

不同气候条件下 AM 真菌资源与 土壤理化性质的关系

方 燕,唐 明,孙学广,屈庆秋

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探讨不同气候条件下 AM 真菌资源与土壤理化性质的关系。【方法】以陕西安康、横山的刺槐和小叶杨为材料,分析不同气候条件下植物根际土壤中丛枝菌根(AM)真菌的种属分布,以及土壤因子与其侵染率和孢子密度的关系。【结果】(1)在安康、横山的刺槐和小叶杨根际土壤中共分离鉴定出 AM 真菌 22 种,分别隶属于球囊霉属(*Glomus*)、原囊霉属(*Archaeospora*)、无梗囊霉属(*Acaulospora*)、巨孢囊霉属(*Gigaspora*)和盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*),其中球囊霉属(*Glomus*)为优势属。安康、横山小叶杨和刺槐根际土壤中鉴定出的 AM 真菌种类数目分别为 13,13 和 18,19。(2)有效 N、速效 P 含量与各采样地 AM 真菌侵染率和孢子密度均呈正相关;有机质含量与横山刺槐根际的 AM 真菌侵染率和孢子密度均呈正相关,与横山、安康小叶杨及安康刺槐均呈负相关;pH 与横山、安康小叶杨及安康刺槐根际的 AM 真菌侵染率和孢子密度均呈正相关,与横山刺槐呈负相关。(3)通径分析结果表明,各类土壤理化性质对不同宿主植物的 AM 真菌侵染率和孢子密度影响程度不同。【结论】不同气候带 AM 真菌多样性存在差异;不同宿主植物、土壤理化性质对其根际 AM 真菌侵染率和孢子密度的影响有一定差异。

【关键词】 丛枝菌根真菌;多样性;土壤理化性质;侵染率;孢子密度

【中图分类号】 S154.36

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)10-0076-07

Relationship between AM fungi resources and soil factors under different climatic conditions

FANG Yan,TANG Ming,SUN Xue-guang,QU Qing-qiu

(College of Forestry,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】 The study was to explore the relationship between arbuscular mycorrhiza (AM) fungi and soil factors under different climatic conditions. 【Method】 The mycorrhizal structure type and species of AM fungi in rhizosphere of two plants, *Populus simonii* Carr and *Robinia pseudoacacia* L. in Ning-shan and Hengshan under different climatic conditions, and the effects of soil factors on colonization rate and spore density were studied. 【Result】 The results showed that 22 species of AM fungi were identified from the rhizosphere of plants. They belonged to *Glomus*, *Archaeospora*, *Acaulospora*, *Gigaspora* and *Scutellospora* 5 genus and *Glomus* was the dominant genera. The numbers of species of AM fungi identified from the rhizosphere of *Populus simonii* Carr and *Robinia pseudoacacia* in Ningshan and Hengshan were 13,13 and 18,19. Correlation analysis between soil factors and AM fungi spore density or colonization rate revealed that Available N and Available P were positively correlated with AM fungi spore density or colonization rate in all samples. Organic matter was positively correlated with AM fungi spore density or colonization rate of *Robinia pseudoacacia* in Hengshan, and negatively correlated with *Robinia pseudoacacia* in

* [收稿日期] 2010-03-24

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(30630054);教育部博士点基金项目(2006071205);教育部创新团队项目(IRT0748)

[作者简介] 方 燕(1985—),女,安徽黄山人,在读硕士,主要从事土壤微生物学研究。E-mail:fangyan850405@126.com

[通信作者] 唐 明(1962—),女,安徽涡阳人,教授,博士生导师,主要从事微生物学和森林保护学研究。

E-mail:tangm@nwsuaf.edu.cn

Ningshan, *Populus simonii* Carr in Ningshan and Hengshan, and pH appeared on the contrary. Path analysis indicated that soil factors on different host plants infect AM fungi spore density or colonization rate in different degrees. 【Conclusion】 These results indicated that the mycorrhizal structure type and species of AM fungi are diversified under different climatic conditions; The effects of soil factors on AM fungi colonization rate or spore density vary with host plants.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; diversity; soil factor; colonization rate; spore density

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 在自然界中分布广泛, 是迄今发现的与植物关系最为密切的一类土壤微生物^[1-2]。大量研究表明, 丛枝菌根 (AM) 真菌能够促进宿主植物对土壤矿质养分的吸收, 调节植物体内的代谢活动, 增强植物的抗逆性, 并与其他土壤微生物之间的相互竞争和相互协调, 调节着植物群落结构、植物的生物多样性以及植物生态系统的生产力, 是联结地上生态系统和地下生态系统物质传输的桥梁^[3-5]。

