

喻文强,任宝琴,朱乐辉,等.接种丛枝菌根真菌对诸葛菜生理指标和氮磷钙吸收的影响[J].环境科学研究,2018,31(4):742-749.

YU Wenqiang,REN Baoqin,ZHU Lehui et al.Effects of inoculation with *Arbuscular mycorrhiza* on physiological indicators,absorption of nitrogen,phosphorus and calcium of *Orychophragmus violaceus*[J].Research of Environmental Sciences,2018,31(4):742-749.

## 接种丛枝菌根真菌对诸葛菜生理指标和氮磷钙吸收的影响

喻文强<sup>1,3</sup>,任宝琴<sup>2</sup>,朱乐辉<sup>1</sup>,魏源<sup>3\*</sup>,陈海燕<sup>3</sup>,王世杰<sup>4\*</sup>,周民<sup>5</sup>

- 1.南昌大学资源环境与化工学院,江西 南昌 330031
- 2.中国地质大学期刊中心,北京 100083
- 3.中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,北京 100012
- 4.中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550002
- 5.青岛理工大学环境与市政工程学院,山东 青岛 266033

**摘要:** 为了探究 AM (*Arbuscular mycorrhiza* fungi, 丛枝菌根) 真菌对于喀斯特地区石漠化治理的应用,以石灰土为培养基质模拟喀斯特高钙环境,选用 4 种球囊霉属的 AM 真菌(BEG-141、BEG-167、BEG-168、BEG-193) 作为供试菌种接种喀斯特适生植物——诸葛菜(*Orychophragmus violaceus*) 进行模拟研究. 选取诸葛菜的全株生物量、净光合速率值、水分利用率为生理指标同时以氮磷钙为代表元素,通过对比接种和非接种试验,研究 AM 真菌对宿主植物生理状态的影响. 结果表明:接种 AM 真菌对喀斯特适生植物诸葛菜的生长有显著的促进作用,对全株生物量的促进效应达到了 3~5 倍;对净光合速率值比较分析,接种组显著高于对照组,与对照组相比接种组净光合速率提高了 2~3 倍,其中 BEG-167 接种组的净光合速率(33.14  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )最大;从水分利用率来看,只有 BEG-168 和 BEG-141 的水分利用率显著高于对照组,分别为对照组的 1.8 和 1.4 倍;所有接种组地下部的 TP 含量都显著高于对照组,提高了 9.71%~34.39%,只有 BEG-193 接种组的地上部分 TP 含量显著高于对照组. 整体而言,接种促进了诸葛菜地下部分对 TP 的吸收;接种组地上部 TN 含量均显著低于对照组,而地下部的 TN 吸收提高了 38.07%~138.04%,均显著高于对照组;此外,接种后诸葛菜地上部 TCa(总钙)含量降低了 7.61%~55.58%,接种减少了 TCa 向其地上部的运输,从而减少 TCa 过量对植物体的伤害. 研究显示,AM 真菌对诸葛菜的促进效应很可能是通过提高植株净光合速率、水分利用率、TP 和 TN 的吸收,抑制钙向植物体地上部转移等途径实现的.

**关键词:** AM 真菌; 诸葛菜; 生物量; 净光合作用; 水分利用率; TCa; TN; TP

中图分类号: X21 文章编号: 1001-6929(2018)04-0742-08

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.03.94

## Effects of Inoculation with *Arbuscular mycorrhiza* on Physiological Indicators, Absorption of Nitrogen, Phosphorus and Calcium of *Orychophragmus violaceus*

YU Wenqiang<sup>1,3</sup>, REN Baoqin<sup>2</sup>, ZHU Lehui<sup>1</sup>, WEI Yuan<sup>3\*</sup>, CHAN Haiyan<sup>3</sup>, WANG Shijie<sup>4\*</sup>, ZHOU Min<sup>5</sup>

- 1.School of Resources Environment and Chemical Engineering Nanchang University, Nanchang 330031, China
- 2.Academic Journal, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
- 3.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
- 4.Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
- 5.School of Environment and Municipal Engineering, Qingdao Technology University, Qingdao 266033, China

**Abstract:** In order to investigate the application of *Arbuscular mycorrhiza* fungi, a fungi species in karst rocky desertification regions, four kinds of *A. mycorrhiza* strains (BEG-141, BEG-167, BEG-168, BEG-193) were used to investigate the effects on *Orychophragmus*

收稿日期: 2017-08-31 修订日期: 2017-12-01

作者简介: 喻文强(1993-)男,江西南昌人,15797723277@163.com.

