

# 丛枝菌根对采煤沉陷区紫穗槐生长及土壤改良的影响

王瑾<sup>1,2</sup>, 毕银丽<sup>1</sup>, 邓穆彪<sup>1</sup>, 邹慧<sup>1</sup>, 孙江涛<sup>1</sup>, 解文武<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007

**摘要** 丛枝菌根技术是目前矿区生态修复的重要手段之一。通过向紫穗槐接种丛枝菌根(AM), 研究接种后2~14个月间菌根对紫穗槐生长和土壤改良的影响。结果表明, 与不接种相比, 接种AM极显著提高植物成活率7.2%~9.7%, 株高极显著增加34%~62%、冠幅极显著增加39%~65%; 极显著提高菌根侵染率16%~21%, 极显著提高菌丝密度50%~70%; 菌根侵染率、菌丝密度与土壤有机碳、全氮、速效磷、速效钾、碱解氮含量显著或极显著正相关; 接种AM能够显著降低土壤pH值, 提高土壤有机碳、全氮、速效磷、速效钾、碱解氮含量; 球囊霉素相关土壤蛋白是土壤有机质的重要组成部分, 可以灵敏反映土壤质量的变化。接种AM能够促进采煤沉陷区紫穗槐的生长发育和土壤改良。

**关键词** 丛枝菌根; 土壤质量; 侵染率; 球囊霉素相关土壤蛋白

中图分类号 S154

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.11.003

## Effects of Arbuscular Mycorrhiza on Growth of *Amorpha Fruticosa* L. and Soil Improvement in Coal Mining Subsidence Area

WANG Jin<sup>1,2</sup>, BI Yinli<sup>1</sup>, DENG Mubiao<sup>1</sup>, ZOU Hui<sup>1</sup>, SUN Jiangtao<sup>1</sup>, XIE Wenwu<sup>1</sup>

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China
2. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China

**Abstract** Arbuscular mycorrhizal technology is one of the important means for ecological restoration in mining areas. In this paper, effects of the arbuscular mycorrhizal (AM) inoculation on the growth and development of *Amorpha Fruticosa* L. and soil quality were studied between 2 and 14 months post-inoculation. The results showed that compared with that of the non-inoculated *Amorpha Fruticosa* L., the survival rate of inoculated one increased by 7.2%~9.7%, the plant height markedly increased by 34%~62%, the crown diameter significantly increased by 39%~65%, the mycorrhizal infection rate significantly increased by 16%~21%, and the hyphal density increased by 50%~70%. The mycorrhizal infection rate and hyphal density had significantly or highly significantly positive correlations with contents of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen in the soil. The soil pH significantly decreased, and the contents of soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen significantly increased by the inoculation of mycorrhiza. Glomalin related soil protein is an important composition of organic matter in soil, which can reflect small changes of soil quality. These results show that AM can promote growth and development of *Amorpha Fruticosa* L. and soil improvement in coal mining subsidence areas.

**Keywords** arbuscular mycorrhiza; soil quality; mycorrhizal infection rate; glomalin related soil protein

收稿日期:2014-01-13;修回日期:2014-02-26

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC10B03)

作者简介:王瑾,博士研究生,研究方向为土地复垦与生态重建,电子信箱:swangj2005@126.com;毕银丽(通信作者),教授,研究方向为土地复垦及微生物复垦技术,电子信箱:ylibi88@163.com

引用格式:王瑾,毕银丽,邓穆彪,等.丛枝菌根对采煤沉陷区紫穗槐生长及土壤改良的影响[J].科技导报,2014,32(11):26-32.

