第 47 卷 第 7 期
2011 年 7 月

林　业　科　学
SCIENTIA SILVAE SINICAE

Vol. 47, No. 7
Jul., 2011

黄土丘陵沟壑区丛枝菌根真菌多样性及其分布

李登武[1]　薛　玲[1]　张万红[2]

（1. 西北农林科技大学林学院　杨凌 712100；2. 中国科学院水利部水土保持研究所　杨凌 712100）

摘　要： 在黄土丘陵沟壑区由撂荒到灌丛的植被恢复过程中，研究阴、阳坡植被不同恢复阶段代表植物的 AM 真菌侵染状况、根际土壤中 AM 真菌孢子的密度以及 AM 真菌多样性及分布。结果表明：从不同恢复阶段植被中，共分离到 18 种 AM 真菌，隶属于巨囊霉属、盾巨囊霉属和球囊霉属，其中，缩球囊霉和地球囊霉 2 种为不同恢复阶段中的共有种，即为本区的优势种，其余的 16 种在各恢复阶段中的分布有所差异。在阳坡半阳坡的植被不同恢复阶段中，各宿主植物的平均侵染率，仅第 1，2 阶段差异显著，根际土壤的孢子密度在各阶段差异不显著；而阴坡半阴坡的 AM 真菌的侵染率则差异不显著，根际的孢子密度，以第 4，5 阶段的孢子密度显著高于第 1，2 阶段。对于 AM 真菌物种丰度和多样性在阴、阳坡则呈现相似的规律，即第 4，5 阶段较高，第 1，2 和第 3 阶段则相对较低。对 AM 真菌物种均匀度而言，阳坡半阳坡的第 5 阶段与第 2，3，4 阶段的差异显著，阴坡半阴坡上则差异不显著。

关键词： 丛枝菌根真菌；孢子密度；侵染率；多样性；黄土丘陵沟壑区

中图分类号： S718.81　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001－7488(2011)07－0116－07

Diversity and Distribution of Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi in Loess Hilly Gully Region

Li Dengwu[1]　Xue Ling[1]　Zhang Wanhong[2]

(1. *College of Forestry, Northwest A & F University*　*Yangling* 712100;
2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*　*Yangling* 712100)

Abstract: AM fungi infection rate, spore density, diversity and distribution in the main plant species at different vegetation restoration stages in Loess Hilly Gully Region were studied. The results showed that 18 AM fungus species, belonging to *Gigaspora*, *Scutellospora* and *Glomus*, were identified from the rhizospheres of the main plant species. *Glomus constrictum* and *Glomus geosporum* of *Glomus* were the common species at different vegetation restoration stages, and they are also the dominant species in the region. Distribution of the other 16 species varied at different stages. There were significant differences in the average infection frequencies of host plants between the first and second stages on sunny slopes. However, the spore density had no significant difference among the five stages. By contrast, there was no significant difference in the infection frequencies among the five stages on shady slopes, and the spore density at the fourth and fifth stages was higher than that at the first and second stages. Richness and diversity of the fungus species were higher at the fourth and fifth stages, and lower at the first and third stages regardless of slope aspect. On sunny slopes, evenness of AM fungi at the second, third and the fourth stages were higher than that at the fifth stage. However there was no significant difference in the evenness on shady slopes. These results are important for further studying the relationships between AM fungi diversity and plant community species diversity in the region, and even greater important for sieving AM applying fungi species with adaptive ability and applying mycorrhizal biotechnology to vegetation restoration in Loess Plateau.

Key words: arbucsular mycorrhizal fungi; spore density; infected frequencies; diversity; Loess Hilly Gully Region

丛枝菌根（AM）广泛分布于自然界中，是绝大多数陆生植物根系与球囊霉门真菌形成的互惠共生体，是自然生态系统的重要组成部分。AM 真菌是连接地上和地下生态系统物质传输的桥梁，调节植物群落结构、植物的生物多样性以及植物生态系统的生产力（Ehrenfeld *et al*., 2005）。AM 真菌与植物协同进化，是目前已探明的与植物关系最为密切的土壤微生物之一（冀春花等，2007），而且对生态系统中植物的组成、演替以及生态系统的修复与稳定都起着重要的作用（刘永俊，2007）。