\* 责任作者: ①魏源(1983-)男,河北保定人,副研究员,博士,主要从事土壤环境化学研究,weiyuanshiwo@126.com; ②王世杰(1966-)男,浙江温州人,研究员,博士,主要从事地球环境化学研究,wangshijie@vip.skleg.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41271338,41303066);科技部科研院所专项(No.2014EG166135)

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No.41271338,41303066); National Special Environmental Protection Foundation for Technology Exploit of China (No.2014EG166135)

violaceus, which is adaptable in karst high calcium soil based on lime soil under laboratory conditions. The whole plant biomass, net photosynthetic rate and water use efficiency were chosen as physiological indicators. The effects of AM fungi on the physiological indicators, absorption total nitrogen, total phosphorus and total calcium of host plants were studied through comparing the inoculation and control groups, that the results were as follows: *A. mycorrhiza* could obviously promote the growth of *O. violaceus*, and the whole plant biomass increased by 3-5 times. The net photosynthetic rate was significantly higher than that of the control group. Compared with the control group, the net photosynthetic rate increased by 2-3 times. The BEG-167 had the highest net photosynthetic rate ( $33.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ). Water use efficiency of BEG-168 and BEG-141 was significantly higher than the control groups, which were 1.8 times and 1.4 times higher than the control groups respectively. The contents of total phosphorus in the underground part of all inoculated groups were significantly higher than those in the control group, which increased by 9.71%-34.39%. Only the total phosphorus content of the aboveground part of BEG-193 was significantly higher than that of the control group. In general, inoculation promoted the absorption of total phosphorus in the underground part of *O. violaceus*. The total nitrogen content in the aboveground part of the inoculated group was significantly lower than that in the control group, while the promotion of nitrogen absorption of underground increased 38.07%-138.04%, which was significantly higher than the control group. In addition, the inoculation reduced the transport of calcium to the shoots of the plants, which decreased by 7.61%-55.58%. Inoculation reduced the damage to plants by excessive calcium through inhibiting the transport of calcium to the aboveground part of the plant. The results indicated that AM fungi promoted *O. violaceus* growth through the enhancement of plant net photosynthetic rate, water use efficiency, phosphorus and nitrogen uptake, and inhibition of calcium transfer to the aboveground part of the plant.

**Keywords:** *Arbuscular mycorrhiza*; *Orychophragmus violaceus*; biomass; net photosynthetic rate; water use efficiency; total calcium; total nitrogen; total phosphorus

我国是世界上喀斯特地貌分布面积最大的国家,分布面积达到  $130 \text{ km}^2$ ,西南部育有最典型的石灰岩喀斯特地理景观<sup>[1-3]</sup>. 对于喀斯特地区而言,有着水分亏缺、土壤富钙偏碱性的特点,水分是该区域的限制性因子<sup>[4]</sup>. 与此同时,受人类活动影响喀斯特地区石漠化严重,我国西南部是世界喀斯特土地石漠化最严重的地区,土地的石漠化极大制约着西南地区经济的可持续发展<sup>[5]</sup>,是实现国家西部大开发战略的巨大障碍<sup>[6-7]</sup>. 目前各界学者针对喀斯特石漠化地区的造林配置模式和造林技术进行了大量研究,但普遍采用封山育林、人工造林、种草等地表生物工程手段,未将地球化学背景与生物的适宜性紧密结合,导致人工造林的树种较单一,生物多样性低,造林成活率不高,数十年的封育仍无法形成森林的问题<sup>[8]</sup>.

树种的苗木质量和造林成活率是喀斯特地区进行生态恢复关键所在. 如何提高石漠化生态恢复时植物的成活率并使其发展成稳定的植物群落是目前急需解决的技术难题. AM (*Arbuscular mycorrhizal fungi* 丛枝菌根) 真菌是一类能与绝大部分植物的根系形成互惠共生体的微生物<sup>[9]</sup>. AM 真菌不仅对地上植物有重要的调控作用,在影响生物群落、营养元素循环、生态系统稳定性等方面也具有极其重要的作用<sup>[10-13]</sup>. 魏源等<sup>[14-15]</sup>发现,喀斯特地区的 AM 真菌多样性比非喀地区更为丰富,同时 AM 真菌的生态学功能与喀斯特生态系统的限制因子以及石漠化治理亟待克服的障碍之间都有着良好的耦合关系. 在提高喀斯特生态系统稳定性和石漠化治理中表现出很强的

潜在利用价值. 目前已有许多成功将 AM 真菌应用到退化或受损生态系统恢复和重建中的例子<sup>[16]</sup>. 但是,有关石漠化地区造林树种接种 AM 真菌效应的研究较少,对于 AM 真菌在石漠化的退化生态系统恢复中的生态学意义缺乏充分认识和了解<sup>[17]</sup>. 因此,加强喀斯特地区 AM 真菌与植物生长关系的研究不仅能够从地下生态学的角度解释植物的喀斯特适生机制,而且能够为石漠化的植被恢复技术提供一条新的途径.

诸葛菜 (*Orychophragmus violaceus*) 是一种较好的喀斯特适生植物,常被作为研究植物适应喀斯特环境的模式植物<sup>[18]</sup>. 魏源等<sup>[14,19]</sup>研究发现,典型喀斯特地段的恢复阶段土壤 AM 真菌菌种以球囊霉属为主. 针对喀斯特地区高钙缺水苗木生长困难的情况,该试验选取球囊霉属的 4 种 AM 真菌菌种,以诸葛菜为供试植物,石灰土为培养基质,通过接种和非接种对比试验,研究诸葛菜接种 AM 真菌之后水分利用率、TCa (总钙) 吸收的影响以及植物生长量、光合作用、TN 和 TP 吸收的变化,以期探究 AM 真菌与喀斯特植物适生性的关系,并筛选出适合喀斯特地区的高效菌种,为 AM 真菌投入石漠化治理奠定基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