但 AM 真菌属于专性共生真菌, 适宜的环境条件才能有利于其生长发育。各生态系统中生态条件不同, 使得 AM 真菌的多样性存在较大差异^[6]。在自然生态环境中, AM 真菌的多样性受到多种生态因子, 如气候条件、土壤理化性质、土壤微生物、土地利用方式以及宿主类型等的影响。张美庆等^[7]研究发现, 我国东南沿海 7 省的 5 个土壤气候带中, AM 真菌种属分布存在一定的规律性。姚青等^[8]的研究结果显示, 不同草种根际的 AM 真菌群落结构存在差异。彭岳林等^[9]研究证实, 海拔高度对藏北高原草地植物根际 AM 真菌的生态分布具有重要影响。王森等^[10]的研究表明, 山西历山 4 种珍稀药用植物根际土壤理化性质与 AM 真菌存在相关性。迪丽努尔等^[11]研究了新疆伊犁野生植物在不同生态条件下 AM 真菌及生态分布。

但迄今为止, 对西北干旱、半干旱地区丛枝菌根的形成条件, 以及不同气候条件下 AM 真菌分布的影响因素等研究较少。本研究分别从位于陕北温带半干旱气候区的横山县和位于陕南湿润气候区的宁陕县采集土壤样品, 对这 2 个区域 AM 真菌的分布及各种土壤因子对 AM 真菌多样性的影响进行分析, 旨在探讨 AM 真菌资源在不同气候条件下的分布差异。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样地分别为陕南宁陕县和陕北横山县, 其中宁陕县地处秦岭中段南麓, 属北亚热带北缘山地湿

润气候, 是我国南北气候的过渡带, 长江、黄河水系的分水岭, 冬无严寒, 夏无酷暑, 植被复杂多样, 境内生物资源十分丰富; 横山县位于陕北黄土高原、风沙高原过度区, 地貌以无定河、芦河为界, 北部为风沙草滩区, 南部为丘陵沟壑区, 平均海拔 1 250 m, 年均气温 8.6℃, 降水量 399 mm, 属温带干旱、半干旱大陆性季风气候。

1.2 样品采集

2008-10 分别在宁陕县关口河上 (GK1)、关口河下 (GK2)、汤坪渔湾 (TP1)、汤坪麻庄 (TP2)、火地塘 (HD) 和横山县白界王官梁 (BJ1)、白界榆梁 (BJ2)、赵石河畔高干梁 (ZS1)、赵石河畔白家梁 (ZS2)、石湾魏家沟 (SW)、雷龙湾韩家湾 (LL1)、雷龙湾大草湾 (LL2), 随机选取采样点采集刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 和小叶杨 (*Populus simonii* Carr) 的根际土壤, 共选采样点 20 个, 每种植物、每采样点随机选取 5 株, 每株按东西南北 4 个方位采样。除去地表表层杂物后, 采集 10~20 cm 土层土样及带有根际土的根系。剪取带有细根的根系, 将其中部分根系洗净后装入盛有标准固定液 (甲醛 6 mL、冰醋酸 1 mL、酒精 20 mL、蒸馏水 40 mL 比例配置) 的小瓶中, 其余根系和根际土一同装入塑料袋中, 带回实验室, 置于 4℃ 保存备用。土壤样品置于阴凉通风处自然风干, 混匀, 室温保存备用。

1.3 AM 真菌侵染率和孢子密度的测定

将标准固定液中的根样取出, 洗净, 采用文献 [12] 的方法染色, 显微镜下观察泡囊、丛枝和菌丝的结构特征。用交叉划线法^[12] 计算侵染率。各取 100 g 风干土, 用湿筛倾析法^[12] 筛取 AM 真菌孢子, 解剖镜下分格计数, 统计孢子总数。以每 g 干土中的孢子数为孢子密度。

1.4 AM 真菌的分离鉴定

对湿筛倾析法分离得到的孢子和孢子果, 以水、乳酸、Melzer's 试剂和 PVLG (聚乙烯醇-乳酸-甘油) 为浮载剂制片, 观察其形态结构特征。根据文献 [13] 和国际丛枝菌根真菌保藏中心 (INVAM) (<http://invam.caf.wvu.edu>) 的方法, 以及相关鉴定材