收稿日期：2009－11－30；修回日期：2011－01－20。

基金项目：国家自然科学基金项目（30671672）；西北农林科技大学青年科学基金专项。

由于自然环境的变化和人为活动的影响，黄土高原地区天然植被几乎破坏殆尽，导致区域生态平衡失调、水土流失严重、土壤基质和气候旱化，黄土高原成为我国水土流失最严重、生态环境极其脆弱的地区之一。因此，恢复本地区的生态环境受到高度重视。鉴于丛枝菌根真菌在植被恢复中发挥着重要作用，因此，黄土丘陵沟壑区植被恢复的不同阶段中有关 AM 真菌方面的问题自然就值得关注了。

目前，国内学者对丛枝菌根真菌方面的研究主要集中在西北干旱区、盐碱地及其他地区，如盛敏等(2007)对西北盐碱土主要植物丛枝菌根真菌进行了初步研究；包玉英(2004)对内蒙古草原和荒漠丛枝菌根共生多样性及其生态分布进行了系统研究，唐明等(2005；2007)对内蒙古盐碱土中 AM 真菌多样性和宁夏旱生植物 VA 菌根真菌进行了研究；王亚军等(2006)对定西柠条(*Caragana korshinskii*)VA 菌根真菌特征及种类进行了初步研究；刘永俊等(2009)对不同演替阶段人工柠条林丛枝菌根真菌分子多样性进行了研究；石兆勇等(2006)等对天山北坡丛枝菌根真菌多样性进行了研究；贺学礼等(2006a；2006b)对黄土高原柠条 AM 真菌多样性及空间分布及毛乌素沙地豆科植物丛枝菌根真菌分布进行了研究；张万红等(2006a；2006b)对中国北方 VA 菌根真菌资源进行了总结，并对黄土高原柠条根际的 VA 菌根真菌进行了初步研究；赵金莉等(2010)研究了毛乌素沙地克隆植物生长对 AM 真菌多样性和菌根形成的影响；张英等(2003)对都江堰地区丛枝菌根真菌多样性进行了研究；蔡晓布等(2005)研究了西藏高原草地植物 AM 真菌多样性及其环境影响因子等等，而对黄土丘陵沟壑区尤其对该区植被不同恢复阶段的丛枝菌根真菌方面的认识还不够。笔者通过对黄土丘陵沟壑区植被自然恢复不同阶段的丛枝菌根真菌的调查研究，揭示该区植被恢复不同阶段的 AM 真菌多样性，并分析其分布状况，为进一步探讨本区撂荒地植被自然恢复的生态学过程及其机制提供参考。

1　研究区域概况与研究方法

1.1　研究区域概况

研究区设在典型的黄土高原丘陵沟壑区——陕西安塞县境内，105° 51′ 44″ E—109° 26′ 18″ E，36°22′40″N—36°32′16″N，海拔 997 ~ 1 731 m。地形复杂，梁峁连绵，沟壑纵横，全县水土流失面积 2 832 km^2，占总面积的 96 %，是黄河中游水土流失重点县之一，也是西北典型生态环境脆弱区。安塞县属暖温带半干旱气候区，年平均降水量 500 mm 左右，且分布不均匀，降雨集中。年平均蒸发量 1 000 mm，无霜期 160 ~ 180 天，年日照时间 2 352 ~ 2 573 h，≥10 ℃积温 2 866 ℃，年平均气温 8.9 ℃，7 月平均气温 16.2 ℃，1 月平均气温2.7 ℃，极端最低气温 −23.6 ℃。土壤以黄绵土为主，约占总面积的 95 %(马祥华等，2005)。

1.2　研究方法

1.2.1　样品采集　2006 年 7 月，在陕西安塞县境内的纸坊沟流域，采集由撂荒到灌丛的植被恢复过程中不同恢复阶段优势植物的根样和根际土壤(表 1)，分析其菌根真菌的侵染状况、孢子密度和根际 AM 真菌物种多样性。在每个阶段，每个优势种的植物随机挖取至少 3 株，同时在每株植物的根围大约 2 ~ 30 cm 土层范围内，分别取表层土(2 ~ 10 cm)、中层土(10 ~ 20 cm)、深层土(20 ~ 30 cm)共约 1 500 g。对不同恢复阶段间的比较，采用各恢复阶段中各样本植物的平均值。

1.2.2　菌根侵染率的测定　采集的根样用清水冲洗 2 ~3 次，于 10% KOH 溶液进行浸泡，并于 90 ℃水浴锅中加热 1 h，用碱性过氧化氢室温下软化 20 min，在 1% 的 HCl 溶液中酸化 3 min，然后用酸性品红乳酸溶液在 90 ℃下染色 30 min，再进行脱色与制片，于显微镜下观察 AMF 结构(丛枝、泡囊、无隔菌丝)，统计菌根侵染率(弓明钦等，1997)。