#### 1.1.1 供试植物和菌种

供试植物为喀斯特适生植物诸葛菜,种子由中国科学院贵阳地理化学研究所提供. 种子灭菌是将诸葛菜种子在 10% 的双氧水中浸泡 20 min,用无菌水冲

洗3次。

选用4种AM真菌菌种作为供试菌种,均为球囊霉属。菌种来源于北京市农林科学院AM真菌菌种资源保护库。菌种的编号(欧洲库)和菌种名称分别为BEG-141(根内球囊霉(*Glomus intraradices*)),BEG-167(摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)),BEG-168(幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)),BEG-193(根内球囊霉(*Glomus intraradices*))。

### 1.1.2 培养基质

土壤基质为喀斯特石灰土,于2017年3月取自贵阳花溪区。土壤基本理化性质:pH为7.65;有机质含量为30.48 g/kg;TN含量为1.47 g/kg;TP含量为0.445 g/kg;TK含量为10.18 g/kg;碱解氮含量为78 mg/kg;有效磷含量为0.8 mg/kg;速效钾含量为220 mg/kg;交换态钙含量为4.033 mg/kg。土壤过筛后去除动植物残体、石块、根系等杂物,将土壤平铺于塑料布上,用37%的甲醛溶液均匀撒浇,密封2 d,然后铺开晾晒3~5 d备用。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 试验设计

试验分为接种组和对照组(不接种AM真菌,CK)2种处理。将灭菌基质按3 kg/盆装入塑料花盆。①接种组:称取BEG-167、BEG-168、BEG-141、BEG-193菌种各20 g,均匀平铺于装好土的盆内,撒上诸葛菜种子,然后铺上疏松表土,每个处理7个重复。②对照组:同样称取各菌种20 g,于0.14 MPa、124~126 °C条件下灭菌20 min后均匀铺于灭菌土上,再将各未灭菌菌种称取20 g分别加入200 mL无菌水浸泡10 min后用双层滤纸过滤,分别取其滤液10 mL加于灭菌种上,然后播入灭菌诸葛菜种子,覆盖灭菌土以作为单独接种对照。每个处理7个重复。将各处理放入温室进行培养,定期用无菌水浇灌,除草,保持温室内温度、湿度、光照适宜。

### 1.2.2 测定方法

土壤理化性质的测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[20]</sup>:土壤pH利用电极法测定;有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;TN和碱解氮含量分别采用开氏消煮法、碱解扩散法进行测定;TP和有效磷含量均采用钼蓝比色法和Olsen法测定;TK和速效钾含量选用氢氧化钠碱融法和乙酸铵提取法测定;交换态钙含量采用电感耦合等离子光谱法测定。

幼苗培养3个月后进行生长及生理指标的测定:

①生物量测定。将幼苗单株取出,去其根系泥土,洗

净,在105 °C烘箱中烘干,采用称量法进行测定。

②净光合速率测定。选取顶叶向下第三叶片(功能叶)采用美国CID公司生产的CI-310便携式光合测定系统直接进行测定,外加1 000 lx稳定光源,在开路系统下测定。测定时外置一个50 L的气流稳定器以保证数据采集的稳定性。每个处理测定7个重复。③水分利用率测定。利用CI-310便携式光合测定系统测定净光合速率与蒸腾速率数值,水分利用率=净光合速率/蒸腾速率,水分利用率单位计作产生1 mol H<sub>2</sub>O需要消耗多少μmol CO<sub>2</sub>。④植物营养元素含量的测定。将烘干后的植物样品在液氮制冷下,用自制不锈钢罐粉碎过100目(150 μm)筛,包装于密封袋内,置于保干器中备用。称取0.25 g植物样品置于聚四氟乙烯罐中用混合酸(HNO<sub>3</sub>+HF)在不锈钢罐配合下密闭消解。TCa含量采用原子吸收分光光度计测定;TP含量采用钼锑抗比色紫外可见分光光度计测定;TN含量采用元素分析仪(PE 2400-II,美国铂金埃尔默公司生产)测定。

### 1.3 数据分析

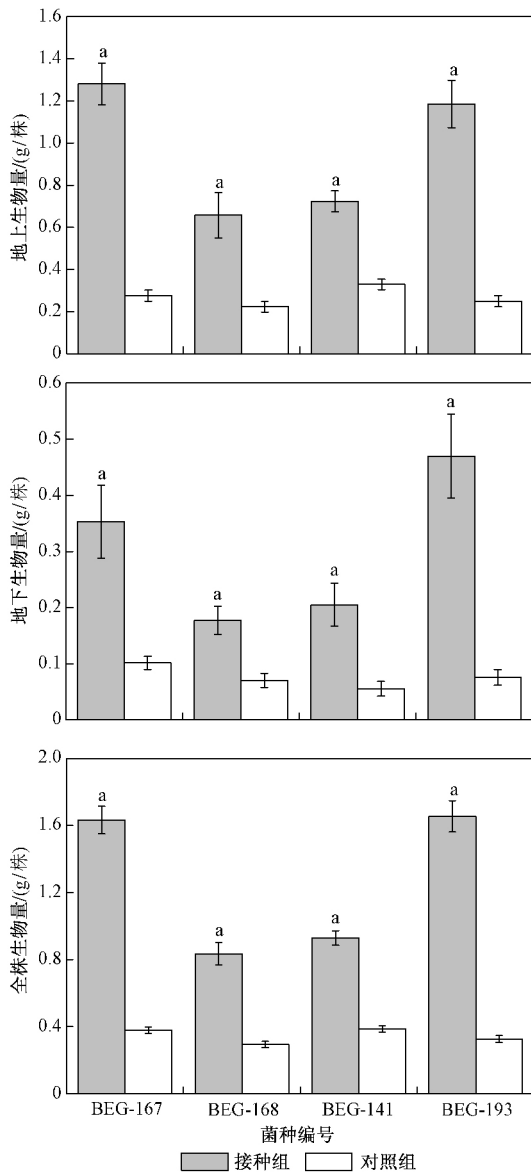
所有数据处理均用Excel 2010进行平均值和标准误差的计算,平均值比较通过SPSS 17.0软件ANOVA计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植株生物量对接种AM真菌的响应