料的鉴定结果等对菌种进行鉴定。

1.5 土壤理化性质的测定

用 PHS-3B 型精密 pH 计测定 pH 值。土壤有机质、速效 P、有效 N 含量分别采用重铬酸钾氧化法、碳酸氢钠-钼锑抗比色法和碱解扩散法测定^[14]。

1.6 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 软件进行试验数据分析。

2 结果与分析

2.1 植物根际 AM 真菌分布的多样性

2.1.1 各属 AM 真菌的分布 由表 1 可知,在宁陕县、横山县的刺槐和小叶杨根际土壤中共分离鉴定 AM 真菌 22 种,其中球囊霉属(*Glomus*)种类最多,有 18 种,占 AM 真菌总数的 82%,是优势属;原囊霉属(*Archaeospora*)、无梗囊霉属(*Acaulospora*)、盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*)和巨孢囊霉属(*Gigaspora*)各 1 种。

由表 1 可见,所有样地中,各属的 AM 真菌分布存在差异,其中,缩球囊霉(*G. constrictum*)的种群频度最高,为 100%;聚丛球囊霉(*G. aggregatum*)、白色球囊霉(*G. albidum*)、双型球囊霉(*G. ambisporum*)、微丛球囊霉(*G. microaggregatum*)、集球囊霉(*G. fasciculatum*)、地球囊霉(*G. geosporum*)和摩西球囊霉(*G. mosseae*)的种群频度均>50%,均为优势菌种;多梗球囊霉(*G. multicaule*)、近明球囊霉(*G. claroideum*)、幼套球囊霉(*G. etunicatum*)、薄壁原囊霉(*Ar. leptoticha*)、细齿无梗囊霉(*A. denticulata*)的种群频度在 30%~50%,均为常见种;根内球囊霉(*G. intraradices*)、副冠球囊霉(*G. coronatum*)、沙荒球囊霉(*G. deserticola*)、木薯球囊霉(*G. manihotis*)、网状球囊霉(*G. reticulatum*)、深红盾巨孢囊霉(*S. rubra*)的种群频度在 10%~30%,均为少见种;其余 AM 真菌仅在 1 种植物根际分布,种群频度<10%,均为偶见种。

表 1 各采样点植物根际 AM 真菌的分布情况
Table 1 The Distribution of AM fungi in the rhizosphere of plants in different sampling points

AM 真菌种类 AM fungi species	小叶杨 <i>P. simonii</i>						刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>					
	GK	TP	HD	ZS	SW	LL	GK	TP	HD	BJ	ZS	SW
集球囊霉(<i>G. fasciculatum</i>)	+	+	+	+	+	+	+		+	+		
摩西球囊霉(<i>G. mosseae</i>)			+	+	+	+	+	+	+		+	
聚丛球囊霉(<i>G. aggregatum</i>)	+		+		+	+	+	+	+		+	
地球囊霉(<i>G. geosporum</i>)		+	+	+	+	+			+		+	+
沙荒球囊霉(<i>G. deserticola</i>)				+							+	
缩球囊霉(<i>G. constrictum</i>)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
白色球囊霉(<i>G. albidum</i>)	+	+		+			+				+	+
近明球囊霉(<i>G. claroideum</i>)	+		+		+		+					
苏格兰球囊霉(<i>G. caledonium</i>)											+	
幼套球囊霉(<i>G. etunicatum</i>)				+				+	+		+	+
双型球囊霉(<i>G. ambisporum</i>)	+	+		+		+		+	+	+		
微丛球囊霉(<i>G. microaggregatum</i>)		+	+			+	+			+	+	
单孢球囊霉(<i>G. monosporum</i>)				+								
多梗球囊霉(<i>G. multicaule</i>)	+		+				+		+			
根内球囊霉(<i>G. intraradices</i>)				+								+
副冠球囊霉(<i>G. coronatum</i>)				+							+	+
木薯球囊霉(<i>G. manihotis</i>)			+									+
网状球囊霉(<i>G. reticulatum</i>)					+							+
薄壁原囊霉(<i>Ar. leptoticha</i>)		+	+		+			+				+
细齿无梗囊霉(<i>A. denticulata</i>)	+		+	+			+				+	
珠状巨孢囊霉(<i>G. margarita</i>)											+	
深红盾巨孢囊霉(<i>S. rubra</i>)				+							+	

注:(1)GK、TP、HD、ZS、SW、LL、BJ 分别表示关口、汤坪、火地塘、赵石河畔、石湾、雷龙湾、白界;下表同。(2) +表示有种的分布。
Note:(1)GK, TP, HD, ZS, SW, LL, BJ implying Guankou, Tangping, Huoditang, Zhaoshihepan, Shiwan, Leilongwan, Baijie; the same is table. (2)Sign(+)indicates the AM fungi distributes in this sample.