1.2.3　AM 真菌孢子的分离　按照 Dalpe(1993)描述的湿筛倾析 − 蔗糖离心法对 100 g 风干土壤中的 AM 真菌孢子进行分离。在体视显微镜下挑取 AM 真菌的孢子，后用水、乳酚、棉兰、Melzer 试剂、PVLG(聚乙烯醇 − 乳酸 − 甘油)和 PVL(聚乙烯醇 − 乳酸酚)等为浮载剂制片(唐明，2000)，并对孢子进行计数。

1.2.4　AM 真菌的鉴定　采用形态学鉴定法，根据孢子的大小、颜色、孢壁结构、连孢菌丝的特征以及在各种封片剂中的理化反应等，参照 Schenck 等(1990)的“VA 菌根真菌鉴定手册”和最新分类系统，同时参照国际 VA 菌种保藏中心及国内外种属描述特征资料进行 VA 菌根真菌种的鉴定分类。

1.2.5　AM 真菌多样性的测定　即分析 AM 真菌的孢子密度、种的丰度、物种多样性指数(香农 − 威纳指数 *H*)和物种均匀度等。

孢子密度(SD，spore density) = 100 g 土壤中含有的 AM 真菌的孢子数。

表1 植被恢复阶段概况

Tab. 1 The general situation of different vegetation restoration stages

植被恢复阶段 Vegetation restoration stages	主要植物 Main plants
阳坡半阳坡 Sunny, half sunny slopes	
第1阶段：撂荒1~2年草本植物群落 The first stage：1~2 years herb communities	狗牙根 *Cynodon dactylon*、狗尾草 *Setaria viridis*
第2阶段：茭蒿+长芒草群丛 The second stage：*Artemisia giraldii* + *Stipa bungeana* associations	茭蒿 *Artemisia giraldii*、长芒草 *Stipa bungeana*
第3阶段：白羊草-达乌里胡枝子群丛 The third stage：*Bothriochloa ischaemum-Lespedeza davurica* associations	白羊草 *Bothriochloa ischaemum*、达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica*
第4阶段：杂灌丛阶段 The fourth stage：Mixed shrub associations	达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica*、糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*、长芒草 *Stipa bungeana*、北京隐子草 *Cleistogenes hancei*、狼牙刺 *Sophora davidii*
第5阶段：狼牙刺-白羊草(茭蒿)群丛 The fifth stage：*Sophora davidii*- *Bothriochloa ischaemum* (*Artemisia giraldii*) associations	狼牙刺 *Sophora davidii*、白羊草 *Bothriochloa ischaemum*、茭蒿 *Artemisia giraldii*、柠条 *Caragana korshinskii*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*
阴坡半阴坡 Shady, half shady slopes	
第1阶段：撂荒1~2年草本植物群落 The first stage：1-2 years herb communities	茵陈蒿 *Artemisia capillaris*
第2阶段：铁杆蒿-茭蒿群丛,铁杆蒿群丛 The second stage：*Artemisia gmelinii*- *Artemisia giraldii* associations, *Artemisia gmelinii* associations	铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*、茭蒿 *Artemisia giraldii*
第3阶段：长芒草-达乌里胡枝子群丛 The third stage：*Stipa bungeana*- *Lespedeza davurica* associations	长芒草 *Stipa bungeana*、达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica*
第4阶段：杂灌丛阶段 The fourth stage：Mixed shrub associations	北京丁香 *Syringa pekinensis*、灰栒子 *Cotoneaster acutifolius*、柔毛绣线菊 *Spiraea pubescens*、黄蔷薇 *Rosa hugonis*、杠柳 *Periploca sepium*、虎榛子 *Ostryopsis davidiana*
第5阶段：沙棘群丛 The fifth stage：*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* associations	沙棘 *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*

种的丰度(SR, species richness) = 每份土样中AM真菌种的数目。

物种多样性：Shannon-Wiener 指数 $H = -\sum P_i \ln P_i$, Simpson 指数 $D = 1 - \sum P_i^2$; $P_i = n_i/N$, n_i 为种 i 的孢子个数，N 为样品中所有孢子的数目。

物种均匀度指数 $J = H/\ln SR$。

1.2.6 数据分析 采用 SPSS 12.0 对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同恢复阶段中菌根侵染率和孢子密度