在中国的一次性能源消费中,煤炭约占70%<sup>[1]</sup>。煤炭开采过程中,约96%为井工开采,井工开采会形成地下采空区,容易造成地面塌陷。目前,中国采煤区地面塌陷造成土地破坏总量超过400万hm<sup>2</sup>,并且每年新增面积3.3万~4.7万hm<sup>2</sup>,生态脆弱。煤矿区是当今最为典型、退化最为严重的生态系统之一<sup>[2]</sup>,生态文明建设亟须对煤矿区进行生态修复。紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)为豆科紫穗槐属丛生灌木,根系发达,生长速度快,耐干旱、瘠薄,因其具有较强的保持水土、改良土壤的作用而广泛应用于采煤沉陷区生态复垦。由于采煤导致地表沉陷,地表裂缝大量出现,土壤水分养分流失严重,导致紫穗槐生长缓慢,部分甚至难以存活。植物生长发育和土壤质量是评价矿区生态修复情况的重要内容之一。研究区地处神东采煤沉陷区,气候干旱,土壤养分贫瘠,制约着植物生长。土壤质量在维持生态系统生产力上具有重要作用<sup>[3]</sup>,它是干旱、半干旱采煤塌陷区植被恢复过程中重要的限制性因素<sup>[2]</sup>。

目前,利用微生物技术为植物生长创造良好基质条件,是国内外土壤质量改良的重要手段,将此技术应用于煤矿沉陷区具有成本低、适用性强、缩短复垦周期、生态前景广阔<sup>[4]</sup>等优点。丛枝菌根真菌技术在采煤沉陷区的应用已取得了良好的效果<sup>[5]</sup>。菌根是真菌与植物根系形成的共生体<sup>[6]</sup>,菌根菌是根际有益微生物,常作为微生物肥料使用<sup>[7]</sup>。丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌是自然界中最常见的、可侵染的寄主范围最广的一种土壤微生物,陆地90%以上的有花植物都能够与它形成菌根共生体<sup>[8]</sup>,因此在生态系统功能中占有重要地位,尤其是在营养不良生态系统<sup>[9]</sup>,如干旱区采煤沉陷地。

AM真菌能分泌一类糖蛋白,球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin related soil protein, GRSP),简称球囊霉素<sup>[10]</sup>。球囊霉素对维持土壤有机碳平衡和土壤团聚体稳定性具有明显作用,但煤矿塌陷区微生物复垦模式下土壤球囊霉素含量影响因素尚不清楚。植物的生长离不开土壤环境,虽然丛枝菌根真菌技术在采煤沉陷区的应用已取得了良好的效果,但采煤沉陷区生态恢复过程中植物的生长发育与土壤质量关系如何还少见报道。本文以紫穗槐为宿主植物,通过接种AM真菌摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, G.m)与植被之间建立互惠共生关系,研究AM对植物生长发育、菌根侵染率、菌丝密度、球囊霉素、土壤质量的影响,分析AM在采煤沉陷区生态复垦中的作用机理,旨在为矿区生态修复和矿区生态文明建设提供技术支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处毛乌素沙地南缘,位于陕西省神木县神东矿区塌陷地,属典型的干旱半干旱高原大陆性气候,干旱少雨多风沙。年平均降水量441 mm,主要集中在7—9月,年均蒸发量为1337 mm,是降水量的3倍;年平均气温8.9℃,平均日

照2875.9 h;土壤类型主要为风沙土,土质疏松,养分贫瘠,蓄水保肥、抗蚀力差。该区植被退化,种类单一,主要以1年生狗尾草、刺藜、沙葱、沙蓬等草本植物为主。

### 1.2 试验材料与方法

#### 1.2.1 供试菌种

供试菌种为AM真菌摩西球囊霉(G.m),由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所微生物室提供,后经中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室增殖培养得到。

#### 1.2.2 试验设计

试验设接种(G.m)与不接种对照(CK)两个处理。每个处理5行,每行31株,行距×株距为2 m×2 m。2012年4月中旬进行供试植物紫穗槐栽植,浇水达土壤最大饱和持水量后,每周浇水1次,1个月后免除浇水,进行自然管理。定植3个月后于2012年7月中旬对接菌处理进行G.m接种,具体方法是:用无菌小铁铲在靠近植物周围0~20 cm土层剥去表层土,以清除露出根系为宜,每株植物穴施菌剂50 g,然后将之前剥离的表土重新覆盖在所施菌剂上,浇水达土壤最大饱和持水量。