由图1可见,所有接种组诸葛菜的地上生物量都明显高于对照组( $P < 0.05$ ),BEG-167、BEG-168、BEG-141、BEG-193接种组的地上生物量分别是对照组的4.62、3.05、2.22、4.82倍。从地上生物量的数值来看,最高值(1.28 g)出现在BEG-167接种组,最低值(0.66 g)出现在BEG-168接种组;与BEG-167、BEG-193接种组相比,BEG-168和BEG-141接种组的地上生物量明显较低,且与对照组的差异也小很多,说明这两个菌种对植株地上生物量的促进效应较小。对照组的地上生物量比较稳定,基本保持在0.30 g左右。

所有接种组诸葛菜的地下生物量都显著高于对照组( $P < 0.05$ ),BEG-167、BEG-168、BEG-141、BEG-193接种组的地下生物量分别是对照组的3.47、2.49、3.73、6.22倍。从地下生物量的数值来看,最高值(0.47 g)出现在BEG-193接种组,最低值(0.18 g)出现在BEG-168接种组,与BEG-167、BEG-193接种组相比,BEG-168和BEG-141接种组的地下生物量明显较低。对照组的地下生物量比较稳定,基本保持在0.08 g左右。



注: a 表示与对照组差异显著, b 表示与对照组差异不显著。下同。

图 1 各处理下诸葛菜全株、地上、地下生物量对比  
Fig. 1 The comparison of the biomass from whole plant, aboveground and underground parts of *Orychopragmus violaceus* under different treatments

所有接种组诸葛菜的全株生物量都显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,BEG-167、BEG-168、BEG-141、BEG-193 接种组的全株生物量分别是对照组的 4.33、2.84、2.41、5.10 倍。从全株生物量的数值来看,最高值 (1.65 g) 出现在 BEG-193 接种组,最低值 (0.83 g) 出现在 BEG-168 接种组,其中菌种 BEG-168 和 BEG-141 要明显小于其他菌种,而且与对照组的差异相对其他菌种也要小很多,说明这两个菌种对植株全株生物量的促进效应较小。对照组的全株生物量比较稳定,基本保持在 0.35 g 左右。

## 2.2 接种 AM 真菌对诸葛菜净光合速率和水分利用率的影响

由图 2 可知,接种组诸葛菜的净光合速率都显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,说明接种的 4 种 AM 真菌都能显著提高植株的净光合速率。BEG-167、BEG-168、BEG-141、BEG-193 接种组的净光合速率分别是对照组的 3.20、2.23、2.58、2.66 倍,从净光合速率数值来看,最大值 ( $33.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 出现在 BEG-167 接种组,最小值 ( $22.84 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 出现在 BEG-168 接种组。

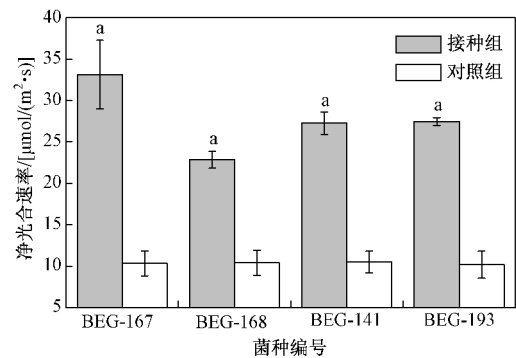


图 2 各处理下诸葛菜净光合速率对比  
Fig. 2 The comparison of net photosynthetic of *Orychopragmus violaceus* under different treatments

由图 3 可见,接种 BEG-168 和 BEG-141 菌种后植株的水分利用率显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,说明这两个菌种能够显著提高植株的水分利用率,是对照组的 1.80、1.40 倍。而 BEG-167 和 BEG-193 菌种接种组的水分利用率显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,分别为对照组的 0.92 和 0.93 倍,说明这两个菌种并不能提高植株的水分利用率。水分利用率最高的是 BEG-168 接种组,最低的是 BEG-193 接种组。

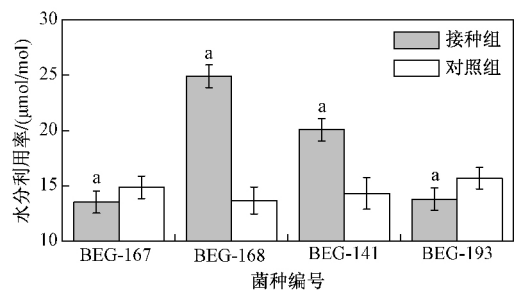


图 3 各处理下诸葛菜水分利用率对比  
Fig. 3 The comparison of water use efficiency of *Orychopragmus violaceus* under different treatments

