

土壤因子对甘肃、宁夏和内蒙古 盐碱土中AM真菌的影响

盛敏¹ 唐明^{2*} 张峰峰² 黄艳辉¹

1 (西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100)

2 (西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明甘肃、宁夏和内蒙古盐碱土中AM真菌多样性及其与土壤因子间的关系, 2005年5月从甘肃、宁夏和内蒙古7个县(市)的盐碱土中采集主要植物的根围土壤样品, 研究了AM真菌物种多样性。在分离的4属28种AM真菌中, 球囊霉属(*Glomus*)20种, 多孢囊霉属(*Diversispora*)2种, 原囊霉属(*Archaeospora*)2种, 无梗囊霉属(*Acaulospora*)4种。其中根内球囊霉(*G. intraradices*)和薄壁原囊霉(*Ar. leptotichum*)的分离频度最高。相关分析和路径分析(path analysis)结果表明, AM真菌种的丰度与土壤有机质和速效N含量呈显著负相关; Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Na⁺、Ca²⁺、有机质、速效P和速效K直接影响AM真菌种的丰度, 而SO₄²⁻、K⁺、水溶性全盐、Mg²⁺、pH和速效N则间接影响AM真菌种的丰度; 土壤有机质对AM真菌Shannon-Wiener多样性指数有显著直接负效应; Cl⁻、CO₃²⁻、K⁺、Mg²⁺、有机质、速效P和速效K直接影响Shannon-Wiener多样性指数, 而HCO₃⁻、Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、水溶性全盐、pH和速效N则间接影响Shannon-Wiener多样性指数。冗余度分析结果表明, AM真菌种的相对多度与土壤因子间有显著相关性。可见, 甘肃、宁夏和内蒙古盐碱土中AM真菌种类丰富, 其多样性与土壤养分状况、盐度以及离子含量有关。

关键词: 盐碱土, 土壤因子, AM真菌, 丰度, 相对多度, Shannon-Wiener多样性指数

Effect of soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in saline alkaline soils of Gansu, Inner Mongolia and Ningxia

Min Sheng¹, Ming Tang^{2*}, Fengfeng Zhang², Yanhui Huang¹

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

2 College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100

Abstract: In order to explore arbuscular mycorrhizal (AM) fungal resources and reveal the relationship between soil factors and AM fungal diversity, we collected soil samples from the rhizosphere of main plants in saline alkaline soils of Gansu, Inner Mongolia and Ningxia. A total of 28 AM fungal species were identified. Of these, 20 species belonged to the genus *Glomus*, 2 to *Diversispora*, 2 to *Archaeospora*, and 4 to *Acaulospora*. The frequencies of *G. intraradices* and *Ar. leptotichum* were the highest. Correlation analysis revealed that AM fungal species richness was significantly correlated with the contents of soil organic matter and available N, while Shannon-Wiener diversity index was significantly related with soil organic matter content. Path analysis revealed that organic matter had a significantly direct negative influence on Shannon-Wiener diversity index; Cl⁻, CO₃²⁻, K⁺, Mg²⁺, organic matter, available P and available K directly impacted Shannon-Wiener diversity index, while HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, soluble salt, pH value and available N indirectly affected Shannon-Wiener diversity index; Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, organic matter, available P and available K directly impacted AM fungal species richness, while SO₄²⁻, K⁺, soluble salt, Mg²⁺, pH value and available N indirectly affected AM fungal species richness. Redundancy analysis revealed that the relative abundance of 14 AM fungal species was significantly correlated with soil factors. Our results indi-

cate that there are plenty of AM fungal species in the saline alkaline soils of the three regions, and AM fungal diversity is related with nutrient status and contents of soluble saline and ions in soils.

Key words: saline alkaline soil, soil factor, arbuscular mycorrhizal fungi, species richness, relative abundance, Shannon-Wiener diversity index

盐碱土是重要的土地资源。大量研究证实, 接种AM(arbuscular mycorrhizal)真菌能提高宿主植物的耐盐性(Yano-Melo *et al.*, 2003; Sheng *et al.*, 2009)。为此, 国外研究者十分重视盐碱土中AM真菌的资源、分布特征、生物多样性及其生态功能的研究(Hildebrandt *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2005)。我国近年来也开展了一些调查工作(Wang *et al.*, 2004; 唐明等, 2007)。结果表明, 盐碱土中AM真菌的丰富程度受宿主植物种类、土壤因子和环境因子等多种因素的影响(王发园和刘润进, 2001)。关于土壤因子与AM真菌的关系, 许多研究发现, 盐碱土中AM真菌的孢子密度与土壤理化性质密切相关(Aliafgharzadeh *et al.*, 2001; Agwa & Abdel-Fattah 2002; 盛敏等, 2008), 但关于盐碱土的理化性质对AM真菌物种多样性的影响尚缺乏足够的了解。

据统计, 中国盐碱土面积为 $3,630.53 \times 10^4$ ha, 占全国可利用土地面积的4.88%。我国西部干旱半干旱地区独特的气候和地理状况为盐碱土的发生和发育提供了条件。西部六省区(陕、甘、宁、青、