2012年7月(接种前)监测生长状况,紫穗槐平均株高26.5 cm、平均冠幅20.4 cm、平均成活率87.27%,土壤基本理化性质是土壤速效磷8.16 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾66.20 mg·kg<sup>-1</sup>,碱解氮32.12 mg·kg<sup>-1</sup>,有机碳7.36 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.601 g·kg<sup>-1</sup>,pH值8.35,电导率164.36 μS·cm<sup>-1</sup>。

### 1.3 样品采集

分别于2012年7月(接种前,幼苗期)、2012年9月(接种后2个月,营养生长期)、2013年6月(接种后11个月,第2年返青后并开始营养生长)、2013年9月(接种后14个月,营养生长或是生殖生长)进行4次监测、采样。采样方法是:按照S路线确定采样植株,在确定采集的植株0~20 cm耕层周围,用无菌小铁铲紧贴植物根系采集土壤,作为根际土壤,同时收集植物纤细的根,每行采集5点,混合制样,每个处理重复5次。土壤自然风干后,去除枯枝落叶等杂质,过1 mm筛,测定球囊霉素土壤相关蛋白和土壤理化性状等指标;纤细的根用来测定菌根侵染率。

### 1.4 指标测定及方法

#### 1.4.1 土壤理化性质的测定

土壤理化性质测定采用常规方法<sup>[11]</sup>。测量土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法;测量全氮用凯氏定氮法;测量速效磷用NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法;测量速效钾用NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度法;测量碱解氮用碱解扩散法;测量土壤pH值、电导率用电位法(水:土=2.5:1,试验中水25.0 mL,土10.0 g)。

#### 1.4.2 菌丝密度的测定

菌丝密度的测定采用网格交叉法<sup>[12]</sup>,菌根侵染率的测定采用Phillips和Hayman法<sup>[13]</sup>。

#### 1.4.3 球囊霉素提取和测定

根据Wright等<sup>[10]</sup>的方法提取测定了球囊霉素中易提取球囊霉素(easily extractable glomalin, EEG)和总球囊霉素(total

glomalin, TG),以每克土壤中含有蛋白质的毫克量表示球囊霉素含量。

#### 1.4.4 植株生长监测

对处理内所有紫穗槐植株用钢卷尺测量株高和冠幅。计算紫穗槐成活率公式为:成活率(%)=(成活株数/栽种株数)×100%。

#### 1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理,结果以均值±标准误差表示,采用 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析,并用最小显著差异法(LSD法)进行均值显著性比较、相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对紫穗槐生长的影响

与不接种相比,AM 真菌能够极显著提高紫穗槐成活率,促进紫穗槐生长发育( $P<0.01$ )(表 1)。随着接种时间的延长,接种处理植株成活率总体保持稳定,约为 92.7%~95.1%,平均成活率 93.7%;不接种植株成活率约为 83.6%~87.8%,平均成活率 85.6%,各时期差异不显著( $P<0.05$ )。与不接种植株相比,接种 2、11、13 个月后,处理植物成活率分别显著提高了 7.3%、7.2%、9.7%( $P<0.01$ )。

表 1 不同处理对植物生长的影响

Table 1 Effect of different treatments on plant growth

处理	时间/月	成活率/%	株高/cm	冠幅/cm
G.m	2	95.1±0.8 <sup>a</sup>	55.4±0.9 <sup>c</sup>	38.7±1.9 <sup>d</sup>
	11	92.7±2.5 <sup>ab</sup>	57.7±1.0 <sup>c</sup>	44.8±0.6 <sup>e</sup>
	14	93.3±1.1 <sup>ab</sup>	91.8±0.8 <sup>a</sup>	85.1±1.4 <sup>a</sup>
CK	2	87.8±1.7 <sup>cd</sup>	34.2±0.8 <sup>e</sup>	23.4±0.8 <sup>d</sup>
	11	85.5±1.5 <sup>cd</sup>	37.9±0.9 <sup>d</sup>	25.8±0.5 <sup>e</sup>
	14	83.6±0.7 <sup>d</sup>	68.3±1.2 <sup>b</sup>	61.0±0.6 <sup>b</sup>

