

丛枝菌根真菌接种对喀斯特石漠化人工林土壤特性的影响

王苗苗^{1,2}, 胡益然¹, 柴接君¹, 黎千秋³

(1.中南林业科技大学生命与环境科学学院,长沙 410004; 2.自然资源部洞庭湖流域生态保护
修复工程技术创新中心,长沙 410007; 3.邵阳县林业局,湖南 邵阳 422199)

摘要: [目的] 阐明丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)接种对土壤养分和水分供给不足的削减机制,支撑喀斯特脆弱生态系统的可持续恢复。[方法] 基于湖南省邵阳县典型喀斯特石漠化区人工林样地的原位接种试验,分别采集上、中、下坡 0~15、15~30 cm 土层细根和 0~15、15~30、30~50 cm 土层土壤样品测定 AMF 侵染状况、群落组成和土壤理化性质,明确关键微生物添加对土壤养分和水分等特性的影响。[结果] 接种提升根系 AMF 侵染强度和侵染率;在属水平上,类球囊霉属、球囊霉属和双型囊霉属是 AMF 群落的优势属,其相对丰度在接种后变化较大,且在不同坡位和土层间存在差异。接种后, Simpson 多样性指数在 0~15 cm 土层各坡位、15~30 cm 土层中坡、30~50 cm 土层中下坡皆有所增加,但差异不显著;Chao1 丰富度指数皆呈增加变化,但仅在 0~15 cm 土层上坡差异显著;Pielou 均匀度指数在 0~15 cm 土层上坡、15~30 cm 土层中坡、30~50 cm 土层各坡位皆呈增加变化,差异皆不显著。各土层碱解氮质量分数皆呈减少变化,速效磷质量分数仅在 15~30 cm 土层有所下降,土壤有机碳质量分数在 0~15、15~30 cm 土层均呈减少变化,但差异皆不显著;土壤水分体积分数在各土层皆极显著增加,毛管孔隙在 0~15、30~50 cm 土层有所增加,pH 和交换性 Ca^{2+} 在各土层皆有所降低,但差异皆不显著。速效养分氮磷比在 0~15、15~30 cm 土层呈降低趋势,表明接种 AMF 可在一定程度上缓解土壤养分对磷的限制。土壤特性间相关性和冗余性分析表明,接种后微生物群落组成的变化直接或间接影响养分和水分等理化性状。[结论] 研究结果厘清了石漠化人工林土壤特性对 AMF 接种的响应特征,明确了养分水分变化及其驱动因素,有助于突破土壤生态功能恢复滞后瓶颈,提升脆弱生态系统服务功能。

关键词: 人工林; 丛枝菌根真菌接种; 土壤养分; 土壤水分; 喀斯特生态系统

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0128-10

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Soil Properties in Plantation Forests under Karst Rocky Desertification

WANG Miaomiao^{1,2}, HU Yiran¹, CHAI Jiejun¹, LI Qianqiu³

(1.College of Life and Environmental Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2.Technology Innovation Center for Ecological Conservation and Restoration in Dongting Lake Basin, Ministry of Natural Resources, Changsha 410007, China; 3.Forestry Bureau of Shaoyang County, Shaoyang, Hunan 422199, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the mitigation mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on soil nutrient and moisture supply deficiencies, thereby supporting the sustainable restoration of fragile karst ecosystems. [Methods] Based on an in-situ inoculation experiment in plantation plots of a typical karst rocky desertification area in Shaoyang County, Hunan Province, fine roots at 0–15 cm and 15–30 cm soil depths and soil samples at 0–15 cm, 15–30 cm, and 30–50 cm soil depth were collected from upper, middle, and lower slopes. AMF infestation status, community composition, and soil physicochemical properties were measured to clarify the effects of key microbial additions on soil nutrients and moisture. [Results] The results showed that

收稿日期: 2025-02-27

修回日期: 2025-04-21

录用日期: 2025-05-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(42101316); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40866); 湖南省教育厅优秀青年项目(20B613); 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心开放课题项目(2023007)

第一作者: 王苗苗(1988—), 女, 讲师, 博士, 主要从事可持续生态研究。E-mail: miaomiaowang@csuft.edu.cn

通信作者: 王苗苗(1988—), 女, 讲师, 博士, 主要从事可持续生态研究。E-mail: miaomiaowang@csuft.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

inoculation increased the infestation rate and intensity of root AMF. At the genus level, *Paraglomus*, *Glomus*, and *Ambispora* were the dominant genera in the AMF community, and their relative abundances changed significantly after inoculation, with differences across slope positions and soil layers. After inoculation, the Simpson's diversity index increased in the 0–15 cm layer at all slope positions, in the 15–30 cm layer at the mid-slope position, and in the 30–50 cm layer at the mid-lower slope position, but the differences were not significant. The Chao1 richness index increased across all layers, with a significant difference only at the upper slope position in the 0–15 cm layer. The Pielou's evenness index increased in the 0–15 cm layer at the mid-upper slope position, in the 15–30 cm layer at the mid-slope position, and in the 30–50 cm layer at all slope positions, but the differences were not significant. The mass fraction of alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) decreased in all layers, the mass fraction of available phosphorus (AP) decreased only in the 15–30 cm layer, and the soil organic carbon mass fraction decreased in the 0–15 cm and 15–30 cm layers, but the differences were not significant. Soil volumetric water content (VWC) increased significantly in all soil layers, capillary porosity (CP) increased in the 0–15 cm and 30–50 cm layers, and pH and exchangeable Ca^{2+} decreased in all layers, but the differences were not significant. The AN:AP ratio showed a decreasing trend in the 0–15 cm and 15–30 cm layers, indicating that AMF inoculation could partially alleviate phosphorus limitation in the soil. Correlation and redundancy analysis indicated that changes in microbial community composition after inoculation directly or indirectly affected soil physicochemical traits including nutrients and moisture. [Conclusion] The results clarify the response characteristics of soil properties to AMF inoculation in karst rocky desertification plantation forests and identify nutrient and moisture changes and their driving factors, which helps overcome the bottleneck of delayed soil ecological function restoration and improves the service functions of fragile ecosystems.

Keywords: plantation forest; arbuscular mycorrhizal fungi inoculation; soil nutrient; soil moisture; karst ecosystem

Received: 2025-02-27

Revised: 2025-04-21

Accepted: 2025-05-10

Online(www.cnki.net): 2025-06-27

碳酸盐岩是喀斯特土壤发育的物质基础,其成土物质少,造壤速率缓慢,加之人类活动干扰极易导致石漠化,加剧喀斯特生态系统地表水土资源的匮乏^[1]。水土流失是石漠化形成的主要原因,土壤养分和水分维持与提升是石漠化综合治理和生态功能提升的瓶颈^[2]。关键微生物的添加可在一定程度上提升植物对土壤养分和水分的利用效率,缓解地下土壤供给不足对地上植被的限制,实现其正向协同演化,提升生态系统整体服务功能。因森林生态系统具有保持水土、涵养水源的功能,基于森林植被恢复重建的喀斯特石漠化治理一直是科学研究关注的热点之一。植被通过影响生态系统中养分的储量及分配、改变土壤微生物群落结构与组成、改善土壤的理化性状,发挥其水土保持功能,有效遏制石漠化,扭转生态环境恶化的局面,使喀斯特地区变“绿”^[3-4]。