表2显示了阴、阳坡植被不同恢复阶段中的菌根侵染状况和根际土壤中的孢子密度。在阳坡半阳坡的植被不同恢复阶段中,平均菌根侵染率以第1阶段最高,为77.10%,并显著高于侵染率最低的第2阶段(35.00%),其他各阶段间差异不显著($P<0.05$)。不同恢复阶段中根际的孢子密度,以第4阶段最高,为每100 g土135个,第1阶段的孢子密度最低,为每100 g土83个,且各恢复阶段间差异不显著($P<0.05$)。而对于阴坡半阴坡的不同恢复阶段,各阶段的平均侵染率差异不显著($P<0.05$)。对于根际的孢子密度,以第4阶段最高,为每100 g土127个,第1阶段最低,为每100 g土60个,且第4,5阶段的孢子密度显著高于第1,2阶段($P<0.05$)。

表2 不同恢复阶段丛枝菌根真菌侵染率和孢子密度①

Tab. 2 The infection rafe and spore density of arbuscular mycorrhizal fungi in different vegetation restoration stages

植被恢复阶段 Vegetation restoration stage	AM真菌侵染率 AMF infecion rate(%)	孢子密度 Spore density/(100 g)$^{-1}$
阳坡半阳坡 Sunny, half sunny slopes		
第1阶段 The first stage	77.10±0.485a	83±7.000a
第2阶段 The second stage	35.00±0.000b	110±15.000a
第3阶段 The third stage	66.68±8.325ab	101±14.000a
第4阶段 The fourth stage	57.75±11.085ab	135±19.789a
第5阶段 The fifth stage	62.59±7.979ab	125±15.166a
阴坡半阴坡 Shady, half shady slopes		
第1阶段 The first stage	23.60±0.737a	60±4.041a
第2阶段 The second stage	57.50±12.500a	70±4.000a
第3阶段 The third stage	43.79±1.215a	94±26.000ab
第4阶段 The fourth stage	54.73±15.150a	127±10.132b
第4阶段 The fifth stage	36.67±7.265a	125±3.215b

① 不同的字母表示差异达到显著水平(LSD, $P<0.05$)下同。Different letters expressed the significant differences(LSD, $P<0.05$), The same below.

表 3　不同恢复阶段中主要植物的菌根真菌侵染率和孢子密度

Tab. 3　Infection rate and spore density of AM fungi of main plants in different vegetation restoration stages

植被恢复阶段和植物 Vegetation restoration stages and major plant	AM 真菌侵染率 AMF infection rate(%)	孢子密度 Spore density/ (100 g)$^{-1}$
阳坡半阳坡 Sunny, half sunny slopes		
第 1 阶段 The first stage		
狗牙根 *Cynodon dactylon*	77.58 ± 1.09	90 ± 2.08
狗尾草 *Setaria viridis*	76.61 ± 2.53	76 ± 3.79
第 2 阶段 The second stage		
茭蒿 *Artemisia giraldii*	35.00 ± 5.00	95 ± 3.00
长芒草 *Stipa bungeana*	35.00 ± 6.45	125 ± 2.00
第 3 阶段 The third stage		
白羊草 *Bothriochloa ischaemum*	75.00 ± 2.89	115 ± 2.52
达乌里胡枝子 *Lespedegeri davurica*	58.35 ± 1.65	87 ± 1.73
第 4 阶段 The fourth stage		
达乌里胡枝子 *Lespedegeri davurica*	47.50 ± 11.09	86 ± 1.00
糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*	30.00 ± 7.07	170 ± 5.13
长芒草 *Stipa bungeana*	75.00 ± 5.00	185 ± 2.89
北京隐子草 *Cleistogenes hancei*	45.00 ± 5.00	94 ± 3.06
狼牙刺 *Sophora davidii*	91.25 ± 8.75	140 ± 5.03
第 5 阶段 The fifth stage		
狼牙刺 *Sophora davidii*	84.38 ± 6.64	130 ± 2.08
白羊草 *Bothriochloa ischaemum*	75.61 ± 2.34	180 ± 7.21
茭蒿 *Artemisia giraldii*	57.50 ± 4.79	115 ± 4.16
柠条 *Caragana korshinskii*	56.70 ± 12.02	110 ± 3.46
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	38.75 ± 1.25	90 ± 3.00
阴坡半阴坡 Shady, half shady slopes		
第 1 阶段 The first stage		
茵陈蒿 *Artemisia capillaris*	23.60 ± 0.74	60 ± 4.04
第 2 阶段 The second stage		
铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*	45.00 ± 2.88	66 ± 2.00
茭蒿 *Artemisia giraldii*	70.00 ± 4.08	74 ± 2.65
第 3 阶段 The third stage		
长芒草 *Stipa bungeana*	45.00 ± 2.64	120 ± 3.00
达乌里胡枝子 *Lespedegeri davurica*	42.57 ± 2.05	68 ± 8.00
第 4 阶段 The fourth stage		
北京丁香 *Syringa pekinensis*	75.00 ± 6.45	102 ± 2.00
灰栒子 *Cotoneaster acutifolium*	17.50 ± 4.79	165 ± 2.65
柔毛绣线菊 *Spiraea pubescens*	55.00 ± 5.00	150 ± 2.00
黄蔷薇 *Rosa hougonis*	76.70 ± 3.33	110 ± 2.52
杠柳 *Periploca sepium*	100.00 ± 0.00	115 ± 5.00
虎榛子 *Ostryopsis davidiana*	4.17 ± 0.83	120 ± 5.00
第 5 阶段 The fifth stage		
沙棘 *Hippophae rhamnodies* subsp. *sinensis*	36.67 ± 7.26	125 ± 3.21

