

喀斯特不同植被恢复阶段土壤 AMF 组成及多样性研究

何跃军¹, 吴春玉¹, 何丙辉², 丁贵杰¹, 孙学广¹, 高秀兵³

(1. 贵州大学林学院/贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025;
2. 西南大学资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 北碚 400715; 3. 贵州省茶叶研究所, 贵阳 550006)

摘要: 选择贵州花江、织金、花溪 3 个典型喀斯特地段的不同恢复阶段(乔木、灌木和草本)土壤丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)为研究对象, 基于 AMF 孢子的形态鉴定, 计算 AMF 孢子密度、分离频度、物种丰度、重要值、物种均匀度指数及 Shannon-Wiener 多样性指数, 研究喀斯特不同恢复阶段土壤 AMF 物种组成及多样性。结果表明: 3 个采样地段共分离 AMF 菌种 4 目 8 科 10 属 68 种, 其中球囊霉属(*Glomus*)数量最大达 35 种, 其次是无梗囊霉属(*Acaulospora*)为 17 种, 巨孢囊霉属(*Gigaspora*)、类球囊霉属(*Paraglomus*)及原囊霉属(*Archaeospora*)各 1 种; 不同采样地段各植被恢复阶段的优势种不同, 所有样地中层状球囊霉 *Glomus lamellosum* 具有最大的相对丰度、分离频度和重要值; AMF 种分类水平上, 花江样地不同恢复阶段 AMF 丰度表现为乔木>灌木>草本, 织金样地为灌木>草本>乔木, 花溪样地为灌木>乔木>草本; 不同植被恢复阶段土壤 AMF 均匀度指数和香农多样性指数在花江和织金多表现为乔木>灌木>草本, 花溪样地 Shannon-Wiener 指数则是灌木显著高于乔木和灌木阶段。研究表明, 喀斯特土壤中因异质生境条件的差异 AMF 菌种组成和物种多样性具有较大的差异。

关键词: 喀斯特; 植被恢复; 丛枝菌根真菌; 物种多样性
中图分类号: Q938.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)05-0305-05
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.050

Composition and Species Diversity of AMF in Different Vegetation Restoration Stages in Karst Region

HE Yuejun¹, WU Chunyu¹, HE Binghui², DING Guijie¹, SUN Xueguang¹, GAO Xiubin³

(1. College of Forestry, Guizhou University/ Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou Province, Guigang 550025; 2. College of Resources and Environment, Southwest University/ Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Beibei, Chongqing 400715; 3. Guizhou Tea Research Institute, Guiyang 550006)

Abstract: The arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) was researched as an object in karst soil of different vegetation restoration stages (tree, bush and herb) of three typical karst sites (Huajiang, Zhijin and Huaxi), which were located in Guizhou province. Some indexes such as species abundance, spore density, relative isolation frequency, important value, species evenness index and sample Shannon-Wiener diversity index were calculated after morphological identification, in order to explore the composition features and AMF species diversity in vegetation restoring process. The results showed as follows: The experimental soil totally contained 68 species of 10 genera, 8 families and 4 orders, and *Glomus* is the biggest genus by 35 species, and the second was *Acaulospora* (17 species), when *Gigaspora*, *Paraglomus* and *Archaeospora* only have 1 species respectively in this study. Specially, *Glomus lamellosum* had biggest species abundance, relative isolation frequency and important value in all AMF species, which it was as an dominant species in three sampling sites. At the AMF species level, the abundance presented Tree>Bush>Herb in Huajiang, Bush>Herb>Tree in Zhijing, Bush>Tree>Herb in Huaxi. The evenness index and Shannon-Wiener index of AMF species in different stages presented tree>Bush>Herb in Huajiang and Zhijing sites, however the Shannon-Wiener index in Huaxi site significantly higher than tree and shrub stages. We suggested that the differences of heterogeneous conditions may affect on composition and diversity of AMF species.