在我国“加大生态系统保护力度、实施重要生态系统修复工程、加强石漠化综合治理”背景下,喀斯特地区石漠化面积由2005年的12.96万 km^2 减少到2021年的6.74万 km^2 ^[5-6],基于植被建设的恢复成效显著。湖南省石漠化程度在我国西南喀斯特八省市(贵州、广西、云南、四川、重庆、湖南、湖北和广东)中位居第4,但其综合治理起步较晚,成效相对落后^[7]。相对自然恢复模式,人工造林土壤功能恢复相对滞后^[8],养分供给和水分状况限制地上植被生长,生态

系统整体服务功能提升缓慢。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与大多数植物形成共生关系,促进植物对土壤养分水分的吸收^[9],缓解其限制。研究^[10]表明,AMF不仅可以帮助植物吸收转运磷(P),而且在氮(N)的吸收过程中也发挥着重要作用,加之其外延菌丝建立的地下菌丝网络,在生态系统物质循环过程中发挥巨大作用^[11],可在一定程度减少植物对土壤养分和水分的需。XIE等^[12]基于红树林和AMF的共生关系研究发现,蒸压土中幼苗在接种AMF后降低叶片中氮磷比,缓解植物生长过程中磷的限制。

目前,AMF接种对植物的生长及其土壤环境的影响已有较多研究,但其多应用于幼苗的室内盆栽控制试验^[13-15],野外原位试验较少。考虑到土壤养分水分状况的差异亦影响根系与AMF的共生关系,因此,本研究基于湖南省邵阳县典型喀斯特石漠化区人工林原位接种试验,探讨AMF接种前后土壤微生物群落、养分和物理性状等特性的变化,阐释微生物添加对土壤养分水分供给效应的提升机制,突破石漠化人工林土壤生态功能恢复滞后瓶颈,实现喀斯特脆弱生态系统的可持续恢复。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省邵阳县($26^{\circ}40' \sim 27^{\circ}06' \text{N}$, $110^{\circ}40' \sim$

110°59'E)位于湘中偏西南,处资江上游。东邻邵东、祁东县,南连东安、新宁县,西接武冈市、隆回县,北抵新邵县和邵阳市区,处于衡邵丘陵盆地西南边缘向山地过渡地带。研究区位于邵阳县酃家坪镇典型喀斯特石漠化区,海拔400~585 m,属中亚热带季风湿润气候,夏季降水充沛,气候温暖湿润,冬季降水较少,气候寒冷干燥,2000—2021年平均气温16.9℃,平均降水量1399 mm。母岩以石灰岩为主,土壤类型主要是黑色石灰土和黄色石灰土。基于植被建设的石漠化治理起始于2010年,人工林种植密度约4450株/hm²。植被种类稀少,主要包括侧柏、湿地松和枫香等乔木及牡荆、五节芒、白茅等灌木植物,其中乔木层优势属为侧柏,植被平均盖度约60%。地下水位低、蓄量少,对环境的调节和承受能力差。

1.2 土壤样品采集

参照国家林业和草原局行业标准(LY/T 1840—2009)^[16],结合基岩裸露度、植被盖度和土壤厚度等特征,于2023年3月在喀斯特中度石漠化坡地中龄(10~15 a)人工林(湿地松、侧柏、枫香混交林)生态系统选取3条样线(重复),样线长度约100 m,分别在各样线的上、中、下坡(间隔约50 m)样地内(大小设置为20 m×20 m),基于根系水平方向的扩展状况,随机选取3个以优势树种(优势属侧柏,生长良好、长势一致)为中心的1 m×1 m小样方实施AMF接种;同时,按同等要求随机设置同等数量(3个重复)的对照组(CK)。接种时,首先移除小样方内土壤上方的凋落物,将菌剂均匀地撒在土壤表层,确保60 g菌剂/m²(约3000个/m²孢子),然后,将移除的凋落物原位放回。供试菌剂来自广西农业科学院,供试菌种为根内球囊霉(*Glomus intraradices*),每克菌剂至少包含50个孢子。考虑到喀斯特石漠化地区土层浅薄,结合植物根系纵向深度,在接种3个月后(即2023年6月),分层次(0~15、15~30、30~50 cm)进行AMF接种组及其对照组土壤样品采集,即于不同坡位样地内接种和非接种小样方各随机采集9个土壤样品,分别混合均匀取一定量备用,同时采集各土壤层次的环刀备用,共计54个样品。将获取的不同层次土壤样品,除去细根和砾石,用四分法分出一部分,风干过2 mm筛,研磨以备常规理化分析;另一部分,用锡箔纸包好放入灭菌布袋后立即投入液氮速冻,带回实验室经冷冻干燥、磨细分装,置于-80℃保存备用,以测定微生物群落组成。研究区及采样点位置见图1。

1.3 细根采集及AMF侵染状况的测定

基于研究区内根系在土壤深度上的延展性,采集土壤样品的同时,分别于不同坡位样地接种和非接种小样方内采集0~15、15~30 cm优势树种的细根(30~50 cm细根较少,未测),用于测定AMF侵染状况。具体步骤为:将保存于FAA固定液中的细根切成1~2 cm根段,用纯水冲洗干净后投入20% KOH

溶液中,放60℃水浴锅内水浴2 h;颜色较深的样根再投入3% H₂O₂溶液中漂白;然后流水冲洗5 min,再用5% CH₃COOH酸化5 min;使用醋酸墨水于60℃水浴锅内染色30 min;纯水浸泡脱色12 h以上;不同坡位各土层随机选取20~30根样根在显微镜下观察根系侵染状况,计算根系AMF侵染率,并按照菌根侵染程度进行分级,基于BIERMANN等^[17]提出的根段侵染率加权法计算根系AMF侵染强度。

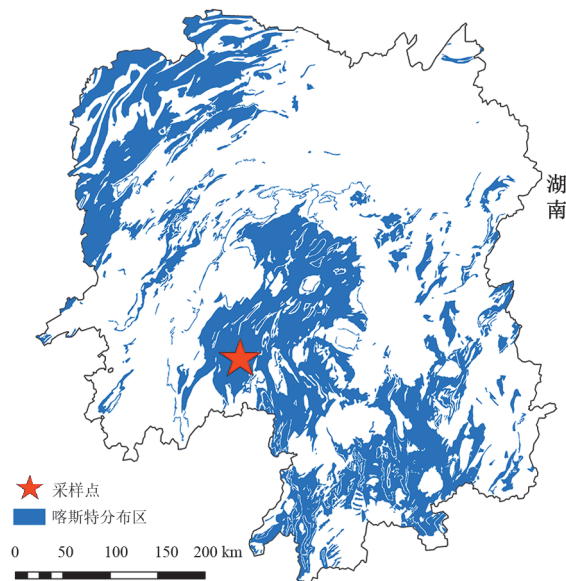


图1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of study area and sampling site

本研究AMF侵染强度和侵染率的计算公式为:

$$\text{侵染强度} = ((95 \times N_1 + 70 \times N_2 + 30 \times N_3 + 5 \times N_4 + N_5) / (100 \times \text{总样根数})) \times 100\%$$

$$\text{侵染率} = ((N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) / \text{总样根数}) \times 100\%$$

式中: N_1 为侵染率90%以上的根段数; N_2 为侵染率50%~90%的根段数; N_3 为侵染率10%~50%的根段数; N_4 为侵染率1%~10%的根段数; N_5 为侵染率低于1%的根段数。