2.1.2 不同地区 AM 真菌的分布 由表 1 可知,同一地区不同宿主植物根际 AM 真菌的分布不同,表现出 AM 真菌与宿主植物之间的选择性。不同地区的同种宿主植物根际共生的 AM 真菌种类也存在着一定的差异,表明环境因素对 AM 真菌有一定的影响。在宁陕地区,小叶杨根际土壤中以缩球

囊霉、集球囊霉较为常见,刺槐根际土壤中以缩球囊霉、聚丛球囊霉、摩西球囊霉较为常见;在横山地区,小叶杨根际土壤中以缩球囊霉、集球囊霉、地球囊霉、摩西球囊霉较为常见,刺槐根际土壤中以缩球囊霉较为常见。珠状巨孢囊霉(*G. margarita*)、苏格兰球囊霉(*G. caledonium*)只可在刺槐根际土壤中分离得到;而单孢球囊霉(*G. monosporum*)只出现在小叶杨根际土壤中。多梗球囊霉只在宁陕根际土壤中发现;根内球囊霉、副冠球囊霉、苏格兰球囊霉、沙荒球囊霉、单孢球囊霉、网状球囊霉、深红盾巨孢囊霉、珠状巨孢囊霉只在横山根际土壤中发现。

2.1.3 不同地区 AM 真菌的物种丰富度 从表 2 可以看出,不同采样地 AM 真菌种类差异较大,为 4~13。其中赵石河畔的小叶杨和刺槐根际土壤中

AM 真菌的物种丰富度均较高,表明赵石河畔植物根际土壤中 AM 真菌物种资源丰富;而白界刺槐根际土壤中 AM 真菌的物种丰富度则最低,仅为 4。

不同地区、不同植物间 AM 真菌的物种丰富度存在差异(表 2)。宁陕、横山小叶杨和刺槐根际 AM 真菌物种丰富度分别为 13,13 和 18,19,AM 真菌物种丰富度依次为横山刺槐>横山小叶杨>宁陕小叶杨=宁陕刺槐。表明横山地区刺槐根际土壤中的 AM 真菌多样性稍高于小叶杨;宁陕地区刺槐与小叶杨根际土壤中的 AM 真菌多样性相同。可见,无论是小叶杨还是刺槐根际土壤中,AM 真菌的物种丰富度均以横山高于宁陕,表明横山地区这 2 种植物根际土壤中的 AM 真菌多样性高于宁陕地区。

表 2 各采样点植物根际 AM 真菌的物种丰富度

Table 2 Species richness index of AM fungi in the rhizosphere of plants in different sampling points									
地区 Region	宿主植物 Host plant	物种丰富度 Species richness index	采样点 Sample site	物种丰富度 Species richness index	地区 Region	宿主植物 Host plant	物种丰富度 Species richness index	采样点 Sample site	物种丰富度 Species richness index
宁陕 Ningshan	小叶杨 <i>P. simonii</i>	13	GK	8	横山 Hengshan	小叶杨 <i>P. simonii</i>	18	ZS	13
			TP	7				SW	8
			HD	11				LL	7
	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	13	GK	9		刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	19	BJ	4
			TP	6				ZS	13
			HD	8				SW	9

2.2 土壤理化性质对植物根际 AM 真菌侵染率、孢子密度的影响

2.2.1 AM 真菌的侵染率与孢子密度的相关性 表 3 显示,不同采样点 AM 真菌侵染率之间的差异较小,而孢子密度之间的差异则较大。宁陕刺槐和小叶杨根际 AM 真菌的孢子密度明显高于横山。宁陕地

区的刺槐和小叶杨根际 AM 真菌孢子密度差异不大,而横山地区刺槐根际 AM 真菌孢子密度则明显高于小叶杨。相关性分析结果表明,横山刺槐、横山小叶杨、宁陕刺槐和宁陕小叶杨根际 AM 真菌的孢子密度与侵染率均呈显著正相关,显著水平分别为 $P=0.022$, $P=0.002$, $P=0.005$ 和 $P=0.008$ 。