Keywords: karst soil; vegetation restoration; arbuscular mycorrhizal fungi; species diversity

收稿日期: 2016-05-23
资助项目: 国家自然科学基金(31000204, 31360106, 31660156); 国家科技支撑计划课题(2015BAD09B0102); 国家重点研发计划(2016YFC0502303); 贵州省农业攻关项目(黔科合 NY[2014]3029 号); 贵州省重大专项课题(黔科合重大专项字【2012】6001); 贵州省优秀青年科技人才专项基金(黔科合人字 2013(10))
第一作者: 何跃军(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事喀斯特土壤生态学、恢复生态学研究。E-mail: hyj1358@163.com

菌根是植物根系与真菌形成的共生体,根系外延菌丝依赖植物碳水化合物生长并交换土壤养分供给植物利用实现互利共生,丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是陆地生态系统中最为重要的菌根类型,在提高宿主植物抗旱性、养分吸收^[1]、植物生长和植被恢复^[2-3]方面具有重要的生态功能。丛枝菌根真菌物种已发现有 214 种,不同的生态系统类型中 AMF 的优势属、优势种、物种数量存在较大差异^[4]。AMF 的种类组成会随着植物群落组成和结构改变,AMF 物种多样性受地上植被组成的影响^[5-6],也决定了地上植物群落的物种多样性^[6],Liu 等^[7]研究则认为,AMF 物种多样性与植物物种多样性是相辅相成的,如 AMF 对植物营养摄取的功能能快速提高先锋植物对生境的定居;此外植物根系之间形成的公用菌丝网(Common mycorrhizal networks)对交换植物个体之间的养分资源分配^[8],促进植物群落个体间的养分平衡也具有重要作用。因此,AMF 能够对植物群落物种多样性和群落生产力产生直接或间接影响,如植物 AMF 群落个体竞争、物种多样性维持、群落演替等均起到重要的调节作用^[9-10]。

喀斯特地区岩石主要组成成分是碳酸盐,碳酸盐岩在陆地上的分布面积达 2 200 万 km²^[11]。中国是世界上喀斯特分布面积最大的国家,分布的喀斯特面积达 130 万 km²,西南地区分布了最为典型的石灰岩发育的喀斯特地理景观^[12-13],贵州则是中国喀斯特分布的中心区域。当前喀斯特地区菌根生态学的研究主要集中在菌根植物光合生理^[14]、AMF 与宿主植物的抗旱性^[15]、AM 植物的氮磷营养利用^[16-17]等方面。喀斯特土壤 AMF 多样性的研究涉及相对较少,仅见魏源等^[18]曾对喀斯特原生林生境土壤 AMF 遗传多样性的研究,Liang 等^[19]曾对喀斯特草地植被与森林植被 AMF 组成的研究。然而,喀斯特植被自然演替过程如草本到灌木到乔木阶段的演替序列中 AMF 的组成及多样性的研究还没有涉及,此问题的明确有利于深入探索喀斯特植被恢复的内在机制,也有利于进一步采用菌根生物技术对喀斯特石漠化进行生态恢复。

1 供试材料与研究方法

1.1 样地选择与土样采集

选择贵州省贵阳市花溪区(26°25'54"N,106°40'53"E,海拔 1 178 m)、关岭县花江板贵乡(25°38'46"N,105°38'43"E,海拔 917 m)、毕节市织金县珠藏镇(26°38'44"N,105°42'17"E,海拔 1 479 m)3 个典型喀斯特地段作为研究样地,以空间替代时间的方式选择各地段具有相似环境背景的乔木、灌木、草本群落作为研究对象(如图 1)来设置样地,每个群落类型设置 3 个样方(乔木 10 m×10 m;灌木 5 m×5 m;草本

2 m×2 m),共计样方 27 个样方。2014 年 6 月对样方植被进行群落学调查,按样方对角线五点取样法设置取样点进行土壤取样,3 个地段共计 135 个取样点。采样时除去土层表面枯枝落叶及杂物,垂直挖取土壤坡面,按土壤发生层次分腐殖质层、淋溶层和母质层分层取样,取样后将 3 个层次土壤样品等量充分混合均匀后装入保鲜袋,取样总量共计 2 kg 带回实验室放置在 5℃冰箱中备用。

