

大兴安岭兴安落叶松森林不同林型 AMF 分布特性

杨秀丽¹ 闫伟^{1*} 包玉英² 樊永军¹

(1. 内蒙古农业大学林学院 内蒙古 呼和浩特 010018)
(2. 内蒙古大学生命科学学院 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 为了初步了解内蒙古大兴安岭兴安落叶松森林生态系统丛枝菌根真菌(AMF)多样性状况, 调查了5种落叶松林型和火烧迹地土壤中 AMF 状况。从90份土样中共分离到 AMF 4属53种, 其中无梗囊霉属 *Acaulospora* 25种(47.17%), 球囊霉属 *Glomus* 23种(43.40%), 此二属为优势属, 内养囊霉属 *Entrophospora* 4种(7.55%), 巨孢囊霉属 *Gigaspora* 1种(1.89%)。杜香落叶松林的优势种为浅窝无梗囊霉 *A. lacunosa*; 草地落叶松林没有优势种, 最常见种为浅窝无梗囊霉 *A. lacunosa*; 柴桦落叶松林的优势种为一种无梗囊霉 *Acaulospora* sp. 3 和缩球囊霉 *G. constrictum*; 落叶松皆伐林的优势种为刺无梗囊霉 *A. spinosa*; 落叶松渐伐林的优势种为一种球囊霉 *Glomus* sp. 3; 火烧迹地的优势种为刺无梗囊霉 *A. spinosa*。5种林型中以柴桦落叶松林的孢子密度(41.00个/50g 风干土)、物种丰富度(12.66种/土样)、多样性指数($H = 2.12$, $D = 0.85$)都为最高。孢子密度与有机质含量呈明显正相关($r = 0.956^*$), 物种丰富度与速效磷含量呈明显的负相关($r = -0.899^*$)。

关键词: 兴安落叶松森林, AMF, 孢子密度, 种的丰度, 多样性指数

AMF Diversity of Different *Larix gmelinii* Forest Types in the Great Xinganling Mountains

YANG Xiu-Li¹ YAN Wei^{1*} BAO Yu-Ying² FAN Yong-Jun¹

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China)
(2. College of Life Science, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: The diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) associated with *Larix gmelinii* forest were investigated in the Great Xinganling mountains Inner Mongolia. Five different *Larix gmelinii* forest types and *L. gmelinii* forest burned areas were surveyed. Of the 53 AM fungal species belonging to four genera isolated from 90 soil samples, 25(47.17%) belonged to *Acaulospora*, 23(43.40%) to *Glomus*, 4(7.55%) to *Entrophospora*, and 1(1.89%) to *Gigaspora*. *Acaulospora* and *Glomus* were the dominant genera. *A. lacunosa* was dominant species of *Ledum palustre*-*L. gmelinii* virgin forest; *A. lacunosa* was the most common species of *Herbage*-*L. gmelinii* forest; *Acaulospora* sp. 3 and *G. constrictum* were the dominant species of *Betula fruticosa*-*L. gmelinii* forest; *A. spinosa* was dominant species of *L. gmelinii* clearcutting forest; *Glomus* sp. 3 was dominant species of *L. gmelinii* shelterwood; *A. spinosa* was dominant species of *L. gmelinii* forest burned areas. Of the five forest types, *Betula fruticosa*-*L. gmelinii* virgin forest had the most

基金项目: 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(No. 707014); 内蒙古自然科学基金重大(No. 200607010501)

* 通讯作者: Tel: 86-471-4301179; ✉: weiyan@imau.edu.cn

收稿日期: 2009-05-31; 接受日期: 2009-08-31

big spore densities, species richness, Shannon-Wiener index and Simpson index. The spore densities had significant positive correlation with organic matter in the soil; while the spore richness had significant positive correlation with available P.