## 2.3 接种 AM 真菌对诸葛菜 TN、TP、TCa 吸收的影响

由图 4 可见,所有接种组地上部的 TN 含量都显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ) 。所有接种组地下部的 TN

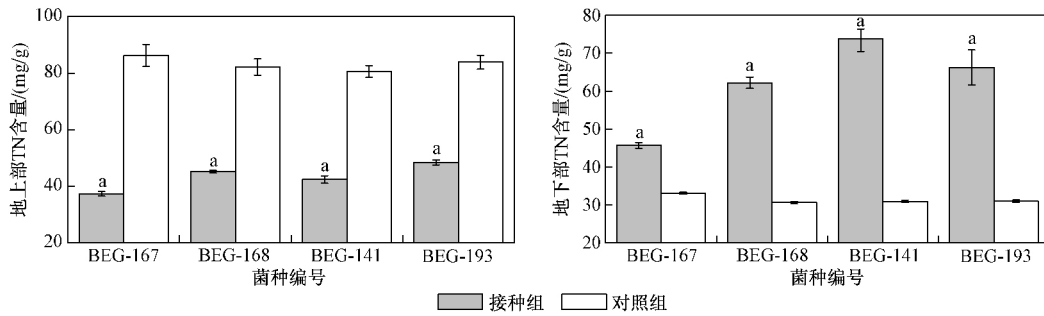


图4 各处理对诸葛菜地上、地下 TN 吸收对比

Fig. 4 The effect of different treatments on absorption of total nitrogen by ground and underground parts of *Orychophragmus violaceus*

含量也都显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,其中 BEG-141 接种组的促进作用最大 ,比对照组提高 138.04% ;其他依次为接种组 BEG-193、BEG-168、BEG-167 ,分别比对照组提高 114.16%、102.06%、38.07% .对照组植株地上部的 TN 含量明显高于地下部 ,而接种组所有菌种都使植株地下部的 TN 含量明显高于地上部分 ,说明 AM 真菌有使 TN 在植株根部累积的效应 .

由图 5 可见 ,菌种 BEG-193 接种组地上部 TP 含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,与对照组相比提高了 50.10% ,说明其显著促进了植株地上部对 TP 的吸

收 ;而菌种 BEG-168、BEG-141、BEG-167 接种组植株的 TP 含量均低于对照组 ,其中 BEG-141、BEG-167 菌种有显著性差异 ( $P < 0.05$ ) ,说明这些菌种对地上部的 TP 吸收无促进作用 .菌种接种组地下部 TP 含量都显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,按含量高低依次为接种组 BEG-193、BEG-141、BEG-168、BEG-167 ,它们分别较对照组提高了 34.39%、24.55%、26.16%、9.71% ,说明接种 AM 真菌能够促进诸葛菜对地下部 TP 的吸收 ,但不同的菌种对其的促进程度不同 .整体而言 ,接种 AM 真菌促进了诸葛菜对 TP 的吸收 ,这种促进程度和部位因菌种不同而存在差异 .

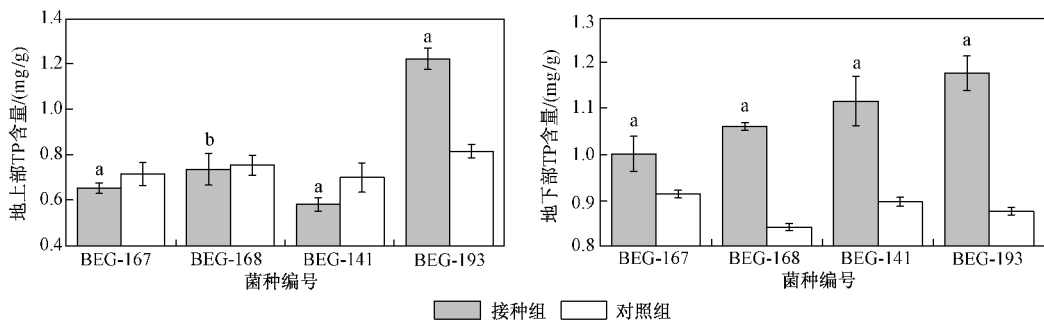


图5 各处理对诸葛菜地上、地下 TP 吸收对比

Fig. 5 The effect of different treatments on absorption of total phosphorus by ground and underground parts of *Orychophragmus violaceus*

由图 6 可见 ,所有接种组的地上部 TCa 含量都低于对照组 ,其中 BEG-193、BEG-168、BEG-141、BEG-167 接种组均有显著差异 ( $P < 0.05$ ) ,BEG-193、BEG-168、BEG-141、BEG-167 接种组分别比对照组低了 31.03%、7.61%、55.58%、8.84% .BEG-141 接种组地下部 TCa 含量要显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,比对照组高 36.92% ,而 BEG-168、BEG-193 和 BEG-167 接种组地下部 TCa 含量要显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ) ,分别比对照组低 12.93%、16.54%、26.61% .整体分析 ,接种 AM 真菌可以减少诸葛菜地上部 TCa 含量 ,对地

下而言 ,不同的菌种表现出了不同的效果 ,有促进也有抑制 .