1.4 土壤AMF的高通量测序和数据分析

将冷冻干燥研磨后的土壤样品称取0.5 g,采用MagBeads FastDNA Kit for Soil (MP Biomedicals, USA)试剂盒提取DNA,然后用0.8%琼脂糖凝胶电泳对其进行检测。采用PCR(BioRad S1000, Bio-Rad Laboratory, CA)扩增AMF基因,引物为AMV4.5NF(5'-AAGCTCGTAGTTGAATTTTCG-3')/AMDGR(5'-CCCAACTATCCCTATTAATCAT-3')。PCR反应程序为:在PCR仪上于98℃预变性3 min,使模板DNA充分变性,然后进入扩增循环;在每个循环中,先于98℃保持30 s使模板变性,然后将温度降到52℃,保持30 s使引物与模板充分退火,在72℃保持45 s,使引物在模板上延伸,合成DNA;重复循环26次,使扩增的DNA片段大量累积;最后,在72℃保持5

min,使产物延伸完整,12℃保存。利用2%琼脂糖凝胶电泳检测扩增结果质量,用Axygen凝胶回收试剂盒回收PCR产物,利用Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit对PCR产物在Microplate reader(BioTek, FLx800)上进行定量检测,利用NovaSeq 6000平台对扩增产物进行测序(测序委托上海派森诺生物公司完成)。使用最小归一化抽样法对所有样本的操作分类单元(OTU)序列进行抽样,用于后续数据处理和统计分析。本研究AMF群落组成选取属水平的相对丰度;AMF群落 α 多样性指数采用Simpson多样性指数、Chao1丰富度指数和Pielou均匀度指数表征^[18-19]。

1.5 土壤理化性质测定

土壤有效养分碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(available phosphorus, AP)采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提法测定;土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用外加热-重铬酸钾容量法^[20]测定。氮磷比(N:P)采用AN与AP比值。酸碱度(pH)采用pH计法进行测定。交换性钙离子(Ca²⁺)采用1 mol/L乙酸铵交换法进行

测定。土壤水分体积分数(volumetric water content, VWC)、毛管孔隙度(capillary porosity, CP)等物理性质采用环刀法^[21]测定。

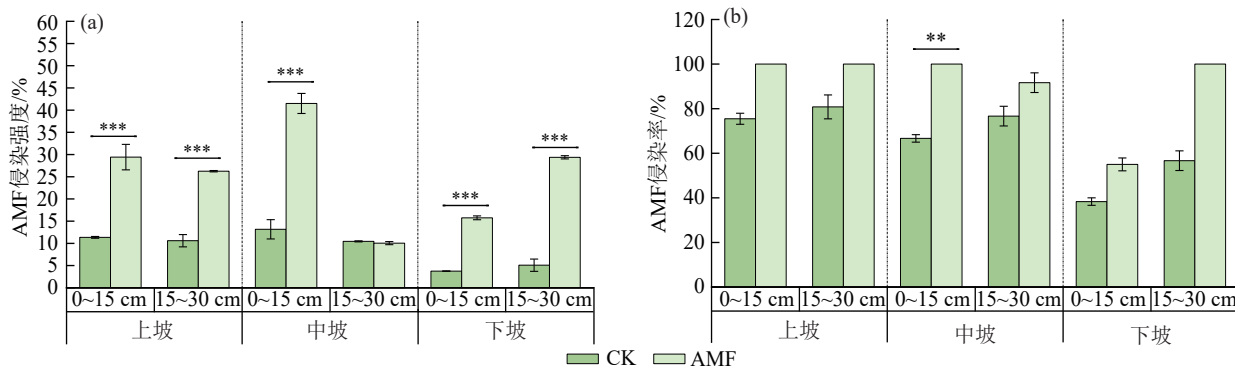
1.6 统计分析方法

统计分析前检验数据是否符合正态分布,若不符合则进行转换(1 g);相关性分析数据统一做标准化处理。基于多重比较(LSD, $p < 0.05$)的单因素方差分析(ANOVA),被用于比较任意2组数据之间差异性是否显著。Pearson相关性用来表征土壤特性间的相关关系。数据统计分析及制图分别利用SPSS 21.0和Origin 8.0软件进行。土壤养分水分与其他土壤特性间的冗余分析(RDA)利用Canoco 5.0软件进行。

2 结果与分析

2.1 接种对石漠化人工林土壤AMF群落的影响

2.1.1 接种对根系AMF侵染状况的影响 由图2可知,接种会提升根系AMF的侵染强度和侵染率。侵染强度除中坡15~30 cm土层无显著差异外,其他土层皆存在极显著差异($p < 0.001$)(图2a);侵染率在中坡0~15 cm土层存在极显著差异($p < 0.01$)(图2b)。



注:**和***分别表示 $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ 水平上差异显著。

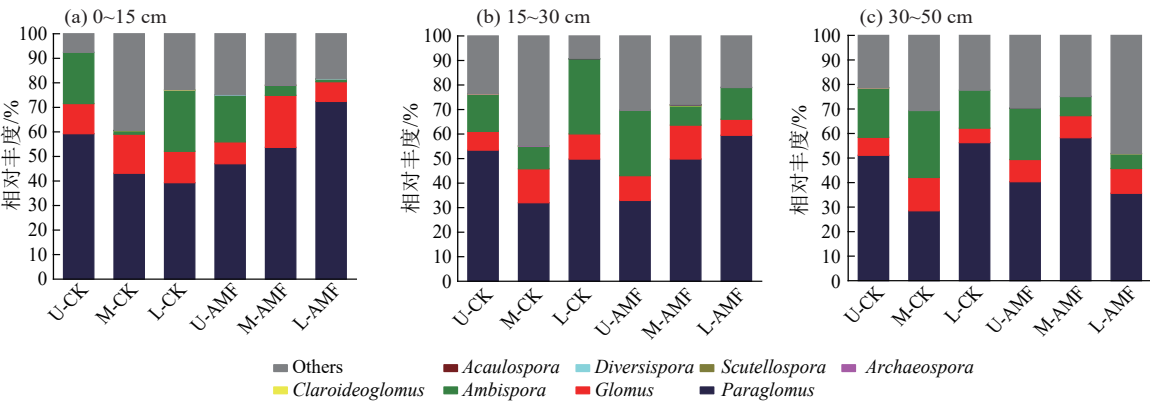
图2 不同坡位、土层对照CK和AMF接种组根系AMF的侵染强度和侵染率

Fig. 2 AMF infestation intensity and infestation rate in roots across different slope positions and soil layers for control CK and AMF inoculation groups

2.1.2 接种对土壤AMF群落组成的影响 土壤AMF群落组成在属水平上鉴定为8个主要共有属:球囊霉属(*Glomus*)、近明球囊霉属(*Claroideoglomus*)、双型囊霉属(*Ambispora*)、类球囊霉属(*Paraglomus*)、无梗囊霉属(*Acaulospora*)、多样孢囊霉属(*Diversispora*)、盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*)及原囊霉属(*Archaeospora*)。其中,仅*Paraglomus*、*Ambispora*、*Glomus*和*Claroideoglomus*相对丰度最大值 $\geq 1\%$,研究区优势属为*Paraglomus*、*Glomus*和*Ambispora*(图3)。结果表明,接种后,0~15 cm土层下坡AMF群落组成变化较大,其中*Paraglomus*的相对丰度由39.3%增加到72.4%,而*Ambispora*的相对丰度则由25.0%减少到1.2%;中坡优势属的相对丰度皆增加;上坡优势属的相对丰度皆减少(图3a)。15~30 cm土层上坡*Paraglomus*的相对丰度由53.5%减少到33.0%,而*Ambispora*的相对丰度则由15.3%增加到26.6%;中坡