Keywords: *Larix gmelinii* forests, AMF, Spore densities, Species richness, Shannon-Wiener index and Simpson index

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, 简称 AMF)是自然界中一类能够与植物形成共生体系的菌物, 80%的陆地植物能与 AMF 形成共生体^[1]。AMF 影响着寄主植物个体生长和群落的演替及生产力, 能够改善植物的营养状况、提高寄主植物抗逆性, 从而增强植物的竞争能力, 在退化生态系统植被恢复及生态重建中扮演着重要的角色^[2-4]。AMF 分布广泛、存在于各陆地生境中^[5]。

大兴安岭是我国唯一的寒温带地区, 以兴安落叶松分布为主体, 是我国北部边疆最大的原始林区, 也是我国唯一的寒温带针叶林区, 在维护我国东北地区生态平衡中起着重要作用。但大兴安岭森林从 19 世纪末开始采伐, 百余年来, 落叶松林遭到严重的人为破坏, 可采资源日趋减少, 落叶松林质量不断下降, 因此对这类森林的研究和保护工作显得尤为重要。本文对落叶松林土壤中 AMF 的分布特性进行了初步研究, 旨在从菌根共生学入手研究落叶松森林生态系统植物多样性与 AM 真菌多样性的关系, 由此探索该系统的生态学问题。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选择国家级内蒙古大兴安岭森林生态系统野外观察研究站为研究区域。位于内蒙古自治区根河市根河林业局潮查林场境内, 地处大兴安岭西北坡。地理坐标为: 北纬 50°49'~50°51', 东经 121°30'~121°31'。该地区为中山山地, 海拔 784 m~1142 m, 属寒温带湿润气候区, 年均气温-5.4°C。林地土壤为棕色针叶林土, 土层厚度 30 cm~40 cm, 基岩以花岗岩与玄武岩为主。森林类型为寒温带针叶林, 大部分仍保留原始林景观^[6]。

主要成林树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*), 其面积占总面积的 79%。主要林型有杜香—落叶松林(*Ledum palustre*-*L. gmelinii* forest)、杜鹃—落叶松林(*Rhododendron dahuricum*-*L. gmelinii* forest)、草类—落叶松林(*Herbage*-*L. gmelinii* forest)、柴桦—落叶

松林(*Betula fruticosa*-*L. gmelinii* forest)、真藓—落叶松林型(*B. argenteum*-*L. gmelinii* forest), 伴生树种有白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)。林下植物常见有杜香(*Ledum palustre*)、杜鹃(*Rhododendron parvifolium*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*)、舞鹤草(*Maianthemumbif olium*)、山黧豆(*Lathyrus quinquenervius*)等^[6]。

选择采样的火烧迹地在火烧前为越橘落叶松林。于 2007 年 9 月火烧, 采样时距火烧时间约为 1 年, 火烧面积约为 1 hm², 采样时火烧地表有零星小片状苔草和杜鹃分布, 土样采自无植被的火烧地面, 距这些片状生长的植物大于 3 m 处。

1.2 样品采集

于 2008 年 8 月下旬在大兴安岭森林生态系统野外观察研究站附近原始林区选择有代表性的 3 种未受干扰林型, 即杜香落叶松林(*Ledum palustr*-*L. gmelinii* virgin forest)、草类落叶松林(*Herbage*-*L. gmelinii* virgin forest)、柴桦落叶松林(*Betula fruticosa*-*L. gmelinii* virgin forest)和 2 种被干扰林, 即落叶松皆伐林(*L. gmelinii* clearcutting forest)(于 1987 年被皆伐)和落叶松渐伐林(*L. gmelinii* shelterwood)(于 1987 年开始被渐伐), 共 5 种林型和 1 个对照区火烧迹地(*L. gmelinii* forest burned areas)(于 2007 年 9 月被火烧, 采样时距火烧时约为 1 年)为研究对象。在每个林型随机设 3 个 20 m × 20 m 样方, 每个样方内采用五点取样法取土样 5 个, 共采取土样 90 个。

土样具体采集方法是: 先去掉上层的枯枝落叶, 取 0~30 cm(同时考虑根系的分布深度)土壤 2 kg, 装入土袋中, 附上标签, 记录采样人、采样时间、地点、地上植被组成及周围环境等, 填写登记表并记录各采样点的地理位置, 海拔高度等。土壤样品带回实验室自然风干后存放于 4°C 冰箱内, 于 3 个月内处理完。

1.3 AMF 孢子的分离与鉴定

从每份土样中取 100 g 风干土壤, 用湿筛倾析

<http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

—蔗糖离心法分离 AMF 孢子^[7]。湿筛得到的孢子在体式显微镜下计数,计数时孢子果和丛生孢子按照 1 个孢子计算。湿筛得到的孢子一部分保存在 5% 的福尔马林中,另一部分分别用 PVLG(聚乙烯醇-乳酸-甘油)和 PVLG+Melzer's(体积比 1:1)作为浮载剂制成标本片后于光学显微镜下观察并拍照。根据孢子的大小、颜色、壁式结构和连孢菌丝的形态学特征并参考 Schenk 和 Perez (1988)的鉴定手册^[8]以及 INVAM(<http://inva.caf.wvu.edu/Myc-Info/>)和 IBG 的鉴定图片对 AM 真菌进行鉴定,按照 Morton & Redecker (2001)^[9]的分类系统对 AM 真菌进行鉴定分类。