蒙、新)共有盐碱土 $2,506.33 \times 10^4$ ha, 占六省区可利用土地面积的9.4%, 占全国盐碱土面积的69.03%(石玉林, 1991)。因此, 本文选择了甘肃、宁夏和内蒙古三省区, 调查了盐碱土中AM真菌的物种多样性与土壤理化性质间的关系, 为丰富我国AM真菌资源、筛选高效菌种以及今后菌根真菌在盐碱土改良中的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 标本采集

在甘肃、宁夏和内蒙古盐碱土中采集主要植物根围土壤样品, 样点分布详见表1。各样点的每种植物随机选取5株, 每株按东西南北4个方位, 除去5 cm厚的表层土后, 在其根围(采样深度为5–20 cm)取根围土2 kg, 编号装入袋中, 记录采集时间、地点、植物根围环境等。

1.2 AM真菌的分离和鉴定

从每份土样中取100 g风干土, 采用Koske和Walker(1984)的湿筛倾析法进行AM真菌孢子的分

表1 甘肃、宁夏和内蒙古各采样点的植物种类、海拔和经纬度

Table 1 Plant species, elevation and locality of sampling sites in Gansu, Inner Mongolia and Ningxia

采样地点 Sampling site	植物种类 Plant species	海拔 Elevation (m)	经纬度 Locality
甘肃安西 Anxi County, Gansu	苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)、小麦(<i>Triticum aestivum</i>)	1,135	40°29'N, 95°36'E
甘肃敦煌 Dunhuang County, Gansu	棉花(<i>Gossypium herbaceum</i>)、骆驼刺(<i>Alhagi sparsifolia</i>)	1,050	40°25'N, 94°41'E
甘肃玉门镇 Yumen Town, Gansu	沙枣(<i>Elaeagnus angustifolia</i>)、马蔺(<i>Iris lactea</i>)、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)	1,404	40°26'N, 97°00'E
宁夏平罗 Pingluo County, Ningxia	玉米(<i>Zea mays</i>)、葱(<i>Allium fistulosum</i>)、胡杨(<i>Populus euphratica</i>)、樺树(<i>Ailanthus altissima</i>)、砂柳(<i>Salix gordejvii</i>)、水稻(<i>Oryza sativa</i>)、冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、枸杞(<i>Lycium chinense</i>)、大米草(<i>Spartina anglica</i>)、芨芨草、白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)	1,099	38°48'N, 106°16'E
内蒙古呼和浩特市托克托县 Tuoketok County, Inner Mongolia	白刺、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	986	40°17'N, 111°09'E
内蒙古哲里木盟奈曼旗 Naiman Banner, Zhelimu League, Inner Mongolia	寸草苔(<i>Carex duriuscula</i>)、冰草、盐角草(<i>Salicornia europaea</i>)、芦苇、马蔺、柠条(<i>Caragana korshinkii</i>)		
内蒙古科尔沁左翼中旗 Ke'erqin Left Middle Banner, Inner Mongolia	向日葵(<i>Helianthus annuus</i>)、羊草(<i>Leymus chinensis</i>)、筛草(<i>Carex kobomugi</i>)	259	45°3'N, 121°28'E

离。将筛取的 AM 真菌孢子和孢子果在体视显微镜下观察, 记录孢子数量、颜色、大小、连孢菌丝特征、孢子果形态等。然后挑取孢子置于载玻片上, 分别用水、乳酚、棉兰、Melzer 试剂、PVLG 和 PVL 为浮载剂制片, 测量孢子大小、厚度, 观察孢子的颜色、纹饰、类型等分类特征。综合以上镜检结果, 根据 Schenck 和 Perez(1988)的《AM 真菌鉴定手册》和 INVAM(<http://invam.caf.wvu.edu>)提供的鉴定资料, 并参考近几年发表的新种和新记录种, 按照 Walker 和 Schüßler(2004)的分类系统进行种属鉴定。

1.3 盐碱土理化性质的测定

采用重铬酸钾硫酸氧化法(GB7871-87)测定有机质含量; 碱扩散法测定碱解N; 碳酸氢钠浸提钼锑比色法(GB12297-90)测定速效P; 乙酸铵浸提原子吸收法(GB7856-87)测定速效K; 电位法(GB7859-87)测定pH值; 质量法测定水溶性全盐(GB7871-87); 双指示剂法测定 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- (GB7871-87); 原子吸收分光光度法测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} (GB7871-87); 硫酸钡比浊法测定 SO_4^{2-} (GB7871-87); 流动分析仪测定 Cl^- (GB7871-87)(鲍士旦, 2000)。

1.4 AM真菌种的丰度、种属的分离频度和相对多度

种的丰度指一个生境中AM真菌种的数目。分离频度是某物种在样本总体中的出现率。频度 $F(\%) = \text{包含AM真菌某属或种的土样数} / \text{总土样数} \times 100\%$ 。