*Paraglomus*的相对丰度明显增加;下坡*Ambispora*的相对丰度明显减少(图3b)。30~50 cm土层上坡*Paraglomus*的相对丰度明显减少;中坡*Paraglomus*的相对丰度由28.5%增加到58.3%,而*Ambispora*的相对丰度则由27.3%减少到7.8%;下坡*Paraglomus*和*Ambispora*的相对丰度皆明显减少(图3c)。

2.1.3 接种对土壤AMF群落 α 多样性的影响 接种对土壤AMF群落 α 多样性的影响见表1。接种后,AMF群落的Simpson多样性指数在0~15 cm土层上坡和中坡皆有所增加;15~30 cm土层仅中坡有所增加;30~50 cm土层中坡和下坡皆有所增加,但变化皆不显著($p > 0.05$)。各土层Chao1丰富度指数在不同坡位皆有增加变化,但仅在0~15 cm土层上坡差异显著($p < 0.05$)。Pielou均匀度指数在0~15 cm土层上、中坡呈增加变化;15~30 cm土层仅中坡呈增加变化;30~50 cm土层各坡位皆呈增加变化,但差异皆不显著。



注:U为上坡;M为中坡;L为下坡。
图3 对照CK和AMF接种组不同土层、坡位AMF群落属水平的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of AMF community at genus level across different soil layers and slope positions for control CK and AMF inoculation groups

表 1 不同土层、坡位AMF群落α多样性指数在对照CK和AMF接种组间的差异性分析

Table 1 Difference analysis of α-diversity indices between control CK and AMF inoculation groups in AMF community across different soil layers and slope positions

土层深度/cm	指标	坡位	对照(CK)	AMF 接种
0~15	Chao1	上坡	251.83±93.63	486.27±152.64*
		中坡	376.30±59.92	518.23±133.77
		下坡	394.10±95.29	506.39±212.69
	Pielou	上坡	0.56±0.13	0.64±0.16
		中坡	0.60±0.08	0.71±0.03
		下坡	0.68±0.08	0.60±0.25
	Simpson	上坡	0.84±0.16	0.89±0.12
		中坡	0.88±0.08	0.95±0.02
		下坡	0.94±0.04	0.83±0.23
15~30	Chao1	上坡	471.61±176.20	472.12±92.34
		中坡	400.93±117.76	582.80±170.56
		下坡	328.44±15.92	420.96±36.39
	Pielou	上坡	0.67±0.11	0.65±0.09
		中坡	0.70±0.08	0.74±0.03
		下坡	0.61±0.02	0.58±0.02
	Simpson	上坡	0.93±0.06	0.91±0.06
		中坡	0.95±0.03	0.96±0.01
		下坡	0.89±0.05	0.87±0.03
30~50	Chao1	上坡	415.47±139.88	542.42±189.40
		中坡	335.75±93.07	511.33±59.81
		下坡	290.27±83.18	454.74±131.57
	Pielou	上坡	0.62±0.07	0.65±0.12
		中坡	0.56±0.03	0.64±0.09
		下坡	0.52±0.19	0.57±0.16
	Simpson	上坡	0.91±0.06	0.91±0.06
		中坡	0.86±0.03	0.90±0.09
		下坡	0.78±0.24	0.82±0.20

注:数据为平均值±标准差,n=3;*表示p<0.05水平差异显著。Chao1为Chao1丰富度指数;Pielou为Pielou均匀度指数;Simpson为辛普森多样性指数。

2.2 接种对石漠化人工林土壤养分和水分的影响

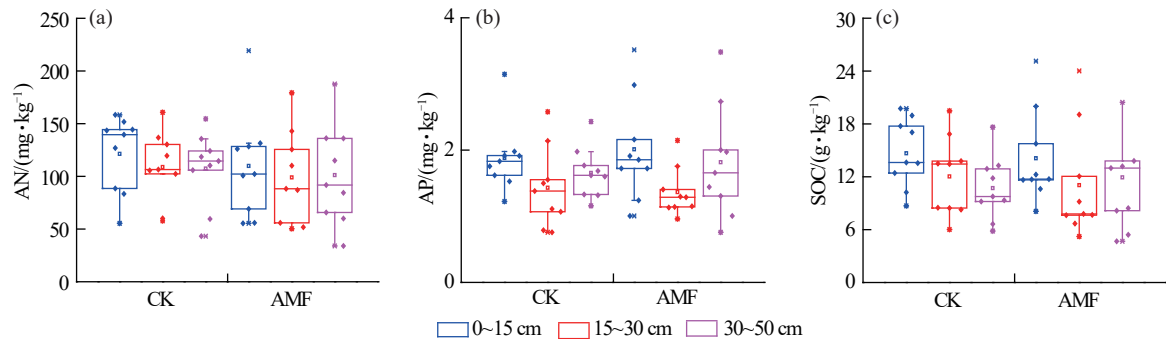
2.2.1 接种对土壤养分的影响 总体而言,接种后,各土层AN质量分数皆有所下降,平均值分别由121.3、108.9、107.4 mg/kg降低为109.8、99.0、101.2 mg/kg(图4a);而AP质量分数在0~15、30~50 cm土层则皆有所增加,平均值分别由1.8、1.7 mg/kg增加为2.0、1.8 mg/kg,在15~30 cm土层则有所下降,平均减少0.07 mg/kg,但以上变化皆不显著(p>0.05)(图4b)。接种后,SOC质量分数在0~15、15~30 cm土层皆有所下降,平均值分别由14.7、12.0 g/kg降低为14.1、11.0 g/kg;而在30~50 cm土层则有所增加,平均值由10.7增加为11.9 g/kg,以上变化亦不显著(p>0.05)(图4c)。

就不同坡位的变化而言,接种后,AN质量分数仅在0~15 cm土层中坡和30~50 cm土层上坡有增加变化,其他皆呈减少变化,变化皆不显著(图5a);AP质量分数在各土层的下坡和30~50 cm土层中坡呈增加变化,其他皆呈减少变化,且在0~15 cm土层下坡差异显著(图5b);SOC质量分数在0~15 cm土层下坡和30~50 cm土层上、中坡呈增加变化,其他土层皆呈减少变化,差异皆不显著(图5c)。

2.2.2 接种对土壤水分的影响 总体而言,接种后,不同土壤层次VWC皆极显著增加(p<0.01)(表2)。就各土层不同坡位变化而言,VWC在接种后皆呈增加变化,但仅在0~15 cm土层各坡位、15~30 cm土层上坡和30~50 cm土层中坡差异显著(p<0.05)。