1.4 AMF 群落结构特征指标及数据分析

计算 AMF 物种丰富度、孢子密度、频度、相对多度、重要值、物种多样性指数(Shannon-wiener index 和 Simpson index), 并采用 SPSS11.5 对上述指标进行方差分析。

按照重要值将 AMF 划分为 4 个等级,即重要值 > 50% 为优势种, 30% < 重要值 < 50% 为最常见种, 10% < 重要值 < 30% 为常见种, 重要值 < 10% 为稀有种^[10]。AM 真菌的孢子密度、频度、相对多度及重要值计算公式如下:

孢子密度 = 每 50 g 风干土壤中含有的 AMF 的孢子数

频度 = 某一个种出现的样品数/总样品数 × 100%

相对多度 = 某一个种的孢子数/总的孢子数 × 100%

重要值 = 某采样点中 AMF 种频度和相对多度的平均值

物种丰富度指每个土样中 AMF 的种数^[11]

物种多样性(Specms diversity)指数。本文采用 Shannon-Weiner 指数和 Simpson 指数来描述菌根真菌的物种多样性^[10]。假设有一个包含 n 个个体的随机样本, 其中种 i 的个体数为 n_i , 则 $P_i = n_i/n$, 从而 Shannon-Weiner 指数 H 可用下式估计

$$H = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln p_i)$$

式中, s 为某采样点 AMF 的种类数目, P_i 为某采样点种 i 的孢子数与该点孢子总数之比。

Simpson 多样性指数 D

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s (p_i)^2$$

式中 s 为某采样点 AMF 的种类数目, P_i 为种 i 所占的比例。由此计算出采样点的物种多样性指数^[11]。

1.5 土壤化学性质的测定及数据分析

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化法,有效磷含量用碳酸氢钠-钼锑抗比色法。土壤 pH 值使用精密酸度计测定^[12]。用 SPSS11.5 统计分析的 Bivariate 过程进行各项化学性质与孢子密度和物种丰富度的相关分析。

2 结果与分析

2.1 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 组成

从兴安落叶松森林共分离到 AMF 4 属 53 种, 其中 23 种鉴定至种, 30 种鉴定至属。其中无梗囊霉属 *Acaulospora* 25 种(47.17%), 球囊霉属 *Glomus* 23 种(43.40%), 内养囊霉属 *Entrophospora* 4 种(7.55%), 巨孢囊霉属 *Gigaspora* 1 种(1.89%)。 *Acaulospora* 属和 *Glomus* 属为优势属。不同林型内 AMF 种属构成并不相同(表 1)。其中从原始林杜香落叶松林分离到 AMF 6 种, 从原始林草类落叶松林分离到 AMF 32 种, 从原始林柴桦落叶松林分离到 AMF 19 种, 从落叶松皆伐林分离到 AMF 23 种, 从落叶松渐伐林分离到 AMF 15 种, 从火烧迹地分离到 AMF 14 种。原始林草类落叶松林分离到 AMF 种类最多, 这可能是由于原始林草类落叶松林下的植物种类较其他几个林型最多的缘故。

2.2 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 的孢子密度

由表 2 所示, 所调查的 5 种林型内 AMF 的孢子密度最低为皆伐落叶松林 13.35 个/50 g 土, 最高为原始林柴桦落叶松林 41 个/50 g 土。5 种林型土壤内 AMF 的孢子密度都高于火烧迹地 8.37 个/50 g 土。方差分析结果表明只有原始林柴桦落叶松林与火烧迹地 AMF 的孢子密度差异性显著, 而其他 4 个林型 AMF 的孢子密度与火烧迹地的差异不显著; 而 5 个林型间孢子密度方差分析表明, 只有原始林柴桦落叶松林与皆伐落叶松林之间差异显著; 2 个干扰林型落叶松皆伐林与落叶松渐伐林之间孢子密度差异不显著。

这表明林型和干扰都不是影响孢子密度的主要因素。

2.3 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 物种丰富度

由表 2 所示, 5 种林型土壤内的物种丰富度最低

表 1 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 组成比较
Table 1 AMF of different *Larix. gmelinii* forest types