相对多度指种的个体数在群落总物种数中的比例。本研究指某采样点AM真菌某种的孢子数占总孢子数的比例, 即: 相对多度 $RA(\%) = \text{某采样点AM真菌某种的孢子数} / \text{某采样点AM真菌的孢子总数} \times 100\%$ 。

本文采用Shannon-Wiener多样性指数(H)来描述AM真菌的物种多样性(Shannon & Weaver, 1963)。

1.5 数据分析

采用相关分析和通径分析(path analysis)方法研究了土壤因子对AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数的影响(SAS version 8.0, SAS Institute, 2001)。通径分析是在各变量无量纲的基础上, 通过通径系数的大小与正负来表示自变量对因变量作用的大小与方向。通径系数之间可进行相互比较, 能够比相关分析提供更多的信息(胡小平和

王长发, 2001)。

采用冗余度分析(redundancy analysis, RDA)方法分析土壤因子与AM真菌种的相对多度之间的关系(Canoco for Windows 4.5, Microcomputer Power, Ithaca, USA)。

2 结果

2.1 AM真菌种的丰度、Shannon-Wiener多样性指数及土壤理化性状

对所采土样的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、水溶性全盐、有机质、速效P、速效K、速效N含量和pH值等因子进行测定, 其含量范围依次为8.20–3,064.76 mg/kg、72.43–102.95 mg/kg、0–38.88 mmol/kg、0.64–27.67 mmol/kg、18.49–1,858.72 mg/kg、15.18–672.36 mg/kg、8.27–1,776.34 mg/kg、21.45–1,354.79 mg/kg、0.04–1.42 mg/kg、0.08–1.93%、3.60–134.73 mg/kg、38.63–1,304.17 mg/kg、11.91–106.88 mg/kg和7.69–10.14。AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数范围依次为2–10和0.20–2.0。

2.2 AM真菌的组成

在甘肃、宁夏和内蒙古盐碱土中共鉴定出28种AM真菌, 其中球囊霉属(*Glomus*)20种, 多孢囊霉属(*Diversispora*)2种, 原囊霉属(*Archaeospora*)2种, 无梗囊霉属(*Acaulospora*)4种(表2)。AM真菌属的分离频度以球囊霉属最高, 达96.7%, 其次是原囊霉属(83.3%), 无梗囊霉属最低(36.7%)。在28种AM真菌中, 根内球囊霉(*G. intraradices*)和薄壁原囊霉(*Ar. leptotichum*)的分离频度最高(80.0%)。

2.3 土壤因子对AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数的影响

相关分析结果表明, AM真菌种的丰度与有机质和速效N含量呈显著负相关, Shannon-Wiener多样性指数与有机质含量呈显著负相关(表3)。通径分析结果显示, 各土壤因子对AM真菌种的丰度的直接效应均不显著; 有机质对Shannon-Wiener多样性指数具有显著直接负效应; Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、有机质、速效P和速效K直接影响AM真菌种的丰度, 而 SO_4^{2-} 、 K^+ 、水溶性全盐、 Mg^{2+} 、pH和速效N则间接影响AM真菌种的丰度; Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、有机质、速效P和速效K直接影响Shannon-Wiener多样性指数, 而 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、

表2 盐碱土中AM真菌的种类及其分离频度

Table 2 Frequency of AM fungal genera and species in saline alkaline soils

AM真菌种属 Genera and species of AM fungi	分离频度 Frequency (%)	AM真菌种属 Genera and species of AM fungi	分离频度 Frequency (%)
无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	36.7	明球囊霉 <i>G. clarum</i>	6.7
浅窝无梗囊霉 <i>A. lacunosa</i>	3.3	缩球囊霉 <i>G. constrictum</i>	66.7
皱壁无梗囊霉 <i>A. rugosa</i>	6.7	副冠球囊霉 <i>G. coronatum</i>	26.7
细凹无梗囊霉 <i>A. scrobiculata</i>	16.7	透光球囊霉 <i>G. diaphanum</i>	3.3
刺无梗囊霉 <i>A. spinosa</i>	16.7	聚生球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>	10.0
原囊霉属 <i>Archaeospora</i>	83.3	地球囊霉 <i>G. geosporum</i>	76.7
格氏原囊霉 <i>Ar. gerdemanni</i>	6.7	根内球囊霉 <i>G. intraradices</i>	80.0
薄壁原囊霉 <i>Ar. leptotichum</i>	80.0	木薯球囊霉 <i>G. manihotis</i>	23.3
多孢囊霉属 <i>Diversispora</i>	76.7	摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	33.3
幼套多孢囊霉 <i>D. etunicatum</i>	3.3	膨果球囊霉 <i>G. pansihalos</i>	3.3
地表多孢囊霉 <i>D. versiforme</i>	73.3	具孢球囊霉 <i>G. pustulatum</i>	16.7
球囊霉属 <i>Glomus</i>	96.7	网状球囊霉 <i>G. reticulatum</i>	3.3
聚丛球囊霉 <i>G. aggregatum</i>	6.7	荫性球囊霉 <i>G. tenebrosum</i>	43.3
白色球囊霉 <i>G. albidum</i>	3.3	三壁球囊霉 <i>G. trimurales</i>	3.3
澳洲球囊霉 <i>G. australe</i>	26.7	疣壁球囊霉 <i>G. verruculosum</i>	20.0
近明球囊霉 <i>G. claroideum</i>	13.3	泡囊球囊霉 <i>G. vesiculiferum</i>	3.3