注:数据后的上标同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

接种 AM 真菌 G.m 能极显著促进紫穗槐株高、冠幅的增加( $P<0.01$ )。接种处理、不接种处理株高动态变化分别为 55.4~91.8 cm、34.2~68.3 cm,前者是后者的 1.3~1.6 倍,差异极显著( $P<0.01$ )。冠幅动态变化接种处理、不接种处理分别为 38.7~85.1 cm、23.4~61.0 cm,前者是后者的 1.4~1.7 倍,差异极显著( $P<0.01$ )。

### 2.2 不同处理对菌根侵染率、菌丝密度的影响

菌根侵染率反映了菌根真菌与宿主植物的亲合程度。从图 1 可知,接种处理菌根侵染率为 78.7%~82.7%,高于不接种处理,差异极显著( $P<0.01$ );接种 G.m 菌根侵染率随接种时间变化差异不显著( $P>0.05$ ),不接种处理在复垦 11 个月后侵染率最低,为 57.3%,与复垦后 2 个月、复垦后 14 个月相比差异显著( $P<0.05$ )。不接种处理菌根侵染率超过 50%,说明在自然条件下,土壤中存在大量土著 AM 真菌,从而增加了菌根感染能力。

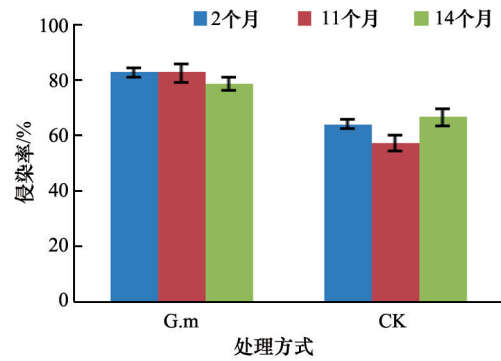


图 1 不同处理对菌根侵染率的影响

Fig.1 Effect of different treatments on infection rate

菌丝密度反映菌根在促进植物生长、营养吸收和抗逆性等方面的能力<sup>[4]</sup>。同一采样时间,接菌处理后的菌丝密度大于不接菌处理,前者是后者的 1.5~3.7 倍,差异极显著( $P<0.01$ )(图 2)。菌丝密度随季节变化而有增减,接菌处理菌丝密度表现先增加后降低趋势,接种后 14 个月,菌丝密度最小,为 4.16  $m \cdot g^{-1}$  土壤;接菌 11 月后,菌丝密度最大,达 7.06  $m \cdot g^{-1}$  土壤,差异显著( $P<0.05$ ),说明植物生长放缓时,菌丝更能发挥养分吸收功能,与根系协同促进植物生长。不接菌处理菌丝密度随植物的生长不断增加,差异不显著( $P>0.05$ )。这可能是因为土著 AM 真菌伴随植物根系生长,菌丝长度只有不断增加,才能满足植物生长对养分的需求。接种 G.m 增强了根系被 AM 真菌感染程度的指标,促进了菌丝密度的增加,这与杜善周等<sup>[4]</sup>、岳辉等<sup>[5]</sup>的结果一致。