AM 真菌种 (AMF species)	LLV	HLV	BLV	LCF	LS	LFB
浅窝无梗囊霉 <i>A. lacunosa</i>	+	+	+			
刺无梗囊霉 <i>A. spinosa</i>				+	+	+
疣状无梗囊霉 <i>A. tuberculata</i>						+
丽孢无梗囊霉 <i>A. elegans</i>		+		+		
膨胀无梗囊霉 <i>A. delicata</i>		+		+		
皱壁无梗囊霉 <i>A. rugosa</i>		+		+		
空洞无梗囊霉 <i>A. cavernata</i>		+	+			
光壁无梗囊霉 <i>A. leavis</i>		+	+			
孔窝无梗囊霉 <i>A. foveata</i>						+
波兰无梗囊霉 <i>A. polonica</i>		+		+		
波状无梗囊霉 <i>A. undulata</i>		+				
卷曲球囊霉 <i>G. convolutum</i>		+			+	+
扭形球囊霉 <i>G. tortuosum</i>		+		+	+	+
黄球囊霉 <i>G. fulvum</i>		+				
何氏球囊霉 <i>G. hoi</i>				+		
缩球囊霉 <i>G. constrictum</i>	+	+	+		+	
多产球囊霉 <i>G. fecundisporum</i>				+		
两型球囊霉 <i>G. dimorphicum</i>					+	
幼套球囊霉 <i>G. etunicatum</i>		+	+	+	+	+
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	+	+	+	+		+
褐色球囊霉 <i>G. badium</i>		+				
屏东内养囊霉 <i>E. kentinensis</i>		+				
哥伦比亚内养囊霉 <i>E. colombiana</i>		+				
一种巨孢囊霉 <i>Gigaspora</i> sp. 1		+				
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 1		+	+	+	+	+
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 2	+	+				
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 3			+			
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 4		+			+	+
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 5		+				
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 6				+		
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 7		+				
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 8				+	+	
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 9			+	+		
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 10			+			
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 11				+		
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 12				+		
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 13	+	+		+		+
一种无梗囊霉 <i>Acaulospor</i> sp. 14	+					
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 1		+	+	+		+
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 2		+	+	+	+	+
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 3		+	+	+	+	+
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 4			+			
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 5		+				
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 6			+			
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 7		+		+		

<http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

续表

表 1 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 组成比较
Table 1 AMF of different *Larix. gmelinii* forest types

AM 真菌种 (AMF species)	LLV	HLV	BLV	LCF	LS	LFB
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 8		+		+		
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 9		+	+		+	
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 10		+				
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 11			+			
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 12			+			
一种球囊霉 <i>Glomus</i> sp. 13					+	
一种内养囊霉 <i>Entrophospor</i> sp. 1			+	+	+	+
一种内养囊霉 <i>Entrophospora</i> sp. 2		+			+	

注: +: 此林型土壤中分离到该种 AMF; LLV: 杜香落叶松林; HLV: 草类落叶松林; BLV: 柴桦落叶松林; LCF: 落叶松皆伐林; LS: 落叶松渐伐林; LFB: 火烧迹地。

Note: +: AMF species present in soil of the type forest; LLV: *Ledum palustre-L. gmelinii* virgin forest; HLV: Herbage-*L. gmelinii* virgin forest; BLV: *Betula fruticosa-L. gmelinii* virgin forest; LCF: *L. gmelinii* clearcutting forest; LS: *L. gmelinii* shelterwood; LFB: *L. gmelinii* forest burned areas.

表 2 兴安落叶松不同林型土壤中 AM 真菌的孢子密度、物种丰富度及多样性指数
Table 2 Spore densities, species richness, shannon-wiener index and simpson index of AMF in the soil of *Larix gmelinii* forest

林型 Forest types	pH 值 pH value	速磷(mg/kg) Contents of available P	有机质(g/kg) Organic matter	孢子密度 Spore densities	物种丰富度 Species richness	多样性指数(H) Shannon-Wiener index	多样性指数(D) Simpson index
火烧迹地 (LFB)	*	*	*	8.37 ^b	6.00 ^b	1.38 ^{ab}	0.64 ^{ab}
落叶松皆伐林 (LCF)	4.94	93.62	367.57	13.35 ^b	6.71 ^b	1.59 ^a	0.75 ^a
落叶松渐伐林 (LS)	5.08	99.73	374.43	15.83 ^{ab}	7.66 ^b	1.66 ^a	0.75 ^a
草地落叶松林 (HLV)	5.12	92.32	321.31	16.26 ^{ab}	6.30 ^b	1.45 ^a	0.68 ^a
杜香落叶松林 (LLV)	4.34	103.62	487.57	23.22 ^{ab}	2.16 ^c	0.39 ^b	0.23 ^b
柴桦落叶松林 (BLV)	4.87	76.50	623.25	41.00 ^a	12.66 ^a	2.12 ^a	0.85 ^a