表3 土壤因子与AM真菌种的丰度(SR)和Shannon-Wiener多样性指数(H)的相关系数

Table 3 Correlation coefficients (*r*) between soil properties and AM fungal species richness (SR) and Shannon-Wiener diversity index (*H*)

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	水溶性全盐 Soluble salt	pH	有机质 Organic matter	速效P Available P	速效K Available K	速效N Available N
SR	-0.36	0.16	0.23	0.17	-0.210	0.0084	-0.0055	-0.082	0.071	0.22	-0.55*	-0.14	0.021	-0.44*
H	-0.26	0.21	0.11	0.15	-0.092	0.069	0.058	0.0410	0.130	0.14	-0.48*	-0.29	0.048	-0.32

* $P < 0.05$ Significant at 0.05 level

SO₄²⁻、水溶性全盐、pH和速效N则间接影响Shannon-Wiener多样性指数(表4和表5)。可见,有机质含量与盐碱土中AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数关系最为密切,对其有直接的影响。

2.4 土壤因子对AM真菌种的相对多度的影响

分别计算各土壤样品中分离频度≥16.7%的14种AM真菌的相对多度,然后用冗余度分析方法分析土壤因子与AM真菌种的相对多度之间的关系。结果显示,AM真菌种的相对多度与土壤因子间有显著相关性($P = 0.048$)。其中地表多孢囊霉(*D. versiforme*)和薄壁原囊霉的相对多度与速效N和有机质含量呈正相关,与速效P、水溶性全盐、HCO₃⁻、速效K、K⁺、CO₃²⁻、SO₄²⁻、Na⁺含量和土壤pH值呈负相关,与Ca²⁺和Mg²⁺含量无关。刺无梗囊霉(*A.*

spinosa)和细凹无梗囊霉(*A. scrobiculata*)的相对多度与Na⁺含量和土壤pH值呈正相关,与速效N、有机质、Ca²⁺、Mg²⁺和速效P含量呈负相关,与水溶性全盐、HCO₃⁻、速效K、K⁺、CO₃²⁻和SO₄²⁻含量无关。土壤因子对球囊霉属各种的影响不同(图1)。

3 讨论

已有研究表明,土壤碱化度对AM真菌的分布具有重要影响(Agwa & Abdel-Fattah, 2002)。本研究结果表明土壤pH值与AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数无关,仅对AM真菌种的相对多度有一定影响。这可能是由于土壤酸碱度影响了AM真菌的产孢从而导致AM真菌种的相对多度发生变化。已有研究证实,酸碱度通过影响孢子的萌发、芽管菌丝的生长以及菌丝对宿主植物根

表4 土壤因子(x_i)与AM真菌种的丰度(y)的通路分析

Table 4 Path analysis of correlation between soil factors (x_i) and AM fungal species richness (y)

	$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$	$x_6 \rightarrow y$	$x_7 \rightarrow y$	$x_8 \rightarrow y$	$x_9 \rightarrow y$	$x_{10} \rightarrow y$	$x_{11} \rightarrow y$	$x_{12} \rightarrow y$	$x_{13} \rightarrow y$	$x_{14} \rightarrow y$
x_1	<u>-0.24</u>	0.07	-0.04	-0.02	-0.20	-0.03	-0.002	0.24	-0.01	0.04	-0.40	-0.01	0.09	0.14
x_2	0.06	<u>-0.28</u>	0.22	0.07	-0.04	-0.01	0.002	-0.09	0.00008	-0.11	0.67	-0.01	0.01	-0.34
x_3	0.02	-0.11	<u>0.56</u>	0.09	-0.13	-0.04	0.001	0.06	-0.01	-0.12	0.34	-0.21	0.13	-0.36
x_4	0.04	-0.14	0.38	<u>0.13</u>	-0.09	-0.04	0.001	0.07	-0.01	-0.10	0.17	-0.19	0.11	-0.18
x_5	-0.17	-0.05	0.27	0.04	<u>-0.27</u>	-0.04	-0.0003	0.20	-0.01	-0.04	-0.06	-0.10	0.14	-0.12
x_6	-0.10	-0.04	0.30	0.08	-0.16	<u>-0.07</u>	-0.0007	0.36	-0.01	-0.05	-0.21	-0.22	0.18	-0.05
x_7	-0.09	0.14	-0.16	-0.03	-0.02	-0.01	<u>-0.005</u>	0.15	-0.01	0.10	-0.24	0.00	0.04	0.13
x_8	-0.13	0.06	0.07	0.02	-0.12	-0.06	-0.002	<u>0.44</u>	-0.01	0.01	-0.52	-0.16	0.15	0.16
x_9	-0.14	0.00	0.29	0.04	-0.18	-0.06	-0.002	0.35	<u>-0.02</u>	-0.03	-0.13	-0.16	0.17	-0.07
x_{10}	0.06	-0.19	0.41	0.09	-0.07	-0.02	0.003	-0.04	-0.003	<u>-0.16</u>	0.62	-0.05	0.03	-0.47
x_{11}	-0.08	0.15	-0.15	-0.02	-0.01	-0.01	-0.0009	0.18	-0.002	0.08	<u>-1.26</u>	-0.12	0.04	0.65
x_{12}	-0.003	-0.005	0.28	0.06	-0.07	-0.04	0.00002	0.17	-0.01	-0.02	-0.39	<u>-0.41</u>	0.15	0.13
x_{13}	-0.09	-0.01	0.33	0.07	-0.17	-0.06	-0.0008	0.31	-0.01	-0.02	-0.24	-0.28	<u>0.22</u>	-0.01
x_{14}	-0.05	0.13	-0.28	-0.03	0.04	0.005	-0.0009	0.10	0.00	0.10	-1.13	-0.07	-0.002	<u>0.73</u>

