soil quality in contrasting cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **136**, 36–45.
- Ianson DC, Allen MF (1986) The effects of soil texture on extraction of vesicular arbuscular mycorrhizal spores from arid soils. *Mycologia*, **78**, 164–168.
- Kennedy LJ, Tiller RL, Stutz JC (2002) Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and *Sporobolus wrightii* in riparian habitats in arid South-western North America. *Journal of Arid Environments*, **50**, 459–475.
- Klironomos JN, Hart MM, Gurney JE, Moutoglou P (2001) Interspecific differences in the tolerance of arbuscular mycorrhizal fungi to freezing and drying. *Canadian Journal of Botany*, **79**, 1161–1166.
- Li X (李侠), Zhang JL (张俊伶) (2008) Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to N uptake by plants. *Journal of Shanxi Datong University: (Natural Science)* (山西大同大学学报(自然科学版)), **24**(6), 75–78. (in Chinese with English abstract)
- Li Y (李岩), Jiao H (焦惠), Xu LJ (徐丽娟), Zhao HH (赵洪海), Liu RJ (刘润进) (2010) Advances in the study of



- community structure and function of arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **30**, 1089–1096. (in Chinese with English abstract)
- Li YP, He XL, Zhao LL (2010) Tempo-spatial dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi under clonal plant *Psammochloa villosa* Trin. Bor in Mu Us sandland. *European Journal of Soil Biology*, **46**, 295–301.
- Liu RJ (刘润进), Chen YL (陈应龙) (2007) *Mycorrhizology* (菌根学). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Lu RK (鲁如坤) (1999) *Agricultural Chemical Analysis on Soil* (土壤农业化学分析方法). China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese)
- Masahide Y, Shiho I, Koji I (2009) Community of arbuscular mycorrhizal fungi in drought-resistant plants, *Moringa* spp., in semiarid regions in Madagascar and Uganda. *Mycoscience*, **50**, 100–105.
- Peng YL (彭岳林), Yang MN (杨敏娜), Cai XB (蔡晓布) (2010) Influence of soil factors on species diversity of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in *Stipa* steppe of Tibet Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **21**, 1258–1263. (in Chinese with English abstract)
- Phillips JM, Hayman DS (1970) Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, **55**, 158–161.
- Piotrowski JS, Morford SL, Rillig MC (2008) Inhibition of colonization by a native arbuscular mycorrhizal fungal community via *Populus trichocarpa* litter, litter extract, and soluble phenolic compounds. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**, 709–717.
- Qian WH (钱伟华), He XL (贺学礼) (2009) Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with a desert plant *Artemisia ordosica*. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 506–511. (in Chinese with English abstract)
- Sally ES, Evelina F, Suzanne P, Smith FA (2009) Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, **326**, 3–20.
- Schenck NC, Perez Y (1988) *Manual for Identification of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, 2nd edn. INVAM University of Florida Gainesville, Florida, USA.
- Shi ZY, Zhang LY, Li XL, Feng G, Tian CY, Christie P (2007) Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with desert ephemerals in plant communities of Junggar Basin, northwest China. *Applied Soil Ecology*, **35**, 10–20.
- Tawarayama K, Saito M, Morioka M (1994) Effect of phosphate application to arbuscular mycorrhizal onion on the development and succinate dehydrogenase activity of internal hyphae. *Soil Science and Plant Nutrition*, **40**, 667–673.
- Tian H, Gai JP, Zhang JL, Christie P, Li XL (2009) Arbuscular mycorrhizal fungi associated with wild forage plants in typical steppe of eastern Inner Mongolia. *European Journal of Soil Biology*, **45**, 321–327.
- Wang FY (王发园), Liu RJ (刘润进) (2002) Effects of biological factors on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **22**, 403–408. (in Chinese with English abstract)
- Wu LS (吴丽莎), Wang Y (王玉), Li M (李敏), Ding ZT (丁兆堂), Liu RJ (刘润进) (2009) Arbuscular mycorrhizal fungi diversity in the rhizosphere of tea plant (*Camellia sinensis*) grown in Laoshan, Shandong. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 499–505. (in Chinese with English abstract)
- Yang YH (杨玉海), Chen YN (陈亚宁), Li WH (李卫红) (2008) Arbuscular mycorrhizal fungi infection in desert riparian forest and its environmental implications: a case study in the lower reach of Tarim River. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), **18**, 983–991. (in Chinese)
- Zhang HQ, Tang M, Chen H, Tian ZQ, Xue YQ, Feng Y (2009) Communities of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in Zhifanggou watershed. *Plant and Soil*, **326**, 415–424.
- Zhang MQ (张美庆), Wang YS (王幼珊), Zhang C (张弛), Huang L (黄磊) (1994) The ecological distribution characteristics of some genera and species of VAM fungi in northern China. *Acta Mycologica Sinica* (真菌学报), **13**, 166–172. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 杨祝良 责任编辑: 时意专)