表 3 各采样点植物根际 AM 真菌的孢子密度、侵染率和土壤理化性质

Table 3 Spore density,colonization rate of AM fungi and the soil physicchemical properties in the rhizosphere of plants at different sample sites													
地区 Region	采样点 Sample site	孢子密度/ (个·g ⁻¹) Spore density		侵染率/% Colonization rate		有效 N/ (mg·kg ⁻¹) Available N		速效 P/ (mg·kg ⁻¹) Available P		有机质/ (g·kg ⁻¹) Organic matter		pH	
		刺槐 <i>R. pseudoa</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>	刺槐 <i>R. pseud</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>	刺槐 <i>R. pseud</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>	刺槐 <i>R. pseud</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>	刺槐 <i>R. pseud</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>	刺槐 <i>R. pseud</i>	小叶杨 <i>P. simo</i>
		<i>cacia</i>	<i>nii</i>	<i>oacacia</i>	<i>nii</i>	<i>oacacia</i>	<i>nii</i>	<i>oacacia</i>	<i>nii</i>	<i>oacacia</i>	<i>nii</i>	<i>oacacia</i>	<i>nii</i>
横山 Hengshan	BJ1	5.66		73		37.37		8.77		8.8		7.62	
	BJ2	4.21		58		21.38		5.21		8.6		7.84	
	ZS1	3.65	2.91	62	68	27.72	25.49	7.64	6.80	5.3	6.8	7.47	7.93
	ZS2	3.26	2.09	51	44	19.62	17.75	4.51	5.96	7.9	8.5	7.88	7.24
	SW	2.98	2.76	47	61	18.14	20.64	4.26	9.49	8.1	10.4	7.92	7.53
	LL1		2.53		53		18.56		6.95		7.6		7.37
	LL2		3.21		72		34.85		7.75		4.8		7.83
宁陕 Ningshan	GK1	7.38	6.93	76	74	39.45	53.68	13.96	13.65	18.8	17.4	6.53	6.63
	GK2	9.55	7.39	79	69	58.30	41.88	16.69	9.37	17.8	18.5	6.87	6.72
	TP1	1.01	1.34	79	97	74.87	84.85	17.37	22.63	11.7	13.8	6.93	7.01
	TP2	8.07	9.22	75	81	60.68	61.40	11.75	16.64	16.8	16.0	7.39	6.84
	HD	1.28	1.02	84	88	87.49	71.39	21.39	19.06	11.8	14.0	7.07	6.92

2.2.2 植物根际土壤的理化性质 各采样点土壤理化性质的测定结果(表 3)显示,对同一宿主植物而言,有效 N、速效 P、有机质含量和 pH 差异不大;在各采样点,以上各指标差异比较明显。宁陕植物根际土壤有效 N、速效 P 和有机质含量明显高于横山,但其 pH 则略低于横山。可见,植物根际土壤理化性质因环境条件、宿主植物不同而变化,从而引起根际土壤孢子密度和菌根侵染率存在一定的差异。

2.2.3 土壤理化性质对 AM 真菌侵染率的影响

表 4 表明,土壤有机质、有效 N、速效 P 含量和 pH

对植物根际 AM 真菌侵染率的影响因宿主和区域不同而存在差异。有效 N、速效 P 含量与横山和宁陕刺槐、小叶杨根际的 AM 真菌侵染率均呈正相关。有机质与横山刺槐根际的 AM 真菌侵染率呈正相关,与横山、宁陕小叶杨及宁陕刺槐根际的 AM 真菌侵染率均呈负相关。pH 与横山小叶杨、宁陕小叶杨和宁陕刺槐根际的 AM 真菌侵染率均呈正相关,与横山刺槐根际的 AM 真菌侵染率呈负相关。

表 4 植物根际 AM 真菌孢子密度和侵染率与土壤理化性质的相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil factors and spore density or colonization rate of AM fungi

土壤理化性质 Soil factor	横山刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Hengshan		横山小叶杨 <i>P. simonii</i> in Hengshan		宁陕刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Ningshan		宁陕小叶杨 <i>P. simonii</i> in Ningshan	
	侵染率 Colonization rate	孢子密度 Spore density	侵染率 Colonization rate	孢子密度 Spore density	侵染率 Colonization rate	孢子密度 Spore density	侵染率 Colonization rate	孢子密度 Spore density
有效 N Available N	0.968**	0.888*	0.864	0.873	0.804	0.917*	0.995**	0.939*
速效 P Available P	0.951*	0.790	0.459	0.511	0.968**	0.940*	0.968**	0.913*
有机质 Organic matter	0.270	0.386	−0.559	−0.573	−0.709	−0.806	−0.991**	−0.883*
pH	−0.747	−0.45	0.948*	0.887*	0.026	0.243	0.924*	0.956*

注: * 表示 $P<0.05$ 水平显著相关, ** 表示 $P<0.01$ 水平极显著相关。
Note: * indicate significant level at $P<0.05$ and ** at $P<0.01$, pectively.