x_1 – x_{14} 分别指 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、水溶性全盐、pH、有机质、速效P、速效K、速效N; 表中有下划线者为直接通路系数, 无下划线者为间接通路系数。

x_1 – x_{14} represent Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , soluble salt, soil pH, organic matter, available P, available K, and available N, respectively. The underlined numbers are direct path correlation coefficients, and other numbers are indirect path correlation coefficients.

表5 土壤因子(x_i)与AM真菌Shannon-Wiener多样性指数(y)的通路分析

Table 5 Path analysis of correlation between AM fungal Shannon-Wiener diversity index (y) and soil factors (x_i)

	$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$	$x_6 \rightarrow y$	$x_7 \rightarrow y$	$x_8 \rightarrow y$	$x_9 \rightarrow y$	$x_{10} \rightarrow y$	$x_{11} \rightarrow y$	$x_{12} \rightarrow y$	$x_{13} \rightarrow y$	$x_{14} \rightarrow y$
x_1	<u>-0.73</u>	0.06	-0.03	-0.004	0.18	0.06	-0.03	0.29	0.01	0.06	-0.46	-0.01	0.12	0.21
x_2	0.19	<u>-0.22</u>	0.15	0.01	0.04	0.02	0.03	-0.11	-0.0001	-0.17	0.78	-0.01	0.01	-0.53
x_3	0.05	-0.09	<u>0.38</u>	0.01	0.12	0.08	0.02	0.07	0.01	-0.18	0.39	-0.38	0.17	-0.55
x_4	0.14	-0.11	0.26	<u>0.02</u>	0.08	0.09	0.02	0.09	0.01	-0.16	0.20	-0.35	0.14	-0.27
x_5	-0.53	-0.03	0.18	0.01	<u>0.25</u>	0.09	-0.005	0.24	0.01	-0.06	-0.07	-0.19	0.19	-0.18
x_6	-0.30	-0.03	0.20	0.01	0.15	<u>0.15</u>	-0.01	0.44	0.02	-0.08	-0.25	-0.41	0.24	-0.08
x_7	-0.28	0.11	-0.11	-0.01	0.02	0.02	<u>-0.07</u>	0.18	0.01	0.15	-0.28	0.00	0.05	0.20
x_8	-0.41	0.04	0.05	0.003	0.12	0.12	-0.02	<u>0.53</u>	0.02	0.02	-0.60	-0.29	0.20	0.25
x_9	-0.42	0.00	0.19	0.01	0.17	0.12	-0.03	0.42	<u>0.02</u>	-0.04	-0.15	-0.29	0.23	-0.11
x_{10}	0.19	-0.15	0.28	0.01	0.06	0.05	0.04	-0.04	0.004	<u>-0.25</u>	0.72	-0.09	0.04	-0.73
x_{11}	-0.23	0.12	-0.10	-0.003	0.01	0.02	-0.01	0.22	0.002	0.12	<u>-1.46*</u>	-0.23	0.06	1.01
x_{12}	-0.01	0.00	0.19	0.01	0.07	0.08	0.0002	0.20	0.01	-0.03	-0.45	<u>-0.75</u>	0.20	0.19
x_{13}	-0.29	-0.01	0.22	0.01	0.16	0.12	-0.01	0.37	0.02	-0.03	-0.28	-0.52	<u>0.29</u>	-0.01
x_{14}	-0.14	0.10	-0.19	-0.01	-0.04	-0.01	-0.01	0.12	-0.002	0.16	-1.31	-0.13	0.00	<u>1.13</u>

x_1 – x_{14} 代表的含义同表4。* $P < 0.05$; 表中有下划线者为直接通路系数, 无下划线者为间接通路系数。

x_1 – x_{14} correspond the same soil factors in Table 4. * Significant at 0.05 level. The underlined numbers are direct path correlation coefficients, and other numbers are indirect path correlation coefficients.