注: 字母相同表示无显著差异($P > 0.05$), Duncan 检验; *: 未测定; LLV: 杜香落叶松林; HLV: 草类落叶松林; BLV: 柴桦落叶松林; LCF: 落叶松皆伐林; LS: 落叶松渐伐林; LFB: 火烧迹地。

Note: Values having the same letter are not significantly different ($P > 0.05$), Duncan's test; *: Not determined; LLV: *Ledum palustre-L. gmelinii* virgin forest; HLV: Herbage-*L. gmelinii* virgin forest; BLV: *Betula fruticosa-L. gmelinii* virgin forest; LCF: *L. gmelinii* clearcutting forest; LS: *L. gmelinii* shelterwood; LFB: *L. gmelinii* forest burned areas.

为原始林杜香落叶松林 2.161 种/土样, 最高为原始林柴桦落叶松林为 12.66 种/土样, 火烧迹地为 6 种/土样。

5 种林型与火烧迹地的物种丰富度方差分析结果表明, 原始林柴桦落叶松林明显高于火烧迹地, 差异性显著; 而原始林杜香落叶松林明显低于火烧迹地, 差异性也显著; 其他 3 个林型也高于火烧迹地, 但差异却不显著。火烧对 AMF 物种丰富度的影响比较复杂, 有待于进一步研究。

3 个未干扰林型与 2 个被干扰林型之间的方差分析结果表明, 柴桦落叶松林明显高于落叶松皆伐

林和渐伐林, 且差异性显著; 草类落叶松林低于皆伐林和渐伐林, 但差异不显著; 而原始林杜香落叶松林明显低于皆伐林和渐伐林, 且差异显著。这说明, 采伐干扰不是影响物种丰富度的主要因素。

3 个未受干扰林型之间物种丰富度差异显著, 为原始林柴桦落叶松林 > 原始林草类落叶松林 > 原始林杜香落叶松林; 可见林型是影响物种丰富度的重要因素。

2.4 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 的多样性指数

由表 2 所示, 5 种林型土壤内 AMF 的物种多样

性差异显著, 无论是 Shannon-Wiener index 还是 Simpson index, 原始林柴桦落叶松林都是最高的, 这表明其 AMF 物种多样性是最高的; 原始林杜香落叶松林 AMF 物种多样性指数明显低于其他 4 个林型, 且差异显著; 而其他林型之间、采伐处理之间、火烧迹地之间两两分析差异都不显著, 见表 2。

2.5 不同林型土壤 pH 值、有效磷含量、有机质含量对 AMF 孢子密度和物种丰富度的影响

本研究中 pH 值对 AMF 孢子密度和物种丰富度的影响不一致, 土壤 pH 值与孢子密度呈负相关($r = -0.282$), 与物种丰富度呈正相关($r = 0.533$), 见表 3。

AMF 孢子密度与有效磷含量呈负相关($r = -0.734$), 与有机质含量呈明显正相关($r = 0.956^*$), 可见, 土壤有机质含量是影响 AMF 孢子密度的重要因素; AMF 物种丰富度与有机质含量呈正相关($r = 0.476$), 与速效磷含量呈明显的负相关($r = -0.899^*$), 可见土壤速效磷含量是影响 AMF 物种丰富度的重要因素。

2.6 兴安落叶松不同林型土壤内 AMF 的优势种和最常见种

如表 4 所示, 原始林杜香落叶松林的优势种为 *A. lacunosa*; 原始林草类落叶松林没有优势种, 最常见种为 *A. lacunosa*; 原始林柴桦落叶松林的优势种为 *Acaulospor* sp. 3 和 *G. constrictum*; 皆伐落叶松

表 3 土壤因子与孢子密度和物种丰富度的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between soil factors and spore densities, spore richness

	相关系数 Correlation coefficient		
	PH	有效磷 Available P	有机质 Organic matter
孢子密度 Spore densities	-0.282	-0.734	0.956(*)
物种丰富 Species richness	0.533	-0.899(*)	0.476

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著。

Note: *: Correlation is significant at the 0.05 level.