另外,分析了植被不同恢复阶段中主要植物丛枝菌根真菌侵染率和孢子密度(表 3)。在阳坡半阳坡菌根侵染率以第 4 阶段中的狼牙刺为最高,为 91.25%,孢子密度以第 4 阶段中的长芒草为最高,达到每 100 g 土 185 个；对于阴坡半阴坡,则丛枝菌根真菌侵染率和孢子密度分别为第 4 阶段的杠柳(100.00%)和灰栒子为最高(每 100 g 土 165 个)。

2.2　不同恢复阶段中 AM 真菌物种丰度、多样性和均匀度

不同恢复阶段中 AM 真菌物种的丰度、多样性和均匀度见表 4。在阳坡半阳坡上,AM 真菌物种丰度以第 4 阶段为最高(7.40),并显著高于第 1,2,3 阶段,第 5 阶段的物种丰度显著高于第 1,3 阶段,第 3 阶段与第 2 阶段间也达到了差异显著的水平($P<0.05$)。对于多样性指数(H,D)表现为：第 4 阶段显著高于第 1,3 阶段,其余各阶段差异不显著($P<0.05$)。阴坡半阴坡的 AM 真菌物种丰度和多样性(H,D)都呈现相同的规律,即第 4,5 阶段明显高于第 1,2 和第 3 阶段,其余各阶段差异不显著($P<0.05$)。在均匀度方面,阳坡半阳坡上第 5 阶段与第 2,3,4 阶段差异显著,在阴坡半阴坡上则差异不显著。

2.3　不同恢复阶段中的 AM 真菌

在阴、阳坡植被不同恢复阶段中,共分离鉴定出 18 种 AM 真菌,隶属于巨囊霉属(*Gigaspora*)、盾巨囊霉属(*Scutellospora*)和球囊霉属(*Glomus*),其中巨囊霉属 2 种,盾巨囊霉属 1 种,球囊霉属 15 种(表 5),为优势属。盾巨囊霉属的分布范围较小,只出现于阳坡的第 1 阶段,而巨囊霉属也仅限于阳坡的第 1、3 阶段以及阴坡的第 5 阶段。在分离到的 18 种 AM 真菌中,*Glomus constrictum* 和 *Glomus geosporum* 2 种为各个阶段的共有种,应为优势种。

3　结论与讨论

黄土丘陵沟壑区植被恢复过程不同阶段上主要建群植物或优势植物根围的 AM 真菌具有较丰富的种类,共分离到 18 种 AM 真菌,占我国北方 AM 真菌总种数的 69.23%,低于内蒙古盐碱土中 AM 真菌种类(26 种),与毛乌素沙地 AM 真菌种类(20 种)接近,本区分离到的 AM 真菌隶属于 3 属——*Gigaspora*、*Scutellospora* 和 *Glomus*,其中以 *Glomus* 为优势属,共有 15 种,占总种数的 83.33%,这与已报道的调查结果是一致的(彭岳林等, 2006；包玉英, 2004；唐明等, 2007；山宝琴等, 2009)。在已报道的 190 多种 AM 真菌中,*Glomus* 是能够形成 AM 真

表 4 不同恢复阶段中 AM 种的丰度、多样性和均匀度

Tab. 4 Species richness, diversity and eveness of AM fungi in different vegetation restoration stages