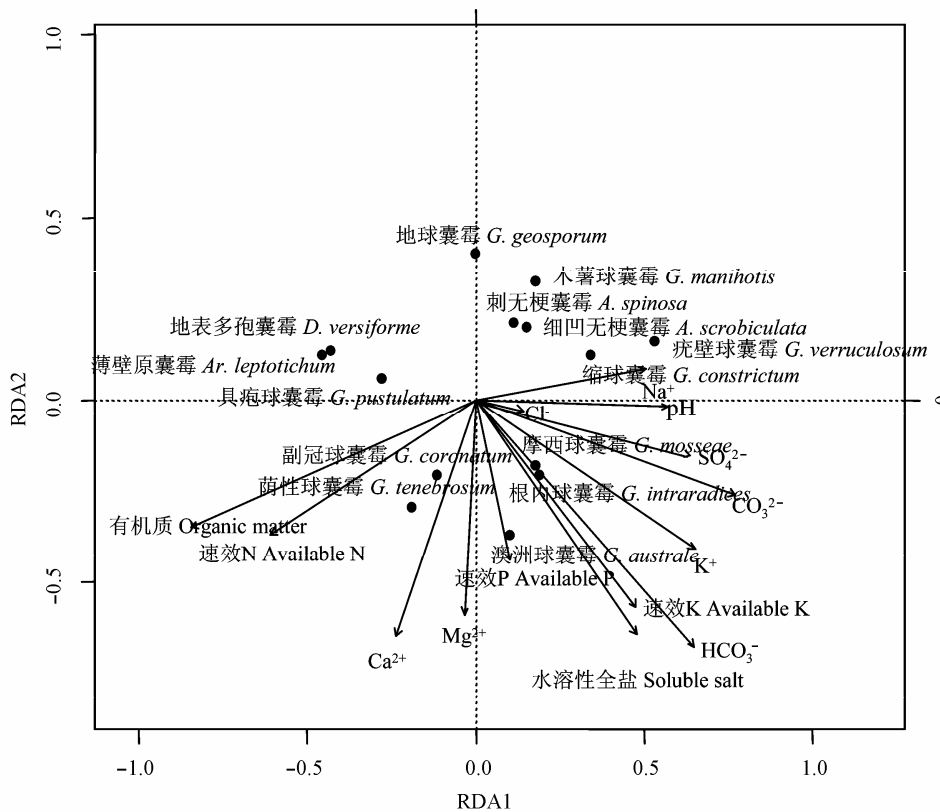


图1 盐碱土中AM真菌种的相对多度的冗余度分析(RDA)结果

Fig. 1 Ordination from a redundancy analysis (RDA) showing the relationship ($P = 0.048$) between the relative abundance of AM fungal species and soil factors

系的侵染等方式影响AM真菌的产孢(盖京苹等, 2004)。中性偏酸的土壤环境有利于AM真菌产孢, 过高的pH值则会对AM真菌的产孢产生抑制作用(盖京苹等, 2004)。

土壤中离子含量过高或失衡可降低植物对养分和水分的吸收能力(van Hoorn *et al.*, 2001), 导致植物体内质膜结构和功能破坏, 离子平衡失调, 造成营养亏缺(Maas & Grieve, 1987), 从而抑制植物的生长甚至死亡。Juniper和Abbott(2006)研究发现盐分对AM真菌(如美丽盾巨孢囊霉 *Scutellospora calospora*和光壁无梗囊霉 *A. laevis*)繁殖体的萌发以及菌丝的生长和发育具有抑制作用。关于土壤盐度对AM真菌在土壤中分布的影响, Agwa和Abdel-Fattah(2002)认为土壤盐度对埃及盐碱土中AM真菌的分布具有重要影响, 而Wilde等(2009)在新西兰和德国北部盐碱土中却发现AM真菌的分布与土壤盐度无关。从本研究结果来看, 土壤盐度以及离子(SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+)含量虽与AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数无关, 但却影响了一些AM真菌

种的相对多度, 如澳洲球囊霉(*G. australe*)、根内球囊霉、摩西球囊霉(*G. mosseae*)、疣壁球囊霉(*G. verruculosum*)、缩球囊霉(*G. constrictum*)、地表多孢囊霉、薄壁原囊霉和具孢球囊霉(*G. pustulatum*)等等。

研究证实, 土壤的肥力高会降低AM真菌的产孢和侵染活性(刘润进和李晓林, 2000)。矿质养分中, 以P和AM真菌的关系最为密切, 速效P含量过高会导致宿主植物根系分泌物成分发生变化(Tawaraya *et al.*, 1996), 抑制AM真菌的生长、发育和功能(Tawaraya *et al.*, 1994)。本研究发现矿质养分中仅速效N含量与AM真菌种的丰度呈显著负相关, 而速效P和速效K含量与AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener指数无关, 但却能影响一些AM真菌种的相对多度。

值得重视的是, 本研究发现土壤有机质含量与AM真菌多样性的关系最为密切, 与AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener指数呈负相关, 与地表多孢囊霉、薄壁原囊霉、具孢球囊霉、阴性球囊霉(*G. tenebrosum*)、副冠球囊霉(*G. coronatum*)和澳洲球囊