## 2.4 讨论

### 2.4.1 接种 AM 真菌对诸葛菜生理指标的影响

生物量是衡量植株生长情况的最直观、最重要的指标 ,是植株内在生理状况的综合反应 .该研究选取球囊霉属的 4 种 AM 真菌菌种都显著促进了植株地上、地下和全株生物量的提高 ,说明 AM 真菌能够使诸葛菜的各项生理指标向着健康的方向发展 .这与 CHEN 等<sup>[21]</sup>在喀斯特土壤接种 AM 菌种 ,最终 AM 真

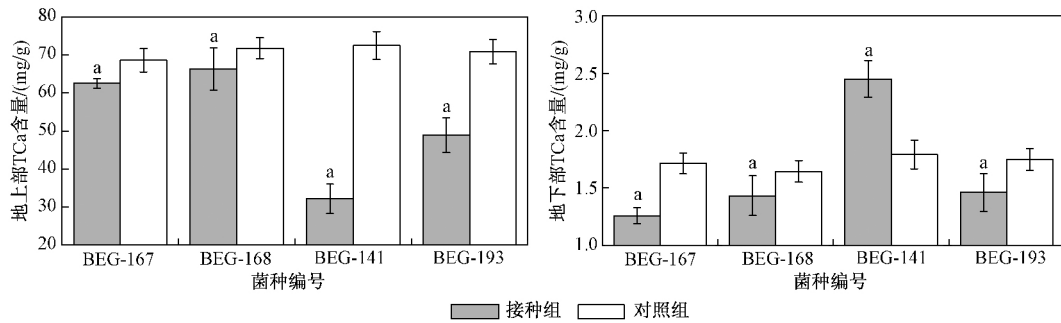


图 6 各处理对诸葛菜地上、地下 TCa 吸收对比

Fig. 6 The effect of different treatments on absorption of total calcium by ground and underground parts of *Orychophragmus violaceus*

菌显著促进桑树生物量的结论相一致。利用地表生物工程进行石漠化修复,植物的生长质量和存活率是修复的关键,该试验接种 AM 真菌之后可以提高喀斯特适生植物诸葛菜的生物量,证明 AM 真菌可以用于植物修复石漠化,为石漠化植物治理提供了一个新的选择。

净光合速率体现的是植物对有机物的积累<sup>[22]</sup>。有研究<sup>[23]</sup>表明,接种 AM 真菌之后猕猴桃叶片净光合速率与对照组相比得到了显著地提高,与笔者试验结果一致。需要注意的是,不同菌种净光合速率大小顺序与植物全株生物量大小顺序有很大差别,如 BEG-168 和 BEG-141 这两个菌种接种组的净光合速率相比 BEG-167 和 BEG-193 接种组并不低,甚至略高,而生物量却要低很多,这说明 AM 真菌并不只是通过提高植物净光合速率这一种途径来提高植物生物量,不同菌种对植物生物量的主要促进途径和促进机理也有可能不同。

有研究发现,干旱胁迫会限制植物生长<sup>[24]</sup>,其水分利用率高,有利于提高植株抗旱性,进而影响植株生长。对诸葛菜的水分利用率进行分析,发现 BEG-167 和 BEG-193 接种组的水分利用率要比对照组低,差异显著,但其生物量要比对照组显著高。这是因为温室内培养过程中水分并不是限制因子,在保证水分供应前提下 BEG-167 和 BEG-193 接种组能够充分提高植株生物量,但由于其水分利用率较低,所以在干旱胁迫条件下就不一定有如此大的促进效应;相对而言, BEG-141 和 BEG-168 接种组可能在干旱胁迫条件下对植株的促进效应更高。总体而言,接种 AM 真菌提高了诸葛菜水分利用率,这与刘婷<sup>[25]</sup>发现 AM 真菌在干旱条件下可以提高杨树水分利用率的结论一致。西南石漠化地区普遍存在干旱缺水的状况,植物水分利用率的高低直接影响到该地区植物的存活率,存活率越低越不利于该地区的石漠化修复。笔者