通径分析结果(表 5)显示,4 种土壤理化性质对横山刺槐 AM 真菌侵染率的直接作用顺序为有机质>有效 N>速效 P>pH,其中有机质和有效 N 均为直接正效应,速效 P 和 pH 均为直接负效应。4 种土壤理化性质对横山小叶杨 AM 真菌侵染率的直接作用顺序为 pH>速效 P>有效 N>有机质,其中 pH 和速效 P 均为直接正效应,有效 N 和有机质均为直接负效应。4 种土壤理化性质对宁陕刺槐

AM 真菌侵染率的直接作用顺序为速效 P>pH>有机质>有效 N,其中速效 P 和 pH 均为直接正效应,有机质和有效 N 均为直接负效应。4 种土壤理化性质对宁陕小叶杨 AM 真菌侵染率的直接作用顺序为有效 N>pH>有机质>速效 P,其中有效 N 和 pH 均为直接正效应,有机质和速效 P 均为直接负效应。

表 5 植物根际 AM 真菌侵染率与土壤理化性质的通径分析

Table 5 Path analysis between soil factors and colonization rate of AM fungi

项目 Item	横山刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Hengshan				横山小叶杨 <i>P. simonii</i> in Hengshan			
	1→y ₁	2→y ₁	3→y ₁	4→y ₁	1→y ₁	2→y ₁	3→y ₁	4→y ₁
X ₁	<u>1.105</u>	−2.40	0.01	2.25	<u>−0.088</u>	0.09	0.31	0.56
X ₂	1.07	<u>−2.437</u>	−0.31	2.67	<u>−0.02</u>	<u>0.453</u>	−0.13	0.16
X ₃	0.01	0.55	<u>1.392</u>	−1.92	0.07	0.16	<u>−0.382</u>	−0.41
X ₄	−0.83	2.19	0.89	−3.005	−0.07	0.1	0.23	0.691

项目 Item	宁陕刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Ningshan				宁陕小叶杨 <i>P. simonii</i> in Ningshan			
	1→y ₁	2→y ₁	3→y ₁	4→y ₁	1→y ₁	2→y ₁	3→y ₁	4→y ₁
X ₁	<u>−2.189</u>	1.69	0.70	0.61	<u>1.027</u>	−0.22	0.02	0.17
X ₂	−1.67	<u>2.225</u>	0.54	−0.12	1.02	<u>−0.219</u>	0.02	0.16
X ₃	2.02	−1.6	<u>−0.755</u>	−0.38	−1.02	0.22	<u>−0.019</u>	−0.17
X ₄	−1.15	−0.22	0.25	<u>1.153</u>	0.90	−0.19	0.02	<u>0.189</u>

注: X₁. 有效 N; X₂. 速效 P; X₃. 有机质; X₄. pH; y₁. 侵染率。有下划线者为直接通径系数,无下划线者为间接通径系数。下表同。
Note: X₁. Available N; X₂. Available P; X₃. Organic matter; X₄. pH; y₁. Colonization rate. Numbers underlined denotes direct path correlation coefficients, numbers not underlined denotes indirect path correlation coefficients. The same is table.

2.2.4 土壤理化性质对 AM 真菌孢子密度的影响

表 4 表明,土壤有机质、有效 N、速效 P 和 pH 对植物根际 AM 真菌孢子密度的影响因宿主和区域不同而有所差别。有效 N、速效 P 含量与横山和宁陕刺槐、小叶杨根际的 AM 真菌孢子密度均呈正相关。有机质与横山刺槐根际的 AM 真菌孢子密度呈正相关,与横山、宁陕小叶杨及宁陕刺槐根际的 AM 真菌孢子密度均呈负相关。pH 与横山、宁陕小叶杨及宁陕刺槐根际的 AM 真菌孢子密度均呈正相关,与横山刺槐根际的 AM 真菌孢子密度呈负相关。