2.3 接种对石漠化人工林土壤其他理化性质的影响

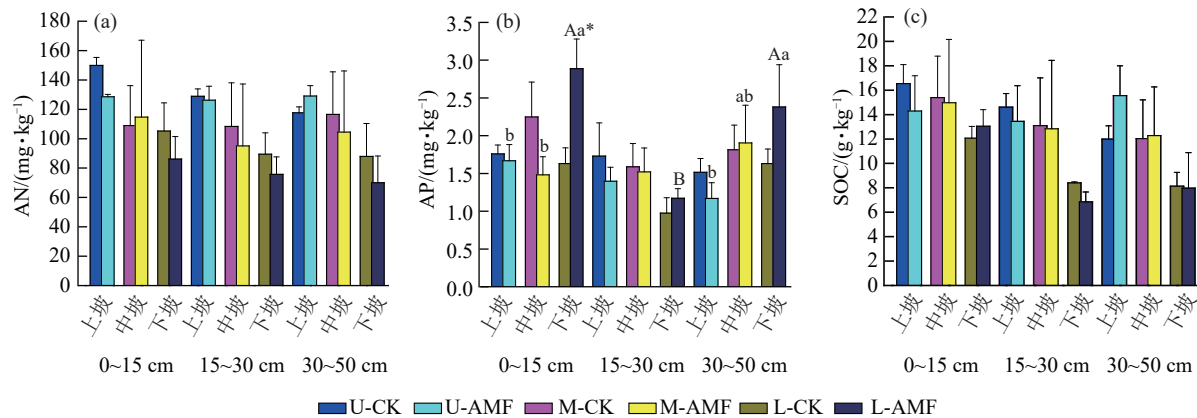
接种后,仅非毛管孔隙度(NCP)在各土层呈极显著降低(p<0.01);通气度(SA)仅在0~15、15~30 cm土层呈极显著降低;总孔隙(TP)在0~15、15~30 cm土层分别呈显著(p<0.05)和极显著(p<0.01)降低;孔隙比(SP)仅在15~30 cm土层呈极显著降低(表3)。



注:数据为箱图+散点图, $n=9$;其中,箱图显示最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值。

图 4 对照 CK 和 AMF 接种组不同土层碱解氮(AN)、速效磷(AP)和有机碳(SOC)质量分数

Fig. 4 Mass fractions of alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and soil organic carbon (SOC) in different soil layers for control CK and AMF inoculation groups



注:*表示相同土层、同一坡位下对照 CK 和 AMF 接种组 0.05 水平差异显著;不同小写字母表示相同土层不同坡位间 0.05 水平差异显著;不同大写字母表示相同坡位不同土层间 0.05 水平差异显著。

图 5 对照 CK 和 AMF 接种组不同土层、坡位碱解氮(AN)、速效磷(AP)和有机碳(SOC)质量分数

Fig. 5 Mass fractions of AN, AP, and SOC across different soil layers and slope positions for control CK and AMF inoculation groups

表 2 不同土层、坡位土壤水分体积分数(VWC)在对照 CK 和 AMF 接种组间的差异性分析

Table 2 Difference analysis of soil volumetric water content (VWC) across different soil layers and slope positions between control CK and AMF inoculation groups

土层深度/cm	坡位	对照(CK)	AMF 接种
0~15	上坡	0.10±0	0.13±0.01*
	中坡	0.09±0.01	0.12±0.04*
	下坡	0.09±0.01	0.13±0.01*
	总计	0.10±0.01	0.13±0.02**
15~30	上坡	0.11±0.01	0.15±0.01*
	中坡	0.11±0.01	0.13±0.03
	下坡	0.12±0	0.13±0
	总计	0.11±0.01	0.14±0.02**
30~50	上坡	0.12±0.02	0.14±0.01
	中坡	0.10±0.01	0.13±0.03*
	下坡	0.11±0	0.12±0
	总计	0.11±0.01	0.13±0.02**

注:数据为平均值±标准差;*和**分别表示对照 CK 和 AMF 接种组间 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平差异显著。

毛管孔隙(CP)在 0~15、30~50 cm 土层有所增加,而在 15~30 cm 土层则有所下降,但变化皆不显著($p>0.05$),体积质量(BD)几乎无变化。说明接种

后短期内瞬时土壤含水量有明显的响应特征,而相对稳定的土壤物理结构如毛管孔隙度等则响应不明显。土壤 pH 和交换性 Ca^{2+} 在各土层皆呈降低趋势,但差异不显著。速效养分氮磷比 AN:AP(N:P)在 0~15、15~30 cm 土层呈降低趋势,虽差异不显著,但可表明接种 AMF 在一定程度上缓解土壤 P 限制。

2.4 对照和接种组土壤特性间相关关系的差异性分析

因考虑到 AMF 群落组成其他属相对丰度值较低($<1\%$),因此土壤特性间的相关分析中仅展示其 4 个属: *Paraglomus*、*Ambispora*、*Glomus* 和 *Claroideoglomus*(图 6)。结果表明,无论对照组还是接种组, SOC 质量分数与微生物组成中 *Glomus* 的相对丰度存在显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)正相关,且在接种后其相关系数有明显增加。与对照相比,接种后 AN 质量分数与 *Glomus* 的相对丰度存在显著正相关, AP 质量分数与 Simpson 多样性指数存在显著负相关。相比对照,接种后 pH 和交换性 Ca^{2+} 与 Chao1 丰富度指数、*Paraglomus* 和 *Ambispora* 的相对

丰度皆存在显著相关关系。说明接种造成的微生物群落组成的变化会影响其与土壤养分等化学性质之间的相关关系。

表 3 不同土层土壤其他理化性质在对照 CK 和 AMF 接种组间的差异性分析

Table 3 Difference analysis of other soil physicochemical properties in different soil layers between control CK and AMF inoculation groups

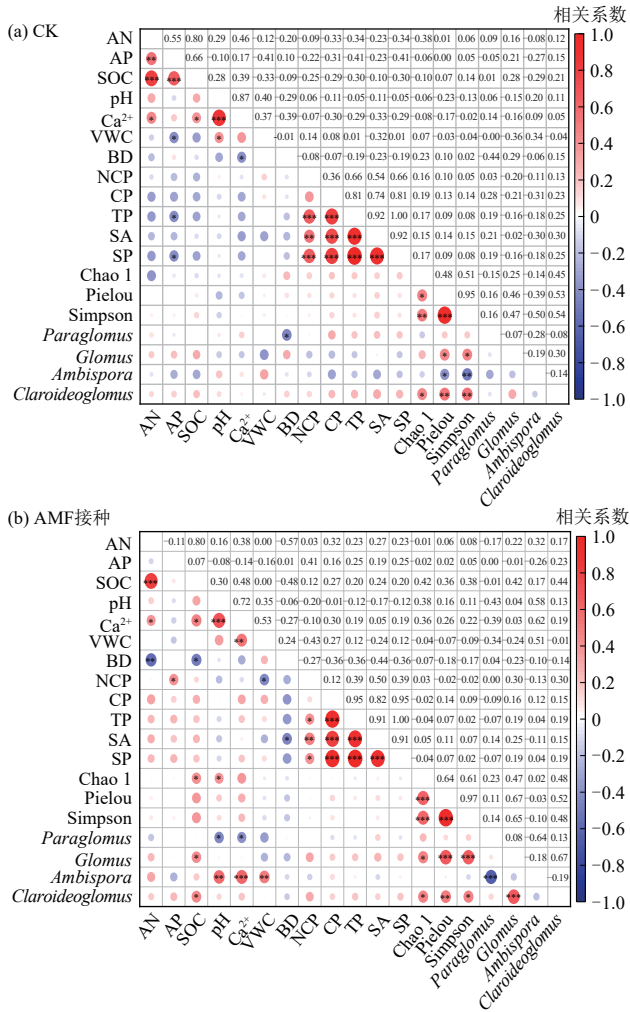
土层深度/cm	指标	对照(CK)	AMF 接种
0~15	N:P	66.62±21.65	61.93±35.70
	pH	5.81±0.50	5.58±0.47
	Ca ²⁺	1.28±0.21	1.23±0.29
	BD	1.09±0.06	1.10±0.06
	NCP	0.07±0.01	0.04±0**
	CP	0.37±0.02	0.40±0.03
	TP	0.45±0.03	0.44±0.03*
	SA	0.35±0.03	0.31±0.02**
	SP	0.82±0.09	0.78±0.10
15~30	N:P	81.48±26.03	77.42±40.11
	pH	5.94±0.52	5.62±0.50
	Ca ²⁺	1.34±0.28	1.20±0.33
	BD	1.14±0.10	1.14±0.12
	NCP	0.07±0.01	0.03±0.01**
	CP	0.38±0.03	0.37±0.02
	TP	0.45±0.03	0.40±0.03**
	SA	0.33±0.04	0.27±0.03**
	SP	0.81±0.11	0.68±0.08**
30~50	N:P	66.71±25.26	70.63±49.39
	pH	6.02±0.56	5.69±0.46
	Ca ²⁺	1.45±0.25	1.27±0.30
	BD	1.10±0.08	1.09±0.05
	NCP	0.06±0.01	0.04±0.01**
	CP	0.36±0.04	0.38±0.03
	TP	0.42±0.04	0.42±0.03
	SA	0.31±0.04	0.29±0.04
	SP	0.73±0.12	0.73±0.09