所得试验结果证明接种 AM 真菌有利于植物适应喀斯特地表干旱缺水的环境,进一步表明 AM 真菌在喀斯特植物适应土壤干旱环境方面可能具有重要作用。

#### 2.4.2 接种 AM 真菌对诸葛菜氮磷钙吸收的影响

为了研究植物在喀斯特地区的适生性,还需要了解 AM 真菌对植物元素吸收情况。整体而言,接种 AM 真菌促进了诸葛菜对 TP 的吸收,这种促进程度和部位因菌种不同而不同。所有接种组植株地下部的 TP 含量都显著高于对照组,而地上部只有 BEG-193 接种组的 TP 含量高于对照组,表现出接种对地下部 TP 吸收具有促进作用而对地上部无明显促进作用。接种植物可能是因为吸收其他营养元素,造成内部稀释引起地上部 TP 浓度降低<sup>[26]</sup>。对于 TN 而言,接种组所有菌种的地上部 TN 含量均显著低于对照组,而地下部 TN 含量均显著高于对照组。越来越多的研究<sup>[27-28]</sup>表明,AM 真菌的根外菌丝能够帮助植物吸收  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和一些氨基酸在内的有机氮。有研究<sup>[29-30]</sup>发现,AM 真菌可以吸收利用 N 素,并且自身可能代表土壤的一个重要氮库,规模上可以与根系氮库相媲美。该试验中 AM 真菌可能吸收了大量的 TN,但并不是都转移给了植物,大部分则停留在菌丝体内,作为植物的一个备用氮源存在,在需要时以便提供。接种对植株 TN 和 TP 吸收的影响,都表现出使 TN 和 TP 在根部滞留的现象,这说明在石灰土上 AM 真菌对 TN 和 TP 吸收促进作用具有同步效应。高钙环境对于许多植物的生长是不利的,植物如何适应喀斯特高钙环境一直是研究的热点。有研究<sup>[31]</sup>发现,在植物根部  $\text{Ca}^{2+}$  可以通过  $\text{Ca}^{2+}$  通道直接进入表皮细胞和根毛。笔者研究结果表明,植物有可能通过与 AM 真菌的共生关系减少钙向植株地上部的运输,从而减少 TCa 过量造成的伤害。不同 AM 真菌菌种达到这种效果的方式可能会不同,该试验中 BEG-141 接种组有可能是通过将钙富集到根部形成一个钙库从而

减少其向上运输,而 BEG-193、BEG-168 和 BEG-167 接种组有可能通过调节根细胞的  $\text{Ca}^{2+}$  通道,从一开始就减少钙向植物体内的运输。

综合分析表明,AM 真菌对宿主的促进效应很可能是通过提高植株净光合速率、水分利用率、TP 和 TN 吸收、抑制钙向植物体上部转移等途径实现的,这反映出的是喀斯特植物通过与 AM 真菌的共生关系提高本身对这一地区环境的综合适应能力,但这几种途径的贡献差别以及它们之间的关系目前还不能给出确切的结论,是否还有其他途径这些都是需要继续研究的机制问题。同时该试验研究接种 AM 真菌之后宿主植物的各项指标都趋于利好,说明 AM 真菌接种喀斯特适生植物有利于石漠化修复,是一种新型的植物修复方式。

### 3 结论

a) 室内盆栽试验结果显示,在以石灰土为基质的培养过程中,接种 AM 真菌增加了喀斯特适生植物诸葛菜的生物量,促进了诸葛菜的生长。接种 AM 真菌对生长于石灰土上的植物促生长作用,说明 AM 真菌有运用于喀斯特地区石漠化治理的潜在优势。

b) 接种 AM 真菌可以显著提升诸葛菜的净光合速率,净光合速率的升高与植物的生物量增长相契合,但净光合速率并非决定生物量增长的唯一因素;不同 AM 真菌对诸葛菜水分利用率的效果并不一致,只有 BEG-168 和 BEG-141 菌种能够提高诸葛菜水分利用率,选择对植物水分利用率促进效应更高的菌种更有利于植物适应缺水的喀斯特环境。

c) 接种 AM 真菌之后,总体促进了植物 TN 的吸收,抑制了地上部的 TN 吸收,促进了地下部的 TN 吸收;接种 AM 真菌可以促进植物总体的 TP 的吸收,但只有 BEG-193 促进了植物地上部 TP 的吸收,其余菌种均抑制了诸葛菜地上部的 TP 吸收,而地下部 TP 的吸收普遍受到促进;接种 AM 真菌之后诸葛菜地上部  $\text{TCa}$  含量均受到了抑制,而除 BEG-141 以外其余菌种均抑制了植物地下组织的  $\text{TCa}$  吸收。接种 AM 真菌之后植物  $\text{TCa}$  吸收的抑制证明 AM 真菌有利于植物适应喀斯特高钙环境,TN 和 TP 的吸收促进进一步解释了接种 AM 真菌提高了植物生长量。

#### 参考文献(References):

[1] WANG S J, LIU Q M, ZHANG D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation & Development 2004, 15(2): 115-121.

[2] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-

植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社 2009.