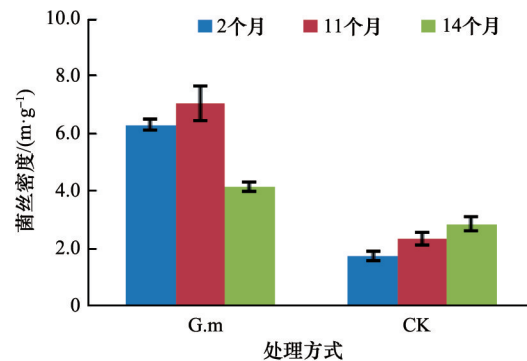


图 2 不同处理对菌丝密度影响

Fig. 2 Effect of different treatments on hyphal density

### 2.3 不同处理对土壤质量的影响

接种前到接种 14 个月间,随着植物的生长发育,接种处理、不接种处理根际土壤速效磷、速效钾、碱解氮、全氮含量总体表现显著降低趋势;同一监测时段,前者显著高于后者(接种后 11 个月碱解氮除外)( $P<0.05$ ),说明接种 G.m 有效提高了根际土壤氮、磷、钾养分有效性或总含量(表 2)。结合表 1、表 2 数据显示,接种处理紫穗槐株高、冠幅好于不接种处理植株,紫穗槐迅速生长,对养分需求大,土壤养分贫瘠,回落

到根际中的枯枝落叶在短时间内降解成可吸收的少,从而表现出氮、磷、钾养分含量总体降低。

表2 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Effect of different treatments on physical and chemical properties of soil

处理	时间/月	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH值	电导率/ (μS·cm <sup>-1</sup> )
G.m	2	7.56±0.56 <sup>a</sup>	47.13±2.22 <sup>a</sup>	28.80±0.47 <sup>a</sup>	5.45±0.16 <sup>b</sup>	0.517±0.002 <sup>a</sup>	8.23±0.02 <sup>a</sup>	148.14±5.74 <sup>a</sup>
	11	5.74±0.34 <sup>b</sup>	45.10±0.59 <sup>a</sup>	19.83±0.76 <sup>b</sup>	4.95±0.05 <sup>c</sup>	0.421±0.010 <sup>c</sup>	7.43±0.02 <sup>c</sup>	79.96±7.63 <sup>c</sup>
	14	3.98±0.20 <sup>c</sup>	32.66±3.64 <sup>b</sup>	16.68±0.07 <sup>c</sup>	3.13±0.08 <sup>d</sup>	0.184±0.005 <sup>c</sup>	6.77±0.04 <sup>c</sup>	38.18±2.97 <sup>d</sup>
CK	2	5.86±0.12 <sup>b</sup>	37.46±2.98 <sup>b</sup>	15.26±0.47 <sup>c</sup>	6.11±0.14 <sup>a</sup>	0.482±0.005 <sup>b</sup>	8.29±0.02 <sup>a</sup>	135.78±5.41 <sup>b</sup>
	11	3.94±0.27 <sup>c</sup>	36.57±0.35 <sup>b</sup>	20.30±0.63 <sup>b</sup>	5.34±0.05 <sup>b</sup>	0.337±0.006 <sup>d</sup>	7.55±0.08 <sup>b</sup>	79.30±2.20 <sup>c</sup>
	14	2.39±0.10 <sup>d</sup>	23.34±1.65 <sup>c</sup>	7.79±0.19 <sup>d</sup>	2.80±0.01 <sup>e</sup>	0.107±0.004 <sup>f</sup>	7.02±0.00 <sup>d</sup>	28.60±0.97 <sup>d</sup>

注:数据后的上标同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

随复垦时间的延长,根际土壤有机碳含量各处理均表现极显著下降趋势;同一采样时间,不接种处理的有机碳含量大于接种处理(接种后14个月相反),处理间差异显著( $P<0.05$ )。这可能是因为接种复垦11个月期间,根际土壤中有有机物质更多的转移到植物体内,或者是因为根际土壤微生物(如AM真菌G.m)细胞中的许多成分由碳元素构成,它们的运动和各项生命活动进行需要碳源提供能量。接种14个月,由于接种处理植物的快速生长,根系分泌更多的有机物或是部分根系死亡脱落,使有机物质含量表现出接种处理高于不接种处理。