林的优势种为 *A. spinosa*; 渐伐落叶松林地的优势种为 *Glomus* sp. 3; 火烧迹地的优势种为 *A. spinosa*。

3 讨论

在大兴安岭兴安落叶松 5 种林型土壤中共分离到隶属于无梗囊霉属 *Acaulospora*、球囊霉属 *Glomus*、内养囊霉属 *Entrophospora* 和巨孢囊霉属 *Gigaspor* 的 53 种 AMF。这表明大兴安岭兴安落叶松森林 AMF 不仅分布广泛, 而且种类资源也非常丰富, 在兴安落叶松森林生态系统的维护与生态重建中是不可忽视的一类生物资源。

从属的水平上, *Acaulospora* 属和 *Glomus* 属为兴安落叶松森林 AMF 的优势属, 这表明 *Acaulospora* 属和 *Glomus* 属 AMF 是广谱生态型的, 能适应兴安

表 4 兴安落叶松不同林型 AM 真菌的优势种和最常见种的频度、相对多度和重要值
Table 4 Frequency, relative abundance, importance value of dominant and the most common species in different *Larix gmelinii* forest types

林型 <i>Larix gmelinii</i> Forest types	优势种 Dominant species (I > 50%)				常见种 The most common species (30 < I 50%)			
	AM 真菌种 AMF species	频度 Isolation frequency (%)	相对多度 Relative abundance (%)	重要值 Importance value (%)	AM 真菌种 AMF species	频度 Isolation frequency (%)	相对多度 Relative abundance (%)	重要值 Importance value (%)
LLV	<i>A. lacunosa</i>	50.00	74.16	62.08				
HLV					<i>A. lacunosa</i>	60.00	8.81	34.40
BLV	<i>Acaulospora</i> sp. 3	100.00	11.65	55.83	<i>Acaulospora</i> sp. 1	66.67	17.89	42.28
	<i>G. constrictum</i>	100.00	15.85	57.93	<i>A. leavis</i>	66.67	2.30	34.49
LCF	<i>A. spinosa</i>	85.71	29.41	57.56	<i>G. etunicatum</i>	66.67	7.59	37.13
					<i>Glomus</i> sp. 1	85.71	10.70	48.20
LS	<i>Glomus</i> sp. 3	100.00	4.82	52.41	<i>Acaulospora</i> sp. 1	57.14	12.30	34.72
					<i>Glomus</i> sp. 2	66.67	21.69	44.18
LFB	<i>A. spinosa</i>	75.00	29.85	52.43	<i>Acaulospora</i> sp. 4	66.67	18.07	42.37
					<i>G. tortuosum</i>	75.00	10.45	42.72
					<i>G. etunicatum</i>	50.00	17.91	33.96

注: LLV: 杜香落叶松林; HLV: 草类落叶松林; BLV: 柴桦落叶松林; LCF: 落叶松皆伐林; LS: 落叶松渐伐林; LFB: 火烧迹地。

Note: LLV: *Ledum palustre-L. gmelinii* virgin forest; HLV: *Herbage-L. gmelinii* virgin forest; BLV: *Betula fruticosa-L. gmelinii* virgin forest; LCF: *L. gmelinii* clearcutting forest; LS: *L. gmelinii* shelterwood; LFB: *L. gmelinii* forest burned areas.