霉的相对多度呈正相关,与地球囊霉(*G. geosporum*)、木薯球囊霉(*G. manihotis*)、刺无梗囊霉、细凹无梗囊霉、疣壁球囊霉和缩球囊霉的相对多度呈负相关。上述结果与已报道的研究结果略有不同。如Agwa和Abdel-Fattah(2002)的调查结果表明埃及盐碱土中AM真菌的孢子密度与有机质含量呈正相关;Joner和Jakobsen(1995)研究发现土壤中有有机质含量的增加促进了苏格兰球囊霉(*G. caledonium*)菌丝的生长和发育;刘润进等(1999)在中国盐碱土中研究发现在一定范围内有机质含量越高,AM真菌的种类就越多,但超过一定范围后,AM真菌的分布就随着有机质含量的增加而减少。

本文通径分析的结果进一步表明,有机质主要通过直接作用影响AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数,但其也可通过影响其他土壤因子(如速效N,间接作用系数分别为0.65和1.01)来间接影响AM真菌种的丰度和Shannon-Wiener多样性指数。可见,有机质对AM真菌的影响处于动态变化之中,也就是说土壤中其他因子的变化可能会影响有机质对AM真菌的作用。由于不同地区的土壤性质不同(如土壤质地、养分和水分状况等等),故在不同盐碱地区分析土壤中有有机质含量对AM真菌的影响时可能会得出相矛盾的结果。本研究的结果对今后菌根真菌在盐碱土改良中的应用具有重要意义。

参考文献

- Agwa HE, Abdel-Fattah GM (2002) Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales) in Egypt. II. An ecological view of some saline affected plants in the deltaic Mediterranean coastal land. *Acta Botanica Hungarica*, **44**, 1-17.
- Aliasgharzadeh N, Saleh Rastin N, Towfighi H, Alizadeh A (2001) Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz Plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil. *Mycorrhiza*, **11**, 119-122.
- Bao SD (鲍士旦) (2000) *Soil Agricultural Chemical Analysis* (土壤农化分析). China Agricultural Press, Beijing. (in Chinese)
- Gai JP (盖京苹), Feng G (冯固), Li XL (李晓林) (2004) Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field soils from north China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 435-440. (in Chinese with English abstract)
- Hildebrandt U, Janetta K, Ouziad F, Renne B, Nawrath K, Bothe H (2001) Arbuscular mycorrhizal colonization of halophytes in Central European salt marshes. *Mycorrhiza*, **10**, 175-183.
- Hu XP (胡小平), Wang CF (王长发) (2001) *SAS Basis and Statistical Examples* (SAS基础及统计实例教程). Xi'an Cartographic Publishing House, Xi'an. (in Chinese)
- Joner EJ, Jakobsen I (1995) Growth and extracellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**, 1153-1159.
- Juniper S, Abbott LK (2006) Soil salinity delays germination and limits growth of hyphae from propagules of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, **16**, 371-379.
- Koske RE, Walker C (1984) *Gigaspora erythropha*, a new species forming arbuscular mycorrhizae. *Mycologia*, **76**, 250-255.
- Liu RJ (刘润进), Li XL (李晓林) (2000) *Arbuscular Mycorrhizae and Its Applications* (丛枝菌根及其应用). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Liu RJ (刘润进), Liu PQ (刘鹏起), Xu K (徐坤), Lu ZF (吕志范) (1999) Ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **10**, 721-724. (in Chinese with English abstract)
- Maas EV, Grieve CM (1987) Sodium-induced calcium deficiency in salt-stressed corn. *Plant, Cell and Environment*, **10**, 559-564.
- Oliveira RS, Vosatka M, Dodd JC, Castro PM (2005) Studies on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and the efficacy of two native isolates in a highly alkaline anthropogenic sediment. *Mycorrhiza*, **16**, 23-31.
- Schenck NC, Perez Y (1988) *Manual for the Identification of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, 2nd edn. pp. 1-233. Synergistic Publications, Gainesville, Florida.
- Shannon CE, Weaver W (1963) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana and Chicago.
- Sheng M (盛敏), Tang M (唐明), Zhang FF (张峰峰), Huang YH (黄艳辉), Yang BW (杨保伟) (2008) Effect of soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in northwest saline alkaline soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **45**, 758-763. (in Chinese with English abstract)
- Sheng M, Tang M, Chen H, Yang BW, Zhang FF, Huang YH (2009) Influence of arbuscular mycorrhizae on root system of maize plants under salt stress. *Canadian Journal of Microbiology*, **55**, 879-886.
- Shi YL (石玉林) (1991) *1: 1000000 Map of Chinese land Resource* (《中国1:100万土地资源图》土地资源数据集). China Renmin University Press, Beijing. (in Chinese)
- Tang M (唐明), Huang YH (黄艳辉), Sheng M (盛敏), Zhang FF (张峰峰), Xiao WF (肖文发) (2007) Diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in saline alkaline soil, Inner Mongolia. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **44**, 1104-1110. (in Chinese with English abstract)
- Tawarayama K, Saito M, Morioka M, Waqatsuma T (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.