通径分析结果(表 6)显示,4 种土壤理化性质对横山刺槐 AM 真菌孢子密度的直接作用顺序为有

机质>有效 N>速效 P>pH,其中有机质和有效 N 均为直接正效应,速效 P 和 pH 均为直接负效应。4 种土壤理化性质对横山小叶杨 AM 真菌孢子密度的直接作用顺序为速效 P>pH>有效 N>有机质,其中速效 P 和 pH 均为直接正效应,有效 N 和有机质均为直接负效应。4 种土壤理化性质对宁陕刺槐 AM 真菌孢子密度的直接作用顺序为速效 P>pH>有机质>有效 N,其中速效 P 和 pH 均为直接正效应,有机质和有效 N 均为直接负效应。4 种土壤理化性质对宁陕小叶杨 AM 真菌孢子密度的直接作用顺序为有效 N>pH>有机质>速效 P,其中速效 P 为直接负效应,其余 3 种土壤理化性质均为直接正效应。

表 6 植物根际 AM 真菌孢子密度与土壤理化性质的通径分析

Table 6 Path analysis between soil factors and spore density of AM fungi

项目 Item	横山刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Hengshan				横山小叶杨 <i>P. simonii</i> in Hengshan			
	1→y ₂	2→y ₂	3→y ₂	4→y ₂	1→y ₂	2→y ₂	3→y ₂	4→y ₂
X ₁	<u>0.533</u>	-1.56	0.011	1.88	<u>-0.29</u>	0.14	0.61	0.40
X ₂	0.54	<u>-1.607</u>	-0.37	2.23	-0.06	<u>0.72</u>	-0.27	0.13
X ₃	0.003	0.36	<u>1.642</u>	-1.61	0.23	0.25	<u>-0.761</u>	-0.30
X ₄	-0.41	1.42	1.053	<u>-2.513</u>	-0.23	0.16	0.45	<u>0.507</u>

项目 Item	宁陕刺槐 <i>R. pseudoacacia</i> in Ningshan				宁陕小叶杨 <i>P. simonii</i> in Ningshan			
	1→y ₂	2→y ₂	3→y ₂	4→y ₂	1→y ₂	2→y ₂	3→y ₂	4→y ₂
X ₁	<u>-1.422</u>	1.30	0.53	0.51	<u>1.705</u>	1.76	-3.18	1.18
X ₂	-1.08	<u>1.707</u>	0.41	-0.10	-0.46	<u>-0.73</u>	1.27	-0.46
X ₃	1.31	-1.22	<u>-0.575</u>	-0.32	-0.23	-0.35	<u>0.69</u>	-0.25
X ₄	-0.75	-0.17	0.19	<u>0.973</u>	0.52	0.77	-1.48	<u>0.71</u>

注:y₂、孢子密度。
Note:y₂. Spore density.

3 讨 论

AM 真菌广泛存在于各种生态系统中。不同生态系统中,AM 真菌的多样性因各种生态因子,如海拔、气候条件、土壤理化性质和宿主植物等的不同而存在较大差异。本研究从陕西安宁、横山的刺槐和小叶杨根际鉴定出 5 属 22 种 AM 真菌,其中,球囊霉属(*Glomus*)为优势属。宁陕、横山小叶杨、刺槐根际土壤中鉴定出的 AM 真菌种类数目分别为 13、13 和 18,19。表明不同环境和宿主植物的 AM 真菌多样性存在差异,可知 AM 真菌的种类分布受到其宿主植物的生物学特性及环境因子的影响。

关于 AM 真菌侵染率和孢子密度之间的关系,前人的研究结果不同。He 等^[15]研究发现,以色列荒漠地区灌木植物根际的 AM 真菌侵染率与孢子密度呈正相关;Ileana 等^[16]研究表明,阿根廷盐性土

壤中 AM 真菌孢子密度与侵染率无相关性。本研究结果表明,宁陕和横山地区刺槐和小叶杨根际 AM 真菌的孢子密度与侵染率呈显著正相关。上述研究结果的差异可能与不同研究的采样地点、宿主植物和 AM 真菌的发育阶段有关。

Michelin^[17]、盛敏等^[18]研究了矿质营养、有机质含量、土壤 pH 等对 AM 真菌的影响,发现不同地区侵染状况存在显著差异。本研究中,有效 N、速效 P、有机质、pH 对植物根际 AM 真菌侵染率和孢子密度的影响,随着环境条件、宿主植物不同而存在差异。有效 N、速效 P 均为正相关,pH 多为正相关,而有机质多为负相关。通径分析结果表明,各类土壤理化性质在不同环境条件下,对不同宿主植物 AM 真菌的侵染率和孢子密度的影响程度也存在差异。这可能与不同土壤理化性质对 AM 真菌的影响机制不同及环境差异有关。

[参考文献]

[1] Smith S E,Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. 2nd ed. London:Academic Press,1997.