植被恢复阶段 Vegetation restoration stage	SR	*H*	*D*	*J*
阳坡半阳坡 Sunny, half sunny slopes				
第 1 阶段 The first stage	4. 50 ±0. 500ab	1. 20 ±0. 008a	0. 65 ±0. 002a	0. 87 ±0. 056ab
第 2 阶段 The second stage	6. 00 ±0. 500bc	1. 48 ±0. 016ab	0. 68 ±0. 004ab	0. 94 ±0. 012b
第 3 阶段 The third stage	4. 21 ±0. 460a	1. 37 ±0. 052a	0. 67 ±0. 007a	0. 96 ±0. 037b
第 4 阶段 The fourth stage	7. 40 ±0. 286d	1. 66 ±0. 077b	0. 76 ±0. 027b	0. 89 ±0. 038b
第 5 阶段 The fifth stage	6. 54 ±0. 389cd	1. 47 ±0. 087ab	0. 72 ±0. 022ab	0. 75 ±0. 023a
阴坡半阴坡 Shady, half shady slopes				
第 1 阶段 The first stage	3. 33 ±0. 333a	1. 08 ±0. 043a	0. 62 ±0. 019a	0. 91 ±0. 048a
第 2 阶段 The second stage	3. 50 ±0. 170a	1. 06 ±0. 055a	0. 57 ±0. 037a	0. 85 ±0. 077a
第 3 阶段 The third stage	3. 84 ±0. 165a	1. 13 ±0. 071a	0. 59 ±0. 019a	0. 84 ±0. 026a
第 4 阶段 The fourth stage	6. 06 ±0. 369b	1. 46 ±0. 038b	0. 69 ±0. 018b	0. 84 ±0. 027a
第 5 阶段 The fifth stage	5. 67 ±0. 333b	1. 49 ±0. 027b	0. 71 ±0. 018b	0. 81 ±0. 034a

表 5 不同恢复阶段中的丛枝菌根真菌①

Tab. 5 Arbuscular mycorrhizal fungi in different vegetation restoration stages

AM 真菌 AM fungi	阳坡半阳坡 Sunny, half sunny slopes					阴坡半阴坡 Shady, half shady slopes				
	第 1 阶段 The first stage	第 2 阶段 The second stage	第 3 阶段 The third stage	第 4 阶段 The fourth stage	第 5 阶段 The fifth stage	第 1 阶段 The first stage	第 2 阶段 The second stage	第 3 阶段 The third stage	第 4 阶段 The fourth stage	第 5 阶段 The fifth stage
Gigaspora gigantean	+	−	−	−	−	−	−	−	−	+
Gi. margarita	+	−	+	−	−	−	−	−	−	−
Scutellospora calospora	+	−	−	−	−	−	−	−	−	−
Glomus aggregatum	−	−	−	−	+	−	−	−	−	−
G. albidum	−	−	−	−	+	−	−	−	+	+
G. caledonium	−	+	−	+	+	−	−	−	+	−
G. claroideum	−	−	−	+	+	−	+	−	+	+
G. constrictum	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
G. coronatum	−	+	−	+	+	+	−	+	+	+
G. dimorphicum	−	+	−	+	−	−	+	−	+	−
G. etunicatum	−	−	−	+	+	−	−	−	−	−
G. fasciculatum	+	+	+	+	+	−	−	+	−	−
G. geosporum	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
G. intraradices	−	+	+	−	+	−	−	−	+	+
G. monosporum	−	−	−	+	+	−	−	−	+	+
G. mosseae	−	−	−	−	+	−	−	−	−	−
G. reticulatum	−	−	+	+	+	−	−	−	+	+
G. versiforme	+	+	+	+	−	+	+	+	+	−

① +：有分布 Possible distribution；−：无分布 No distribution.

菌的球囊霉门中最大的一个属，这与 *Glomus* 中物种的生物学和生态学特性有关，其大多数种类是广谱型的，对环境适应性强，如 *G. constrictum* 和 *G. geosporum* 2 种在本区阴、阳坡的植被各恢复阶段都出现，显然为优势种。唐明等(2007)对内蒙古盐碱土中 AM 真菌多样性的研究结果表明 *G. geosporum* 和 *G. versiforme* 为优势种；山宝琴等(2009)对毛乌素沙地中 AM 真菌多样性的研究结果也表明 *G. geosporum* 为优势种，德国和匈牙利盐碱土中优势种为 *G. geosporum* 和 *G. caledonium*(Hildebrandt *et al.*, 2001；Landwehr *et al.*, 2002)；而在西藏高原草地中优势种为 *G. mosseae*(蔡晓布等，2005)。由此可知，AM 真菌的多样性及分布等不仅受地理环境(气候、土壤、地形等生态因子)的影响，而且在漫长的进化过程中，不同 AM 真菌和宿主植物的协同进化产生了与其所处的生态环境相适应的 AM 真菌物种多样性。