注:数据为平均值±标准差,n=9;*和**分别表示对照 CK 和 AMF 接种组间 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平差异显著;N:P 为 AN:AP;pH 为酸碱度;Ca²⁺ 为交换性钙离子,g/kg;BD 为土壤体积质量,g/cm³;NCP 为非毛管孔隙;CP 为毛管孔隙;TP 为总孔隙;SA 为土壤通气度;SP 为土壤孔隙比。

接种后,土壤 BD 与 *Paraglomus* 的相对丰度由显著负相关变为弱正相关,与 AN 和 SOC 质量分数的相关关系由弱负相关变为显著和极显著负相关,相关系数亦有明显增加,说明接种造成的微生物群落组成的变化亦影响土壤的物理性质,进而影响其与土壤养分等化学性质之间的相关关系。

对照 CK 和 AMF 接种组土壤养分水分与其他土壤特性间的 RDA 结果表明,接种改变不同土层、坡位下 *Paraglomus*、*Ambispora*、*Glomus* 和 *Claroideoglomus* 的相对丰度与土壤养分水分和其他特性间的关系(图 7)。相比对照,接种明显改变 SOC 和 AN 与 *Paraglomus* 和 *Ambispora*、AP 与 *Claroideoglomus* 和 *Glomus*、VWC 与 *Claroideoglomus* 相关关系,进一步

证明因接种造成的微生物群落的变化会影响喀斯特石漠化人工林土壤养分和水分等特性。



注:AN 为碱解氮;AP 为速效磷;SOC 为土壤有机碳;pH 为酸碱度;Ca²⁺ 为交换性钙离子;VWC 为土壤水分体积分数;BD 为土壤体积质量;NCP 为非毛管孔隙;CP 为毛管孔隙;TP 为总孔隙;SA 为土壤通气度;SP 为土壤孔隙比;Chao1 为 Chao1 丰富度指数;Pielou 为 Pielou 均匀度指数;Simpson 为辛普森多样性指数;*Paraglomus* 为类球囊霉属相对丰度;*Glomus* 为球囊霉属相对丰度;*Ambispora* 为双型囊霉属相对丰度;*Claroideoglomus* 为近明球囊霉属相对丰度表示。*表示 $p\leq 0.05$;**表示 $p\leq 0.01$;***表示 $p\leq 0.001$ 。

图 6 对照 CK 和 AMF 接种组土壤特性间的 Pearson 相关性
Fig. 6 Pearson correlations of soil properties in control CK and AMF inoculation groups

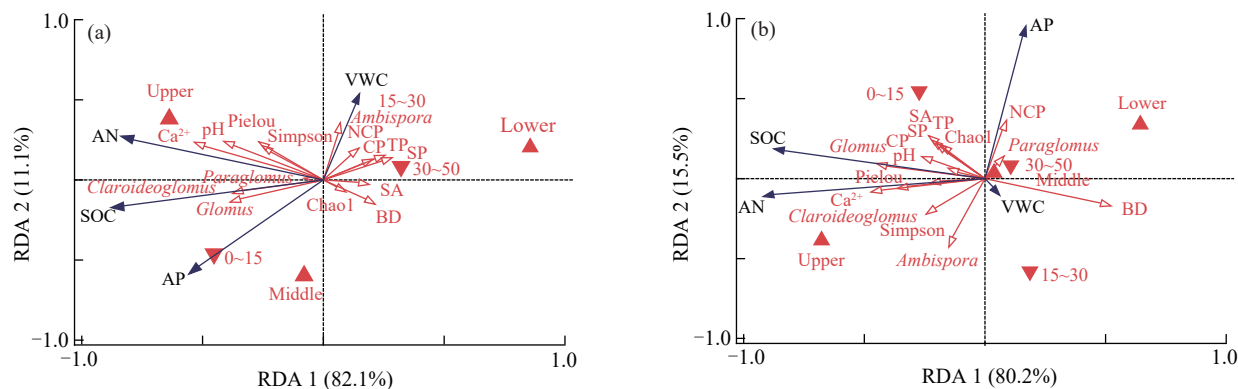
3 讨论

3.1 喀斯特石漠化人工林土壤 AMF 及其对接种的响应

土壤微生物在陆地生态系统的生物地球化学循环中起关键作用^[22]。其中,AMF 是一类定殖于植物根系,对其生长发育起重要作用的共生内生真菌。已有研究^[23]表明,植物吸收的 P 约 80% 由 AMF 提供,高达 75% 的 N 通过 AMF 获得^[24]。陆地超 80% 的植物树种可以和 AMF 形成共生关系^[9]。林艳等^[25]在贵州喀斯特区的研究表明,乔木林土壤 AMF

的优势属是根孢囊霉属和斗管囊霉属。但较多研究^[10,26]表明,喀斯特地区土壤AMF的优势属极有可能是球囊霉属。本研究亦发现,研究区内AMF群落组成中的主优势属是类球囊霉属,次优势属是球囊霉属和双型囊霉属(图3)。AMF接种可通过增加侵染率、改变微生物活性、群落组成及其生物量等方式直接影响其与植物间的共生关系^[13-14]。本研究发

现,接种后根系AMF侵染率有显著提升(图2),AMF群落优势属的相对丰度变化较大且受坡位影响,且坡位间的差异在不同土层亦不同(图3)。究其原因,不同坡位、不同土层养分、水分状况的差异影响AMF的定殖,进而影响其群落组成^[15,18]。此外,本研究试验接种菌剂为优势属球囊霉,这是导致其相对丰度变化较大的原因之一。



注:0~15、15~30、30~50分别表示0~15、15~30、30~50 cm土层。

图7 对照CK和AMF接种组土壤养分水分与其他土壤特性间的冗余分析(RDA)

Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) of soil nutrients, moisture, and other soil properties in control CK and AMF inoculation groups