- Tawarayama K, Watanabe S, Yoshida E, Waqatsuma T (1996) Effect of onion (*Allium cepa*) root exudates on the hyphal growth of *Gigaspora margarita*. *Mycorrhiza*, **6**, 57–59.
- van Hoorn JW, Katerji N, Hamdy A, Mastrorilli M (2001) Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil. *Agricultural Water Management*, **51**, 87–98.
- Wang FY, Liu RJ, Lin XG, Zhou JM (2004) Arbuscular mycorrhizal status of wild plants in saline-alkaline soils of the Yellow River Delta. *Mycorrhiza*, **14**, 133–137.
- Wang FY (王发园), Liu RJ (刘润进) (2001) A preliminary survey of arbuscular mycorrhizal fungi in saline-alkaline soil of the Yellow River Delta. *Biodiversity Science* (生物多样性), **9**, 389–392. (in Chinese with English abstract)
- Wilde P, Manal A, Stodden M, Ewald S, Ulrich H, Hermann B (2009) Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in roots and soils of two salt marshes. *Environmental Microbiology*, **11**, 1548–1561.
- Walker C, Schüßler A (2004) Nomenclatural clarifications and new taxa in the *Glomeromycota*. *Mycological Research*, **108**, 981–982.
- Yano-Melo AM, Saggin OJ Jr, Maia LC (2003) Tolerance of mycorrhizal banana (*Musa* sp. cv. Pacovan) plantlets to saline stress. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **95**, 343–348.

(责任编辑: 郭良栋 责任编辑: 时意专)

致谢2010年度审稿专家

2010年度《生物多样性》的稿件由以下专家审查。在此向各位专家致以深切的谢意!

安树青	东秀珠	韩国栋	李宝泉	刘 宝	牛翠娟	孙 磊	魏晓棠	杨 继	张天真
白逢彦	董玉柱	郝占庆	李 博	刘灿然	牛克昌	孙悦华	魏晓新	杨家新	张献龙
才宏伟	冯玉龙	何舜平	李迪强	刘建全	彭少麟	谭敦炎	吴东辉	杨庆文	张友军
蔡立哲	傅声雷	贺金生	李建强	刘瑞玉	钱 宏	唐文乔	吴 华	杨荣仲	张 征
蔡庆华	盖京平	洪水根	李 俊	刘润进	强 胜	田兴军	吴纪华	杨圣云	张正旺
曹坤芳	高江云	胡华斌	李 梅	刘文耀	邱宝利	童金苟	吴 岷	杨小波	赵 斌
曹 同	高天翔	胡慧建	李 明	刘杏忠	邱服斌	万方浩	席贻龙	杨祝良	赵亚辉
陈大庆	高贤明	黄 成	李瑞香	刘 莹	曲鲁江	汪诗平	谢道昕	姚小洪	赵云龙
陈清潮	戈 峰	黄宏文	李圣法	刘 越	任 毅	汪小凡	胥 晓	姚一建	赵之伟
陈小勇 ^①	葛 颂	黄 晖	李太武	刘忠义	桑卫国	汪小全	徐凤山	叶万辉	郑景明
陈小勇 ^②	葛学军	黄建辉	李 伟	龙春林	沙忠利	王国宏	徐国良	尤 锋	钟俊生
陈又生	耿宇鹏	黄双全	李欣海	娄安如	邵元虎	王建波	徐海根	于顺利	钟 扬
储明星	顾福康	黄椰林	李新正	卢 欣	申国珍	王利松	徐基良	于晓东	周 放
褚 栋	顾红雅	黄 英	李义明	卢宝荣	沈国春	王 艇	徐来祥	于子山	周华坤
崔国发	桂建芳	黄振英	李振宇	卢长明	沈有信	王 文	徐兆礼	余迪求	周开亚
崔丽娟	郭建英	纪力强	李自超	卢新民	沈泽昊	王希华	许哲平	余世孝	周立志
达良俊	郭良栋	江建平	梁存柱	陆健健	宋 未	王宪辉	薛达元	余育和	周世良
戴 强	郭水良	蒋明康	梁 伟	骆有庆	宋永昌	王绪高	薛燕芬	张春光	朱根海
戴玉成	郭旺珍	蒋志刚	梁文举	马克平	宋志平	王绪祯	阎秀峰	张大勇	朱 华
邓文洪	郭宪光	解 焱	梁 宇	马志军	孙传清	王 勇	颜绍植	张德兴	朱相云
丁 平	郭延平	金显仕	廖万金	米湘成	孙海芹	王幼芳	杨大荣	张富民	邹发生
丁长青	国庆喜	康 明	廖永岩	倪 健	孙江华	王崢峰	杨福生	张教林	邹建文
丁建清	韩博平	孔宏智	林元烧	聂刘旺	孙 军	王忠锁	杨 光	张民照	

① 华东师范大学环境科学系

② 中国科学院昆明动物所