研究结果表明：阴、阳坡植被恢复过程不同阶段中的所有优势植物都能够形成丛枝菌根真菌，由此可见，AM 真菌在黄土丘陵沟壑区的分布是较为普遍的，表明本地具有相对丰富的菌根植物多样性，即本区植物对 AM 真菌的依赖性较大。在阳坡半阳坡的植被不同恢复阶段，只有第 1,2 阶段的菌根真菌侵染率差异显著，其他各阶段间均差异不显著，阴

坡半阴坡的植被不同恢复阶段的菌根侵染率差异不显著,可见各恢复阶段的植物对 AM 真菌的依赖性差异不显著,表明 AM 真菌在各恢复阶段都可能发挥着重要的生态功能。然而,由于宿主植物种类的不同,处于同一恢复阶段的植物其菌根真菌侵染率也不相同,而且,对于处于不同恢复阶段中的同一种类的植物,其菌根真菌侵染率也有很大的差异。例如,长芒草在阳坡的第 2 阶段——茭蒿 + 长芒草群丛中的侵染率为 35.00% ,而在阳坡第 4 阶段——杂灌丛阶段的侵染率则高达 75.00% ,可见,不仅宿主植物的种类,且微生境的不同也影响着菌根真菌的形成。对于孢子密度,阳坡半阳坡的植被不同恢复阶段间差异不显著,阴坡半阴坡的第 4,5 阶段的孢子密度显著高于第 1,2 阶段,可见孢子密度也类似于菌根真菌侵染率,受到宿主植物和环境因子的影响,这与已报道的一些研究结果一致(刘永俊, 2007; Wang *et al*., 2004; 石兆勇等, 2006)。宿主植物对菌根菌侵染率和孢子密度的影响可能主要是由于不同宿主植物与 AM 真菌的亲和力不同所致,而环境则可能主要是通过影响 AM 真菌和宿主植物的生长与发育,从而间接的影响菌根真菌侵染率和孢子密度。

对于不同恢复阶段,AM 真菌物种的丰度和多样性的差异,可能是由于宿主植物的种类和宿主植物多样性的差异共同作用的结果,因为在植被不同恢复阶段,其优势植物的种类不尽相同,且有研究表明,AM 真菌与宿主植物是 2 个相互依赖的实体,任何一方多样性的变化都会影响另一方多样性的变化(Sanders, 2004),在种类数量上两者具有显著的正相关(Landis *et al*., 2004)。从宿主植物角度来说,由于 AM 真菌生长发育的每一个阶段都是受宿主植物根系的影响(Bever *et al*., 1996),因此,宿主植物是决定其 AM 真菌群落组成的重要因素(Eom *et al*., 2000)。AM 真菌物种均匀度,在阳坡半阳坡上第 5 阶段与第 2,3,4 阶段相比差异显著,在阴坡半阴坡上则差异不显著。

AM 真菌是专性共生真菌,植物多样性在一定程度上决定其多样性(唐明等, 2007);然而,在本区植被恢复过程中,某一个恢复阶段究竟谁起决定作用,或者说在某一个阶段是 AM 真菌多样性决定地上植物群落物种多样性,还是植物群落物种多样性决定 AM 真菌多样性,或在某一阶段相互促进协同发展,等等,这些问题还不清楚。这些问题的解决,有助于探讨本区撂荒地植被自然恢复的生态学过程及其机制提供可靠依据。本文的研究结果初步表明:在本区植被恢复的初期是植物多样性决定 AM 真菌物种多样性,在初期—中后期间(撂荒 1 ~2 年生草本植物群落—杂灌丛)二者协同发展,这一结论尚需在后续研究中进一步证实。总之,本论文的研究结果对进一步深入探讨黄土丘陵沟壑区 AM 真菌多样性与植物群落物种多样性关系具有重要意义,同时对于筛选具有适应性能力强的 AM 真菌且把菌根生物技术应用在黄土高原植被恢复中具有重要意义。

参　考　文　献

包玉英. 2004. 内蒙古草原和荒漠丛枝菌根共生多样性及其生态分布. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文.

蔡晓布,彭岳林,冯　固,等. 2005. 西藏高原草地植物 AM 真菌多样性及其环境影响因子研究. 土壤学报, 42(4): 642 -650.