3.2 AMF接种对喀斯特石漠化人工林土壤理化性质的影响

近年来,土壤理化性质结合生物特性成为土壤质量评价的重要指标^[27]。本研究聚焦于喀斯特石漠化地区关键微生物添加前后土壤特性的差异性分析,可为脆弱人工林生态系统土壤功能的恢复和提升提供理论依据。相对非喀斯特地区,喀斯特石漠化地区,因其特殊的地表地下二元空间结构,加之土层浅薄,土壤总量少,储水能力低且岩石渗透性强,使得土壤养分和水分更成为该地区生态系统的限制因子^[28]。本研究亦发现,研究区内0~15、15~30、30~50 cm土层土壤速效养分N:P平均值分别为66.62、81.48和66.71(表3),较其他亚热带喀斯特或非喀斯特森林生态系统皆较高^[29-31],表明该地区植被恢复过程中严重受到养分P限制。

森林植被具有调节气候、涵养水源、保持水土的功能和作用,自2000年以来,扩大其面积已成为喀斯特石漠化地区生态环境改善、土壤质量改善和社会经济可持续发展的有效恢复方式之一^[4]。其中,人工植被恢复是喀斯特石漠化地区创造良好经济和水土保持效益的重要手段^[2]。但是,相较自然恢复模式,人工林生态系统潜力低、土壤供给不足问题突出,养分和水分的有效性是其生态恢复的关键限制因子。赵元等^[8]在桂西北喀斯特峰丛洼地研究发现,人工造林对促进土壤活性碳库累积的作用劣于自然恢复。本研究亦发现,研究区内速效养分AN、AP

(如图4a、b CK)及水分状况(表2 CK)较喀斯特地区次生林或原始林土壤^[31]皆较低,地上植被生长相对较差,生态系统整体服务功能仍处较低水平。

AMF可在一定程度上缓解土壤养分、水分供给不足对地上植被的限制,尤其在喀斯特石漠化脆弱生境下,接种AMF有助于突破人工林土壤生态功能恢复滞后的瓶颈,实现其可持续恢复。研究^[14]表明,养分限制条件下,AMF与植物间的共生关系受不同程度影响,接种可通过增加侵染率、改变微生物生物量和酶活性等在一定程度上缓解其限制;而水分限制条件下,接种AMF可提高土壤微生物活性和养分质量分数,进而促进地上植被生长,增加其抗旱性^[13]。本研究发现,接种AMF后,AP质量分数在0~15、30~50 cm土层较对照升高(图4b),究其原因,接种可能在一定程度减少植被生长过程中对土壤养分P的消耗量^[32],从而致使土壤中质量分数有所升高。而各土层AN和15~30 cm土层AP质量分数皆呈下降趋势,可能接种后短期内植物吸收利用土壤养分N和该土层P的效率有所提升,从而致使土壤中质量分数有所下降。此外,研究区内接种组0~15、15~30 cm土层土壤速效养分N:P虽依然较高,但相比对照,接种后皆有所下降(表3),表明接种AMF可在一定程度缓解土壤养分P的限制,而30~50 cm未见降低,主要考虑根系纵向延伸较浅、试验周期较短,接种量效应更微弱。以往研究^[13-15,32]表明,接种AMF可不同程度地提高宿主植物对干旱、盐碱、重金属、

低有效态养分、极端温度、酸性土壤、污染物等的耐受力,其潜在机制包括增强宿主植物的养分吸收、水分利用的优化、光合作用增强及活性氧的清除活性增强等。但因养分供给状况不同,AMF 的作用机制存在较大差异。XU 等^[19]研究发现,较低水平的土壤 P 添加,宿主通过 AMF 从有机质中可获取较多养分,且 AMF 接种对土壤细菌和真菌的群落组成影响受 P 的有效性调控。因此,本研究各土层养分 N、P 对接种响应特征的差异性亦与其初始养分、水分状况不同导致 AMF 与植物间相互作用存在差异有关。

3.3 土壤特性间的相互影响

就影响因素而言,土壤养分等化学性质、水分等物理性状和微生物群落组成等生物特性是相互作用、相互影响的,且皆受众多其他环境因素的影响^[22,31]。其中,土壤养分有效性影响微生物生物量的周转和酶活性的发挥^[33],反之,微生物群落结构与酶活性又影响土壤碳、氮、磷循环转化及其有效性^[34]。本研究亦发现,无论是在对照组还是接种组,SOC 与微生物群落组成(图 6)皆存在显著相关关系($p < 0.05$)。

AMF 接种改变微生物的群落组成、生物量及其酶活性^[13-14,19],促进地上植物对土壤养分和水分的吸收效率^[12],增加其产量^[15,32],直接或间接地影响土壤的理化性状。本研究发现,相比对照,接种 AMF 后 SOC 与微生物群落组成中 *Glomus* 相对丰度的相关系数有明显增加,AN 和 AP 质量分数与表征微生物群落组成的指标亦呈显著相关(图 6b),说明接种通过改变微生物的群落组成(图 3),进一步影响土壤 C、N 和 P 循环,致使其与土壤养分之间的相关关系发生改变。此外,接种前后土壤物理性质 BD 与微生物群落组成、速效养分 AN 和 SOC 之间相关关系的差异(图 6),说明接种造成的微生物群落组成的变化亦影响土壤的物理性质,且进一步影响其与土壤养分等化学性质之间的相关关系。

4 结 论

本研究基于典型喀斯特石漠化区人工林样地的原位接种试验发现,属水平上,类球囊霉属、双型囊霉属和球囊霉属是 AMF 群落组成的优势属。接种后,其相对丰度变化较大且各土层不同坡位存在差异;Simpson 多样性指数在 0~15 cm 土层各坡位、15~30 cm 土层中坡、30~50 cm 土层中下坡皆有增加趋势,但变化皆不显著;Chao1 丰富度指数皆呈增加变化,但仅在 0~15 cm 土层上坡位差异显著;Pielou 均匀度指数在 0~15 cm 土层上中坡、15~30 cm 土层中坡、30~50 cm 土层各坡位皆呈增加变化,差异皆不显著。接种 AMF 后,各土层 AN 和 15~30 cm 土层

AP 质量分数皆呈下降趋势;SOC 质量分数在 0~15、15~30 cm 土层皆有所下降,而在 30~50 cm 土层则有所增加,但变化皆不显著。土壤水分体积分数在各土层皆呈极显著增加,稳定的土壤物理结构毛管孔隙则对接种的响应不明显,pH 和交换性 Ca^{2+} 在各土层皆呈降低趋势,但差异皆不显著。相比对照,速效养分 N:P 在 0~15、15~30 cm 土层呈降低趋势,表明接种 AMF 可在一定程度缓解土壤养分 P 的限制。土壤特性相关性和冗余性分析表明,接种后微生物群落组成的变化直接或间接影响养分和水分等土壤理化性质。总之,AMF 接种可在一定程度上改善喀斯特石漠化人工林土壤养分和水分供给状况。但本研究局限于接种后的短期效应,随着试验周期的延长,关键微生物的添加对缓解喀斯特石漠化地区土壤养分和水分供给不足对地上植被限制的作用仍需进一步验证。

参考文献:

- [1] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888. XIONG K N, LI J, LONG M Z. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.
- [3] QIAO Y N, JIANG Y J, ZHANG C Y. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: e107081.
- [4] TONG X W, BRANDT M, YUE Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [5] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7432-7440. WANG K L, YUE Y M, CHEN H S, et al. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [6] 张亚威,刘庭威,黄俊威,等.我国岩溶地区 2016—2021 年石漠化土地动态变化及其原因分析[J]. *中南林业调查规划*, 2023, 42(3): 67-72. ZHANG Y W, LIU T W, HUANG J W, et al. Dynamic change and reason analysis of rocky desertification land in karst area of China during 2016—2021 [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2023, 42(3): 67-72.