- [3] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报 2001, 22(2): 159-164.
- YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Vegetation karst effects on the karst area of southwest China [J]. Acta Geoscientia Sinica 2001, 22(2): 159-164.
- [4] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 等. 石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1077-1081.
- [5] 李军峰, 王智慧, 张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓多样性及水土保持研究[J]. 环境科学研究 2013, 26(7): 759-764.
- LI Junfeng, WANG Zhihui, ZHANG Chaohui. Bryophyte diversity and the effect of soil formation along with water conservation in karst rocky desertification region [J]. Research of Environmental Sciences 2013, 26(7): 759-764.
- [6] 薛亮, 任华东, 李生, 等. 西南喀斯特石漠化地区生态恢复研究进展[C]//中国科学技术协会. 中国科协年会第 19 分会场: 中国西部生态林业和民生林业与科技创新学术研讨会文集. 北京: 中国科学技术协会 2013.
- [7] ZHANG J Y, DAI M H, WANG L C *et al.* The challenge and future of rocky desertification control in karst areas in southwest China [J]. Solid Earth Discussions 2016, 7(4): 3271-3292.
- [8] 周玮, 高渐飞. 喀斯特石漠化区植被恢复研究综述[J]. 绿色科技 2013(7): 4-7.
- ZHOU Wei, GAO Jianfei. Review of research on the vegetation restoration in the karst rocky desertification area [J]. Journal of Green Science and Technology 2013(7): 4-7.
- [9] JSSERD. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 1997.
- [10] CHENG Lei, BOOKER FL, TU Cong *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi increase organic carbon decomposition under elevated  $\text{CO}_2$  [J]. Science 2012, 337(6098): 1084-1087.
- [11] BENDER S F, WAGG C, MG V D H. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2016, 31(6): 440-452.
- [12] NUCCIO E E, HODGE A, PETT-RIDGE J, *et al.* An arbuscular mycorrhizal fungus significantly modifies the soil bacterial community and nitrogen cycling during litter decomposition [J]. Environmental Microbiology 2013, 15(6): 1870-1881.
- [13] ROGER A, GETAZ M, RASMANN S, *et al.* Identity and combinations of arbuscular mycorrhizal fungal isolates influence plant resistance and insect preference [J]. Ecological Entomology, 2013, 38(4): 330-338.
- [14] 魏源, 王世杰, 刘秀明, 等. 喀斯特地区丛枝菌根真菌遗传多样性[J]. 生态学杂志 2011, 30(10): 2220-2226.
- [15] 魏源, 王世杰, 刘秀明, 等. 丛枝菌根真菌及在石漠化治理中的应用探讨[J]. 地球与环境 2012, 40(1): 87-95.
- WEI Yuan, WANG Shijie, LIU Xiuming, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and their application in karst rocky desertification control [J]. Earth and Environment 2012, 40(1): 87-95.
- [16] 王立, 贾文奇, 马放, 等. 菌根技术在环境修复领域中的应用及

- 展望[J].生态环境学报,2010,19(2):487-493.
- WANG Li ,JIA Wenqi ,MA Fang ,*et al.* Perspective of mycorrhizal technology application for environment remediation [J].Ecology and Environmental Science ,2010 ,19( 2) : 487-493.
- [17] 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.
- ZHANG Zhongfeng ,ZHANG Jinchi ,HUANG Yuqing ,*et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on growth and photosynthesis of *Cyclobalanopsis glanca* seedlings [J]. Guihaia , 2013 ,33( 3) : 319-323.
- [18] 吴沿友,蒋九余,帅世文,等.诸葛菜的喀斯特适生性的无机营养机制探讨[J].中国油料作物学报,1997(1):47-49.
- WU Yanyou ,JIANG Jiuyu ,SHUAI Shiwen ,*et al.* Approach to mechanism of inorganic nutrition about karst adaptability of *Orychophragmus violaceus* [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences ,1997( 1) : 47-49.
- [19] 何跃军,吴春玉,何丙辉,等.喀斯特不同植被恢复阶段土壤AMF组成及多样性研究[J].水土保持学报,2016,30(5):305-309.
- HE Yuejun ,WU Chunyu ,HE Binghui ,*et al.* Composition and species diversity of AMF in different vegetation restoration stages in karst region [J]. Journal of Soil and Water Conservation ,2016 ,30 ( 5) : 305-309.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:1-638.
- [21] 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 ,488/489: 769-773.
- [22] 段然,杨春宇,陈霆,等.LED光源光谱强度与植物光合作用的研究[C]//中国照明学会.中国照明论坛:半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集.北京:中国照明学会,2016.
- [23] 刘丽丽.丛枝菌根真菌(AMF)对猕猴桃叶片硒吸收转化和光合特性的影响[D].绵阳:西南科技大学,2014.
- [24] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等.刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J].北京林业大学学报,2010,32(1):24-30.
- [25] 刘婷.丛枝菌根真菌(AMF)调控杨树生长及干旱响应机制的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [26] 孙金华,毕银丽,裘浪,等.土壤中丛枝菌根真菌对宿主植物磷吸收作用机制综述[J].土壤通报,2016,47(2):499-504.
- SUN Jinhua ,BI Yinli ,QIU Lang ,*et al.* A review about the effect of AMF on uptaking phosphorus by host plants in soil [J]. Chinese Journal of Soil Science ,2016 ,47( 2) : 499-504.
- [27] HAWKINS H J ,GEORGE E. Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil ,2000 ,226( 2) : 275-285.
- [28] HODGE A ,STORER K. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems [J]. Plant and Soil ,2015 ,386( 1) : 1-19.
- [29] 陈永亮,陈保冬,刘蕾,等.丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J].生态学报,2014,34(17):4807-4815.
- CHEN Yongliang ,CHEN Baodong ,LIU Lei ,*et al.* The role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil nitrogen cycling [J]. Acta Ecologica Sinica ,2014 ,34( 17) : 4807-4815.
- [30] HODGE A ,FITTER A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America ,2010 ,107( 31) : 13754-13759.
- [31] 姬飞腾,李楠,邓馨.喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J].植物生态学报,2009,33(5):926-935.
- Ji Feiteng ,Li Nan ,DENG Xin. Calcium contents and high calcium adaptation of plants in karst areas of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology ,2009 ,33( 5) : 926-935.

(责任编辑:周巧富)