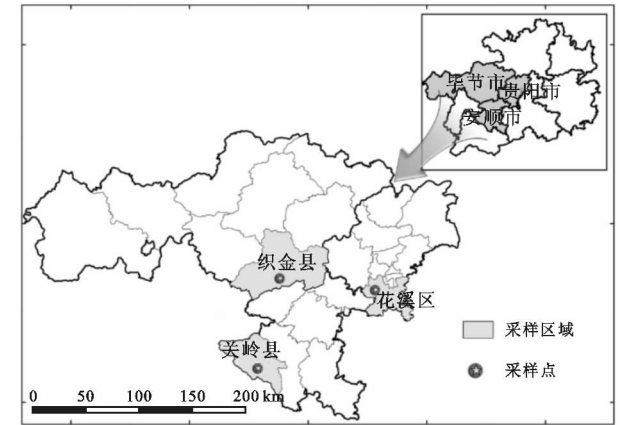


图 1 土壤采样点的地理位置分布

1.2 AMF 形态鉴定与菌种多样性土样分析

将野外采集的土壤样品取 200 g 用于 AMF 孢子形态分析。AMF 形态分类采用 Morton 和 Redecker^[20]分类系统,AMF 菌种形态特征参考 Schenck《菌根鉴定手册》^[21]和近年来的新记录种以及 INVAM (<http://invam.wvu.edu>)发布的 AMF 菌种形态特征信息进行综合分析研判。根据孢壁、孢柄、外壁纹饰以及显色反应等特征进行菌种检索,确定 AMF 菌种,计算 AMF 种的孢子密度(Spore Density, SD),多样性指数(Shannon-Wiener Index, H'),物种丰度(Species Richness, SR),均匀度指数(Species Evenness Index, J'),相对丰度(Relative Abundance, RA)以及相对分离频率(Relative Isolation Frequency, RF),重要值(Important Value, IV)。其中,SD 为 10 g 风干土壤中 AMF 的孢子数量;SR 为每 20 g 土样中 AMF 种的数量;RA 为某个土样中某个 AMF 种的孢子数量占该土样所有 AMF 种孢子数量的百分比;RF 为某种 AMF 的分离频度与所有样本 AMF 种分离频度之和的百分比; $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ (其中 S 为某样地 AMF 种数, P_i 为该样地 AMF 种 i 的孢子密度占该样点总孢子密度的百分比); $J' = H' / \ln S$ (其中 H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, S 为某个样地中 AMF 的物种数); $IV = (RA + RF) / 2$ 。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 (Chicago, IL, USA) 软件进行数据分析处理,采用 ANOVA 最小显著性差异法

(Least Significant Difference, LSD) 比较分析同一采样地段不同恢复阶段(乔木、灌木、草本)和同一恢复阶段不同采样地段(花溪、花江、织金)土壤中 AMF 种的丰度、孢子密度和多样性指数之间的差异。

2 结果与分析

2.1 喀斯特土壤中 AMF 目、科、属、种构成及其在不同植被恢复阶段中的分布

如表 1 所示,本研究共分离出 AMF 菌种 4 目 8 科 10 属 68 种,其中球囊霉属(*Glomus*)数量最大达 35 种,其次是无梗囊霉属(*Acaulospora*)为 17 种,巨孢囊霉属(*Gigaspora*)、类球囊霉属(*Paraglomus*)、原囊霉属(*Archaeospora*)仅各 1 个种。如表 2 所示,AMF 目、科、属分类水平上的丰度在花江地段 AMF 目、科、属均是灌木阶段最大,草本阶段最低,在种水

平上的丰度为乔木>灌木>草本阶段;织金目、科、属、种在灌木阶段的目最大,乔木阶段最低;花溪目、科、属最大出现在草本阶段,乔木阶段最低,在种水平上的 AMF 丰度则是灌木阶段>乔木阶段>草本阶段。对相同阶段不同地段的目、科、属比较发现,乔木阶段花江、织金和花溪目丰度均为 2,科和属水平上丰度均为花江>花溪>织金;灌木阶段 AMF 所属目丰度花江大于织金和花溪,而织金与花溪相等为 3,科、属水平上均是花江>花溪>织金;草本阶段目水平上花溪>织金>花江,AMF 所属科、属水平的丰度均为花溪>花江>织金;乔木阶段种水平的 AMF 丰度花江>花溪>织金,灌木阶段种水平的 AMF 丰度花溪>花江>织金;草本阶段的种水平的 AMF 丰度花溪>花江>织金。