落叶松森林低温和常年冻土的环境, AMF 优势属和种的确定, 为兴安落叶松森林生态系统的维护与生态重建中筛选高效菌株奠定了基础。

一般研究认为, 森林生态系统中 AMF 的孢子密度通常是非常高的。大兴安岭兴安落叶松 5 类林型土壤中 AM 真菌的孢子密度从 0.267 个/g 土变化到 0.82 个/g 土不等, 高于对照组火烧迹地 0.17 个/g 土, 但却明显低于以前学者对其他生态系统的研究结论^[13,14]。影响 AMF 在植物根际土壤中的物种丰富度和孢子密度的因素很多, 其中季节变化、土壤条件、AMF 对植物的依赖程度、宿主植物的年龄、AMF 产孢子的能力、孢子的休眠以及孢子在土壤中的分布方式都是重要的影响因素^[15-17]。对于我们的结论, 可能的解释有两点: 首先, 与大兴安岭兴安落叶松森林林份特点有关, 兴安落叶松森林上层林份单一, 大多为落叶松, 郁闭度较大, 如杜香落叶松林的郁闭度为 0.6~0.8^[6], 对林下植被发展有很大的限制性, 林下植被一般生长较弱, 而与 AMF 共生的植物恰恰是这些林下植物, 这就极大的影响了孢子的发展, 这是落叶松森林 AMF 孢子密度较低的重要原因; 其次, 有些土样中的孢子在处理过程中逐渐老化腐败, 也影响了孢子密度; 再次我们在筛析孢子的过程中采用了蔗糖离心法, 在离心的过程中, 可能会损失一部分孢子, 也可能造成孢子密度较低的原因之一。

原始林柴桦落叶松林无论从孢子密度, 物种丰富度还是从多样性指数明显高于其他 4 个林型, 更高于对照火烧迹地, 这主要原因为原始林柴桦落叶松林土壤的速效磷含量较低而有机质含量较高; 另外一种可能的原因为原始林柴桦落叶松林位于山脚下比较低湿处, 地上植物种类和密度都远远高于其他 4 个林型, 致使土壤中的 AMF 多样性也比较高。

本研究测定了土壤 pH 值、速效磷含量、土壤有机质含量对土壤中 AMF 孢子密度和物种丰富度的影响, 因为这三项因子对 AMF 的影响比较大而且比较直接, 也一直是众多学者研究的热点。在本研究中的结论显示速效磷含量与孢子密度呈负相关($r = -0.734$), 与物种丰富度呈明显的负相关($r = -0.899^*$), 可见, 土壤速效磷含量是影响 AM 孢子密度和物种丰富度的重要因素, 这与前人的研究结论一致^[18,19]。所有营养元素中, 磷与菌根形成的关系最为密切, 土壤中磷含量高往往抑制 AM 真菌的发

育和功能。大量实验证实过多磷素对菌根形成具有不利影响, 高磷比低磷处理土壤中孢子数量少^[20], 其原因可能在于高磷土壤环境中植株体内磷含量的增加所导致的根系细胞膜透性降低与根系分泌物数量下降(或分泌物成分发生变化)对 AMF 繁殖和菌根侵染产生了抑制作用^[21,22]。

本研究中有有机质含量与孢子密度呈明显正相关($r = 0.956^*$)与物种丰富度呈正相关($r = 0.476$), 可见土壤有机质含量也是影响 AMF 孢子密度和物种丰富度的重要因素, 尤其对 AMF 孢子密度的影响显著。土壤有机质可能是通过作为保存菌丝的基质而在保持自然土壤中菌根真菌侵染力和孢子形成方面起作用。自然土壤中 AM 真菌具有一定的腐生生长, 而有机质在这一过程中可能起着重要作用。

土壤 pH 是影响 AMF 的一个重要因子, 一般说来, 中性至微酸性土壤有利于菌根真菌发育^[10]。从 AMF 的生态分布来看, 不同 pH 的土壤中 AM 真菌的组成不同。无梗囊霉属在酸性条件下种群频度较高, 表明无梗囊霉属较喜酸性土壤, 本研究也证实了这一点, 即在各林型土壤中(pH 值都很低, 为 4.34~5.12)AMF 优势种或最常见种多为无梗囊霉属。本研究中 pH 值对 AMF 的孢子密度和物种丰富度的影响不一致, 土壤 pH 值与 AMF 孢子密度呈负相关($r = -0.282$), 而与物种丰富度却呈正相关($r = 0.533$); 出现这种情况的主要原因为本研究中的 5 种林型土壤 pH 值都很低, 都处于 4.34~5.12 这个区间内, 这是大兴安岭落叶松林土壤的共同特征, 这样是比较不出 pH 值对孢子密度和物种丰富度的关系的, 所以数据不能反映 pH 值对 AMF 孢子密度和物种丰富度的影响。土壤因子对 AMF 孢子密度和物种丰富度的影响是一个多种因素共同作用的过程, 其具体作用机制还有待进一步研究。