[2] 盖京苹,冯 固. 丛枝菌根真菌的生物多样性研究进展 [J]. 土壤,2005,37(3):236-242.

Gai J P,Feng G. Review of researches on biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Soils, 2005, 37(3): 236-242. (in Chinese)

[3] van der Heijden M G A,Klironomos J N,Ursic M,et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity,ecosystem variability and productivity [J]. Nature,1998,396:69-72.

[4] Ehrenfeld J G,Ravit B,Elgersma K. Feedback in the plantsoil system [J]. Annual Review of Environmental Resource,2005,30:75-115.

[5] 冀春花,张淑彬. 西北干旱区 AM 真菌多样性研究 [J]. 生物多样性,2007,15(1):77-83.

Ji C H,Zhang S B. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in arid zones in northwestern China [J]. Biodiversity Science, 2007,15(1):77-83. (in Chinese)

[6] 王发园,刘润进. 几种生态环境中 AM 真菌多样性比较研究 [J]. 生态学报,2003,23(12):2665-2671.

Wang F Y,Liu R J. Comparison of diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in different ecological environments [J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(12):2665-2671. (in Chinese)

[7] 张美庆,王幼珊,邢礼军. AM 真菌在我国东南沿海各土壤气候带的分布 [J]. 菌物系统,1999,18(2):145-148.

Zhang M Q,Wang Y S,Xing L J. The regional distribution of AM fungi in the east and south coast of China [J]. Mycosystema,1999,18(2):145-148. (in Chinese)

[8] 姚 青,王连润,陈美标. 不同草种对土著 AM 真菌的生长和群落结构的影响 [J]. 草业学报,2008,17(2):33-38.

Yao Q,Wang L R,Chen M B. Influence of different grass species on growth and community structure of native AM fungi [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(2): 33-38. (in Chinese)

[9] 彭岳林,钱 成,蔡晓布,等. 藏北高原 AM 真菌种群多样性及生态分布特征 [J]. 中国农学通报,2006,22(8):507-510.

Peng Y L,Qian C,Cai X B,et al. The species diversity and characteristic of ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of Northem Tibetan Plateau [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2006,22(8):507-510. (in Chinese)

[10] 王 森,唐 明. 山西历山珍稀药用植物 AM 真菌资源与土壤因子的关系 [J]. 西北植物学报,2008,28(2):355-361.

Wang S,Tang M. Relationship between AM fungi resources of rare medicinal plants and soil factors in Lishan Mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalina Sinia, 2008, 28(2): 355-361. (in Chinese)

[11] 迪丽努尔,唐 明,王亚军. 新疆伊犁野生植物 VA 菌根真菌及其生态分布 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(6):96-100.

Dilnur,Tang M,Wang Y J. Arbuscular mycorrhizal fungi and their ecological distrbution of some kinds of wild plants in Yili Region of Xinjiang [J]. Jour of Northwest Sci Tech Univ of Agri and For:Nat Sci Ed,2006,34(6):96-100. (in Chinese)

[12] 弓明钦,陈应龙,仲崇禄. 菌根研究及应用 [M]. 北京:中国林业出版社,1997:133-149.

Gong M Q,Chen Y L,Zhong C L. Mycorrhizal research and application [M]. Beijing:China Forestry Publishing House, 1997:133-149. (in Chinese)

[13] Schenck N C,Perez Y. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi [M]. 2nd ed. Florida:Gainesville,1988.

[14] 鲍士旦. 土壤氨化分析 [M]. 北京:中国农业出版社,2000.

Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2000. (in Chinese)

[15] 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 and Management,2002,16(2):149-160.

[16] Ileana V G,Rodoffo E M. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis in a saline-sodic soil [J]. Mycorrhiza, 2007, 17:167-174.

[17] Michelini S. Relationships between environmental factors and levels of mycorrhizal infection of citrus on four islands in the Eastern Caribbean [J]. Tropical Agriculture, 1993, 70(20): 135-140.

[18] 盛 敏,唐 明,迪丽努尔,等. 西北盐碱土主要植物丛枝菌根研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2):74-78.

Sheng M,Tang M,Dilnur,et al. Study on arbuscular mycorrhizae of common halophytes from northwest sali alkali soil [J]. Jour of Northwest Sci Tech Univ of Agri and For:Nat Sci Ed,2007,35(2):74-78. (in Chinese)