表 1 试验土壤中基于形态分类的 AMF 目、科、属、种构成

目	科	属	种	
球囊霉目 Glomales	球囊霉科 Glomaceae	球囊霉属 <i>Glomus</i>	35	
多孢囊霉目 Diversisporales	巨孢囊霉 Gigasporaceae	巨孢囊霉属 <i>Gigaspora</i>	1	
		盾巨孢囊霉属 <i>Scutellospora</i>	4	
	无梗囊霉科 Acaulosporaceae	无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	17	
		环孢囊霉属 <i>Kuklospora</i>	2	
	内养囊霉 Entrophosporaceae	内养囊霉属 <i>Entrophospora</i>	3	
类球囊霉目 Paraglomerales	多样囊霉科 Diversisporaceae	多样囊霉属 <i>Diversispora</i>	2	
	类球囊霉科 Paraglomeraceae	类球囊霉属 <i>Paraglomus</i>	1	
	原囊霉目 Archaeosporales	两性球囊霉科 Ambisporaceae	两性球囊霉属 <i>Ambispora</i>	2
	原囊霉科 Archaeosporaceae	原囊霉属 <i>Archaeospora</i>	1	
合计	4	8	10	68

表 2 喀斯特不同植被恢复阶段(乔木、灌木、草本)土壤 AMF 在目、科、属、种水平上的构成

分类水平	花江 HJ			织金 ZJ			花溪 HX		
	乔木	灌木	草本	乔木	灌木	草本	乔木	灌木	草本
目	2	4	2	2	3	3	2	3	4
科	5	7	4	2	5	3	3	6	8
属	5	7	4	2	5	3	3	6	8
种	33	28	15	22	34	24	18	19	17

2.2 喀斯特不同植被恢复阶段土壤 AMF 物种丰度和孢子密度比较分析

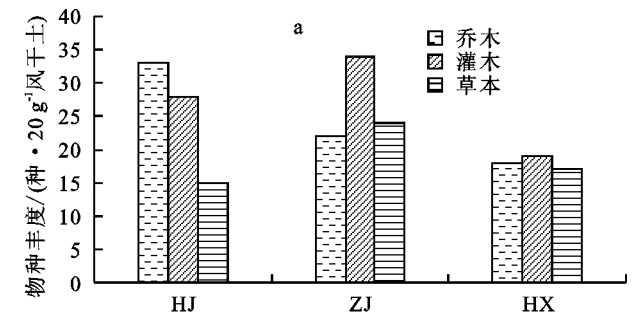
AMF 物种丰度和孢子密度如图 2 所示,就 AMF 种丰度而言,花江(HJ)地段为乔木>灌木>草本,而织金(ZJ)和花溪(HX)灌木阶段最高;相同演替阶段不同地段的种丰度表现为:乔木阶段,花江>织金>花溪;灌木阶段,织金>花江>花溪;草本阶段,织金>花溪>花江(图 2a)。对孢子密度而言,花江乔木阶段显著低于灌木和草本,但灌木和草本阶段差异不显著,然而织金样地各阶段之间孢子密度差异不显著,花溪样地各恢复阶段土壤 AMF 孢子密彼此度差异显著,表现为灌木>乔木>草本;从相同恢复阶段不同采样地段的孢子密度差异性来看,乔木恢复阶段 3 个样地之间差异不显著,灌木阶段的花溪显著高于织金和花江,但织金和花江之间差异不显著,草本阶段表现为花江>织金>花溪,且两两差异显著(图 2b)。

2.3 喀斯特不同植被恢复阶段 AMF 优势种的相对多度、相对分离频度和重要值

表 3 为花江、织金和花溪 3 个喀斯特地段乔、灌、草阶段按重要值大小排列的优势种名录,9 个优势种中球囊霉属 *Glomus* 包含的种类最多,表明 *Glomus* 是喀斯特地区优势属,其次是无梗囊霉属 *Acaulospora*。花江最大丰度是灌木阶段的 *G. lamellosum*,织金最大丰度是草本阶段的 *A. paulinae*,花溪最大丰度则为乔木阶段的,表明 *G. etunicatum*,所有优势种种 *G. lamellosum* 具有最大的相对丰度。就分离频度而言,织金灌木阶段的 *G. macrocarpum* 的分离频度最大,花江灌木阶段的 *G. lamellosum* 分离频度最大,织金和花溪则为草本阶段的 *A. paulinae* 和 *D. eburnea*;对于重要值 IV 而言,在花江灌木阶段的 *G. lamellosum* 具有最大的重要值,织金则是 *G. macrocarpum*,花溪则是乔木阶段的 *G. etunicatum*,对于所有阶段的优势种而言,重要值最