在结论中, 火烧迹地有相对较高的孢子密度(8.37 个/50 g 土)和物种丰富度(6.00 种/土样), 出现这种结论的原因可能是: 1) 选取采样点的火烧地面积不大(约 1 hm²), 中间还有片状苔草和杜鹃的分布, 虽然土样来自距这些片状生长的植物有一定的距离, 但是这些植物的影响还不能完全排除; 2) 采样时距火烧的时间较短(约 1 年), 火烧后地下可能还有残余的生活的 AMF 孢子。这些都是我们得到这样结论的重要原因。然而这也说明了这些散播过来的或者遗留下来的 AMF 孢子对火烧地的植被恢复和演替

有一定的影响, 至于影响的机理和模式值得更进一步的探究。

致谢: 在此感谢内蒙古农业大学退休教师冯林老师在资料收集和论文撰写方面给予的帮助; 感谢包慧君同学在土壤理化性质测定方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Smith SE, Read DJ. Mycorrhizal symbiosis. London: Academic Press, 1997, pp.1-605.
- [2] Requena N, Jeffries P, Barea JM. Assessment of natural mycorrhizal potential in a desertified semiarid ecosystem. *Applied Environmental Microbiology*, 1996, **62**: 842-847.
- [3] Van der Heijden GA, Boller T, Wiemken A, *et al.* Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology*, 1998a, **79**: 2082-2091.
- [4] 盖京萍, 冯 固, 李晓林. 丛枝菌根真菌的生物多样性研究进展. *土壤学报*, 2005, **37**(3): 236-241.
- [5] Beare MH, Hu S, Coleman DC, *et al.* Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Applied Soil Ecology*, 1997, **5**: 211-219.
- [6] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社, 1998, pp.1-231.
- [7] Daniels BA, Skipper HD. Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. // Schenec NC (ed.). *Methods and principles of mycorrhizal research. American Society for Phytopathology*, 1982, 29-37.
- [8] Schenk NC, Perez Y. *Manual for Identification of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. Florida: Synergistic Publications, 1988, pp.1-255.
- [9] Morton JB, Redecker D. Two new families of Glomales, Archaeosporaceae and Paraglomaceae, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters. *Mycologia*, 2001, **93**: 181-195.
- [10] 刘润进, 陈应龙. 菌根学. 北京: 科学出版社, 2007, pp.1-237.
- [11] Koske RE. Distribution of VA mycorrhizal fungi along a latitudinal temperature gradient. *Mycologia*, 1987, **79**: 55-68.
- [12] 中国土壤学会化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983, pp.74-169.
- [13] Zhao ZW, Xia YM, Qin XZ, *et al.* Arbuscular mycorrhizal status of plants and the spore density of arbuscular mycorrhizal fungi in the tropical rain forest of Xishuangbanna, southwest China. *Mycorrhiza*, 2001, **11**: 159-162.
- [14] Zhang Y, Guo LD, Liu RJ. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with common pteridophytes in Dujiangyan, southwest China. *Mycorrhiza*, 2004, **14**: 25-30.
- [15] 赵之伟. 四种蕨类植物根际土壤中 VA 菌根真菌孢子种群组成和季相变化. *云南植物研究*, 1999, **21**(4): 437-441.
- [16] Bever JD, Morton JB, Antonovics J, *et al.* Host-dependent sporulation and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a mown grassland. *J Ecology*, 1996, **84**: 71-82.
- [17] Sylvia DM. Spatial and temporal distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi association with *Uniola paniculata* in Florida foredunes. *Mycologia*, 1986, **78**(5): 728-734.
- [18] 蔡晓布, 彭岳林, 冯 固, 等. 西藏高原草地植 AM 真菌多样性及其环境影响因子研究. *土壤学报*, 2005, **42**(4): 642-665.
- [19] Tawarayama K, Saito M, Morioka M. Effect of phosphate application to arbuscular mycorrhizal onion on the development and succinate dehydrogenase activity of internal hyphae. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1994, **40**(4): 667-673.
- [20] Nagahashi G, Douds DD Jr, Abney GD. Phosphorus amendment inhibit hyphal branching of the VAM fungus *Gigaspora margarita* directly and indirectly through its effect on root exudation. *Mycorrhiza*, 1996, **6**: 403-408.
- [21] Tawarayama K, Watanabe S, Yoshida J, *et al.* Effect of onion (*Allium cepa*) root exudates on the hyphal growth of *Gigaspora margarita*. *Mycorrhiza*, 1996, **6**(1): 57-59.
- [22] Chen BD, Li XL, Peter C. Two arbuscular mycorrhizal fungi colonizing maize under different phosphorus regimes in a compartment cultivation system. *Pedosphere*, 2002, **12**(2): 121-130.