- [7] WEI X C, DENG X W, XIANG W H, et al. Calcium content and high calcium adaptation of plants in karst areas of southwestern Hunan, China[J]. Biogeosciences, 2018, 15(9):2991-3002.
- [8] 赵元, 张伟, 胡培雷, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J]. 生态学报, 2021, 41(21):8535-8544.
- ZHAO Y, ZHANG W, HU P L, et al. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical karst depression [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21):8535-8544.
- [9] TEDERSOO L, BAHRAM M, ZOBEL M. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology[J]. Science, 2020, 367(6480):e1223.
- [10] XIAO D, CHER X, LIU X, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi abundance was sensitive to nitrogen addition but diversity was sensitive to phosphorus addition in karst ecosystems [J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55(5):457-469.
- [11] EMMETT B D, LÉVESQUE-TREMBLAY V, HARRISON M J. Conserved and reproducible bacterial communities associate with extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi Open Access [J]. The ISME Journal, 2021, 15(8):2276-2288.
- [12] XIE X Y, WENG B S, CAI B P, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth and nutrient uptake of *Kandelia obovata* (Sheue, Liu & Yong) seedlings in autoclaved soil [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 75:162-171.
- [13] 李越, 李利, 张斌, 等. 接种 AMF 提高干旱胁迫下土壤微生物活性和燕麦抗旱能力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6):1135-1149.
- LI Y, LI L, ZHANG B, et al. AMF inoculation positively regulates soil microbial activity and drought tolerance of oat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(6):1135-1149.
- [14] 张斌, 吕玉峰, 李利, 等. 丛枝菌根真菌接种与磷添加对干旱胁迫燕麦土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(3):644-655.
- ZHANG B, LYU Y F, LI L, et al. Effects of AMF and phosphorus application on microbial biomass and enzyme activities in oat soil under drought stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(3):644-655.
- [15] JIA T, ZHANG Y, YAO Y S, et al. Effects of AMF inoculation on the eco-physiological characteristics of *Imperata cylindrica* under differing soil nitrogen conditions [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:e1134995.
- [16] 中华人民共和国国家林业局. 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程: LY/T 1840—2009 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- State Forestry Administration of China. Technical regulations for vegetation restoration in karst rocky desertification areas: LY/T 1840—2009 [M]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [17] BIERMANN B, LINDERMAN R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: A proposed method towards standardization [J]. New Phytologist, 1981, 87(1):63-67.
- [18] SIMPSON E H. Measurement of diversity [J]. Nature, 1949, 163(4148):e688.
- [19] XU J, LIU S J, SONG S R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi influence decomposition and the associated soil microbial community under different soil phosphorus availability [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120:181-190.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- CHENG D J, ZHANG Y L. Guidance of soil physics experiment [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2012.
- [22] CHEN H, LI D J, XIAO K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests [J]. Functional Ecology, 2018, 32(5):1400-1409.
- [23] 张淑彬, 王幼珊, 殷晓芳, 等. 不同施磷水平下 AM 真菌发育及其对玉米氮磷吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3):649-657.
- ZHANG S B, WANG Y S, YIN X F, et al. Development of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and their influences on the absorption of N and P of maize at different soil phosphorus application levels [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3):649-657.
- [24] TANAKA Y, YANO K. Nitrogen delivery to maize *via* mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied [J]. Plant, Cell and Environment, 2005, 28(10):1247-1254.
- [25] 林艳, 何跃军, 何敏红, 等. 喀斯特植被演替过程土壤丛枝菌根真菌 (AMF) 多样性 [J]. 生态学报, 2019, 39(11):4127-4137.
- LIN Y, HE Y J, HE M H, et al. Species diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungi in karst vegetation succession process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11):4127-4137.
- [26] 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.
- WEI Y, WANG S J, LIU X M, et al. Genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in karst microhabitats of Guizhou Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10):1083-1090.
- [27] HERMANS S M, BUCKLEY H L, CASE B S, et al. Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality [J]. Microbiome, 2020, 8(1):e79.

(下转第 146 页)

- [21] QIU D X, XU R R, GAO P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2024, 241: e108079.
- [22] GUAN N, BI H X, SONG Y L, et al. Vegetation restoration is affecting the characteristics and patterns of infiltration in the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2024, 243: e108190.
- [23] QIU D X, XU R R, WU C X, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltrability and preferential flow in hilly gully areas of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2023, 221: e106770.
- [24] PAN H L, RAN Q H, HONG Y Y, et al. Long-term impacts of ecosystem restoration on saturated hydraulic conductivity in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: e129337.
- [25] 李盼盼. 黄土区纸坊沟小流域生态恢复中土壤功能变化与评价 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- LI P P. Dynamics and assessment of soil functions driven by ecological restoration in Zhifanggou small watershed, loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [26] ZHU P Z, ZHANG G H, ZHANG B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2022, 412: e115717.
- [27] CUI Z, HUANG Z, WANG Y B, et al. Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: e127893.
- [28] REN Z P, ZHU L J, WANG B, et al. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4): 546-555.
- [29] QIU D X, XU R R, WU C X, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: e127730.
- [30] YANG J, XU X L, LIU M X, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 120-129.
- [31] MA J Y, LI Z B, LI P, et al. Effect of mixed plant roots on saturated hydraulic conductivity and saturated water content of soil in the loess region [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 295: e108784.
- [32] LUO Y W, WEN T D, LIN X, et al. Quantitative analysis of pore-size influence on granite residual soil permeability using CT scanning [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 645: e132133.
- [33] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of northeast China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(2): 379-387.
- [34] PAN T, HOU S, WU S H, et al. Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2249-2261.
- [35] WU W J, CHEN G J, MENG T F, et al. Effect of different vegetation restoration on soil properties in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2023, 220: e106630.
- (上接第 137 页)
- [28] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- CHEN H S, YANG J, FU W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 121-126.
- [29] 李雍, 蒙胧晨曦, 陈路瑶, 等. 退化喀斯特森林不同自然恢复阶段土壤养分和酶活性特征 [J]. *内蒙古大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54(6): 629-639.
- LI Y, MENG L C X, CHEN L Y, et al. Variations in soil nutrient and enzyme activities along a natural restoration in degraded karst forests [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2023, 54(6): 629-639.
- [30] 马耀华, 刘虹冰, 李雨欣, 等. 不同恢复模式亚热带森林土壤贮水量和养分储量的差异 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(5): 97-105.
- MA Y H, LIU H B, LI Y X, et al. Differences in soil water and nutrient storage in subtropical forests under different restoration modes [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(5): 97-105.
- [31] ZHANG W, ZHAO J, PAN F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1): 77-91.
- [32] CELY M V T, DE OLIVEIRA A G, DE FREITAS V F, et al. Inoculant of arbuscular mycorrhizal fungi (*rhizophagus clarus*) increase yield of soybean and cotton under field conditions [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: e720.
- [33] ZHENG Q, HU Y T, ZHANG S S, et al. Soil multifunctionality is affected by the soil environment and by microbial community composition and diversity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: e107521.
- [34] MARGALEF O, SARDANS J, MASPONS J, et al. The effect of global change on soil phosphatase activity [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27: 5989-6003.