弓明钦,陈应龙,仲崇禄. 1997. 菌根研究及应用. 北京: 中国林业出版社.

贺学礼,赵丽莉,杨宏宇. 2006a. 黄土高原柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性及空间分布. 生态学报,26(11): 3835 -3840.

贺学礼,赵丽莉,杨宏宇. 2006b. 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,16(6): 684 -688.

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

刘永俊. 2007. 黄土沟壑区柠条丛枝菌根生态学研究. 兰州大学生命科学学院硕士学位论文.

刘永俊,冯虎元. 2009. 不同演替阶段人工柠条林丛枝菌根真菌分子多样性研究. 中国沙漠,29(6): 1141 -1147.

马祥华,焦菊英. 2005. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系. 水土保持科学,3(2) : 15 -22.

彭岳林,钱　成,蔡晓布,等. 2006. 藏北高原 AM 真菌种群多样性及生态分布特征. 农业资源与环境科学,22(8): 507 -510.

山宝琴,贺学礼,段小圆. 2009. 毛乌素沙地密集型克隆植物根围 AM 真菌多样性及空间分布. 草业学报,18(2): 146 -154.

石兆勇,陈志超,张立运,等. 2006. 天山北坡丛枝菌根真菌多样性及地带性分布. 中国科学: D 辑(地球科学), 36(增Ⅱ): 126 -132.

盛　敏,唐　明,迪丽努尔,等. 2007. 西北盐碱土主要植物丛枝菌根真菌研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 35(2): 76 -78.

唐　明. 2000. 陕西林木菌根研究. 西安: 西安地图出版社.

唐　明,黄艳辉,盛　敏,等. 2007. 内蒙古盐碱土中 AM 真菌的多样性与分布. 土壤学报, 44(6): 1105 -1110.

唐　明,杨慧平,王亚军,等. 2005. 宁夏旱生植物 VA 菌根真菌的研究. 西北林学院学报,20(2): 78 -82.

王亚军,唐　明,迪丽努尔. 2006. 定西柠条 VA 菌根真菌特征及种类研究. 干旱地区农业研究,24(3): 215 -218.

赵金莉,贺学礼. 2010. 毛乌素沙地克隆植物生长对 AM 真菌多样性和菌根形成的影响. 生态学报,30(5): 1349 -1355.

张　英,郭良栋,刘润进. 2003. 都江堰地区丛枝菌根真菌多样性与生态研究. 植物生态学报,27(4): 537 -544.

张万红,唐　明. 2006a. 中国北方 VA 菌根真菌资源. 西北林学院学

报,21(2): 121 -125.

张万红,唐 明. 2006b. 黄土高原柠条根际的 VA 菌根真菌. 西北林学院学报,21(1): 57 -59.

Bever J D, Morton J B, Antonovics J, *et al*. 1996. Host-dependent sporulation and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a mown grassland. Journal of Ecology, 84(1): 71 -82.

Dalpe Y. 1993. Vesicular-arbuscular mycorrhiza // Carter M R. Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, F L, 287 -301.

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

Eom A H, Hartnett D C, Wilson G W T. 2000. Host plant species effects on arbuscular mycorrhizal fungal communities in tallgrass prairie. Oecologia, 122(3): 435 -444.

Hildebrandt U, Janetta K, Ouziad F, *et al*. 2001. Arbuscular mycorrhizal colonization of halophytes in central European salt marshes. Mycorrhiza, 10(4): 175 -183.

Landis F C, Gargas A, Givnish T J. 2004. Relationships among arbuscular mycorrhizal fungi, vascular plants and environmental conditions in oak savannas. New Phytologist, 164(3): 493 -504.

Landwehr, M, HildebrandtU, Wild P. 2002. The arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus geosporum* in European saline, sodium and gypsum soils. Mycorrhiza, 12(4): 199 -211.

Schenck N C, Perez Y. 1990. Manual for Identification of VA Mycorrhizal Fungi. Florida: Synergistic Publications.

Sanders I R. 2004. Plant and arbuscular mycorrhizal fungal diversity—are we looking at the relevant levels of diversity and are we using the right techniques. New Phytologist, 164(3): 415 -418.

Wang F Y, Liu R J, Lin X G, *et al*. 2004. Arbuscular mycorrhizal status of wild pants in saline-alkaline soils of the Yellow River Delta. Mycorrhiza, 14(2): 133 -137.

(责任编辑 朱乾坤)