大均是球囊霉属 *Glomus*。结果表明,不同植被恢复阶段喀斯特土壤中 AMF 优势种不同,各优势种在不

同阶段的相对丰度、分离频度以及重要值有差异,球囊霉属是喀斯特地区 AMF 的优势属。



注:不同字母 a、b、c 表示相同采样地不同恢复阶段间差异显著,不同字母 x、y、z 表示相同恢复阶段不同采样点间差异显著。下同。

图 2 不同喀斯特地段植被恢复阶段土壤 AMF 物种丰度和孢子密度

表 3 喀斯特不同植被恢复阶段土壤中 AMF 种的相对多度(RA)、相对频度(RF)以及重要值(IV)

样地	恢复阶段	优势种	相对丰度 RA	分离频度 RF	重要值 IV
花江 HJ	乔木	<i>G. microcarpum</i>	16.22	4.65	10.44
	灌木	<i>G. lamellosum</i>	38.55	10.87	24.71
	草本	<i>G. lamellosum</i>	25.77	10.53	18.15
织金 ZJ	乔木	<i>A. delicata</i>	16.22	13.04	14.63
	灌木	<i>G. macrocarpum</i>	27.66	13.33	20.5
	草本	<i>A. paulinae</i>	28.17	10.34	19.26
花溪 HX	乔木	<i>G. etunicatum</i>	15.69	9.09	12.39
	灌木	<i>G. fragile</i>	14.1	5.66	9.88
	草本	<i>D. eburnea</i>	12	12.12	12.06

2.4 喀斯不同植被特恢复阶段土壤 AMF 的多样性

如图 3a 所示,在花江、织金和花溪,不同恢复阶段 AMF 物种均匀度指数表现为乔木>灌木>草本,但差异不显著,在花溪地段,则表现为不显著的草本>乔木>灌木。乔木阶段,AMF 的均匀度织金大于花江和花溪,但花江和花溪差异不显著;灌木阶段 3 个地段差异不显著;草本阶段表现为花溪显著高于花江和织金,但后者之间差异不显著。如图 3b 所示,对

于 Shannon-Wiener 多样性指数而言,在花江地段,3 个不同恢复阶段差异不显著,在织金,乔木>灌木>草本,三者之间差异显著,在花溪则是灌木阶段显著大于乔木和草本阶段;在灌木阶段花江显著高于织金,草本阶段则是织金显著低于花江和花溪,乔木阶段的 3 个地段之间差异不显著。结果表明,不同植被恢复阶段土壤 AMF 菌种的均匀度指数和多样性指数在花江和织金多表现为乔木>灌木>草本。

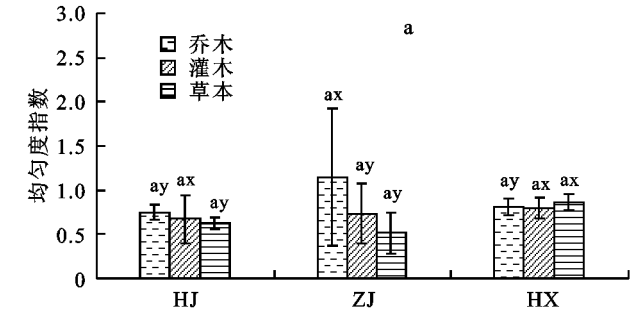


图 3 不同喀斯特地段植被恢复阶段土壤 AMF 均匀度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数

3 讨论

研究结果表明,AMF 种分类水平上花江表现为乔木>灌木>草本,织金为灌木>草本>乔木,花溪为灌木>乔木>草本,这与 Zhu 等^[22]研究认为土壤理化性质和土壤微生物多样性伴随植物进展演替而提高,以及 Liang 等^[19]发现喀斯特 AMF 丰富度与植物多样性指数和土壤养分含量呈负相关关系的结果不完全一致。喀斯特生态系统包含了一系列不同的微生物境,如石面、石沟、石缝和岩石露头^[23],因此喀

斯特生态系统具有较大的生境异质性,这种异质性影响了喀斯特土壤微生物和地上植物物种的空间分布^[24]。Martínez-García 等^[25]认为高度异质的喀斯特生境可以为微生物如 AMF 提供许多适宜分布的资源生态位,因此 AMF 物种丰度及多样性的变化不一定完全按照地上植物群落的演替方向变化,但我们的结果仍然支持 Liang 等^[19]认为的 AMF 组成和多样性是受植物群落影响的观点。本试验中乔木或灌木阶段的丰富度、均匀度指数和香农多样性指数高于草本阶段,可能与喀斯特草本群落早期阶段生境条件

严酷降低了 AMF 的丰富度和多样性所致。AMF 是广泛分布于喀斯特生境中,如 Wei 等^[26]分析了贵州茂兰喀斯特原生林中的 AMF 遗传多样性,发现有 68 个 AMF 分子种存在于该喀斯特生境中,Likar 等^[27]研究喀斯特土壤中的 AMF 多样性及其分布,发现球囊霉属 *Glomus* 是喀斯特生境中稳定存在的优势属,AMF 在喀斯特土壤中的存在影响了地上植物的生长和植物群落的演替。本研究结果显示,在花江、织金和花溪典型喀斯特生境中共分离了 68 个 AMF 菌种,*Glomus* 是所有 AMF 属中的优势属,广泛存在于花江、织金和花溪典型喀斯特地段,支持了 Wei 等^[26]、魏源等^[18]和 Likar 等^[27]研究认为的球囊霉属 *Glomus* 是喀斯特生境中优势属的观点。球囊霉属 *Glomus* 的 AMF 能够较好抵御喀斯特严酷的生境^[26],这可以通过一些实验研究证实,如在喀斯特土壤中接种球囊霉属 *Glomus* 的 AMF 对提高宿主植物脯氨酸、可溶性糖含量^[15]和植株氮、磷摄取量^[17],以及促进土壤枯落物营养转化^[16]等具有较大的功能,因此球囊霉属 AMF 对维持喀斯特生态系统的稳定性以及植被恢复具有重要意义。本研究只是从 AMF 的形态学方面对喀斯特土壤中的 AMF 菌种进行了初步鉴定,更为深入的研究应通过高通量测序探索土壤中 AMF 分子种组成及多样性与喀斯特植被演替之间的功能关系,这将是本试验下一步需要继续研究和探索的方向。

参考文献:

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

[2] 张中峰, 张金池, 黄玉清, 等. 接种丛枝菌根真菌对青冈栎幼苗生长和光合作用的影响[J]. 广西植物, 2013, 33(3): 319-323.

[3] 赵紫薇. 土壤丛枝真菌群落对喀斯特峰丛洼地植被恢复的响应[D]. 桂林: 广西师范大学, 2014.

[4] 刘润进, 焦惠, 李岩, 等. 丛枝菌根真菌物种多样性研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2301-2307.

[5] Johnson D, Vandenkoornhuyse P J, Leake J R, et al. Plant communities affect arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community composition in grassland microcosms[J]. New Phytologist, 2004, 161(2): 503-515.

[6] 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(6706): 69-72.

[7] Liu Runjin, Wang Fayuan. Selection of appropriate host plants used in trap culture of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Mycorrhiza, 2003, 13(3): 123-127.

[8] He X, Xu M, Qiu G Y, et al. Use of ¹⁵N stable isotope

to quantify nitrogen transfer between mycorrhizal plants[J]. Journal of Plant Ecology, 2009, 2(3): 107-118.

[9] Klironomos J N. Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities[J]. Nature, 2002, 417(6884): 67-70.

[10] Van der Heijden M G A, Bardgett R D, Van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2008, 11(3): 296-310.

[11] Liu Z, Zhao J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink[J]. Environmental Geology, 2000, 39: 1053-1058.

[12] Liu C. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the earth's surface: cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environments, Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[13] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, land use, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2004, 15: 115-121.

[14] Chen K, Shi S M, Yang X H, et al. Contribution of arbuscular mycorrhizal inoculation to the growth and photosynthesis of mulberry in karst rocky desertification area[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 488: 769-773.

[15] 何跃军, 钟章成. 喀斯特土壤上香樟幼苗接种不同 AM 真菌后的耐旱性效应[J]. 植物研究, 2011, 31(5): 597-602.

[16] 何跃军, 钟章成, 董鸣. AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2525-2531.

[17] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 等. 构树(*Broussonetia papyrifera*)幼苗氮、磷吸收对接种 AM 真菌的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4840-4847.

[18] 魏源, 王世杰, 刘秀明, 等. 不同喀斯特小生境中土壤丛枝菌根真菌的遗传多样性[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1083-1090.

[19] Liang Y, He X, Chen C, et al. Influence of plant communities and soil properties during natural vegetation restoration on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a karst region[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 57-65.

[20] Morton J B, Redecker D. Two new families of *Glomales*, *Archaeosporaceae* and *Paraglomaceae*, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters[J]. Mycologia, 2001, 93(1): 181-195.

[21] Schenck N C, Perez Y. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi [M]. Gainesville: Synergistic Publications, 1990.