土壤pH值是土壤重要的化学性质,由表2可见,种植紫穗槐能够降低根际土壤pH值,各处理在不同复垦时间均表现极显著差异( $P<0.01$ )。与不接种处理相比,接种处理根际土壤pH值各阶段下降幅度较大,总体上由8.33(接种前)下降到6.77(接种后14个月),降低了1.56个单位,而接种处理总体降低了1.01个单位;接种后2个月,两个处理pH值未表现出差异显著性( $P>0.05$ ),接种后11个月和接种后14个月,两个处理pH值则表现极显著差异( $P<0.01$ )。可以看出,随着复垦时间的增加,根际土壤pH值逐渐降低,接种G.m更能显著改善矿区土壤碱性环境。

土壤电导率是测定土壤水溶性盐的指标,水溶性盐也是土壤的一个重要属性,是判定土壤中盐类离子是否限制作物生长的因素。随着复垦时间的延长,根际土壤电导率极显著下降( $P<0.01$ );各处理在同一采样时间,接种处理的电导率高于不接种处理,差异不显著。这说明植物的生长对水溶性盐的需求不断增加,从而使电导率逐渐下降,接种G.m能够相对提高电导率,一定程度上能缓解盐类离子对植物生长的限制。

#### 2.4 不同处理对球囊霉素的影响

球囊霉素是土壤有机质的重要组成部分,对维持土壤有机碳平衡和土壤团聚体稳定性具有明显作用<sup>[15]</sup>,其中易提取球囊霉素(EEG)包含的是土壤中新鲜的球囊霉素,总提取球囊霉素(TG)反映了土壤中累积球囊霉素的水平<sup>[16,17]</sup>。

从表3可知,同一监测时间,EEG、TG、EEG/有机碳、TG/有机碳含量,接种处理显著高于不接种( $P<0.05$ )。EEG含量在接种后14个月含量最低,接种后2个月、11个月含量较高,不同处理差异极显著( $P<0.01$ )。这可能是因为植物个体小或是生长缓慢时期,EEG得以积累,而植物生长迅速时期,EEG释放供给植物养分吸收,从而导致含量下降。TG含量接种后11个月含量最高,不同处理差异极显著( $P<0.01$ )。

表3 不同处理对土壤球囊霉素的影响

Table 3 Effect of different treatments on soil glomalin

处理	时间/月	EEG/(mg·g <sup>-1</sup> )	TG/(mg·g <sup>-1</sup> )	EEG占有有机碳比例/%	TG占有有机碳比例/%
G.m	2	0.62±0.02 <sup>a</sup>	0.89±0.01 <sup>b</sup>	11.37±0.54 <sup>a</sup>	16.27±0.61 <sup>b</sup>
	11	0.62±0.01 <sup>a</sup>	1.50±0.02 <sup>a</sup>	12.56±0.31 <sup>a</sup>	30.30±0.58 <sup>a</sup>
	14	0.25±0.01 <sup>c</sup>	0.91±0.07 <sup>b</sup>	7.85±0.36 <sup>d</sup>	29.11±2.28 <sup>a</sup>
CK	2	0.58±0.00 <sup>b</sup>	0.64±0.02 <sup>d</sup>	9.39±0.18 <sup>c</sup>	10.52±0.49 <sup>c</sup>
	11	0.60±0.01 <sup>ab</sup>	0.77±0.02 <sup>c</sup>	11.16±0.31 <sup>b</sup>	14.39±0.37 <sup>b</sup>
	14	0.14±0.01 <sup>d</sup>	0.55±0.02 <sup>d</sup>	5.11±0.37 <sup>c</sup>	19.52±0.83 <sup>b</sup>

注:数据后的上标同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

本研究表明, EET、TG 含量在接种后 11 个月(2013 年 6 月)达到最高, 是因为研究区地处西北, 6 月植物刚返青, 昼夜温差大, 生长处于春季, 这与 He 等<sup>[18]</sup>认为的 EEG、TG 春季含量最高的结论一致。EEG/有机碳、TG/有机碳含量因复垦时间、接种与否而表现不同。接种处理两者含量分别为 7.85%~12.56%、16.27%~30.30%, 不接种处理两者含量分别为 5.11%~11.16%、10.52%~19.52%, 说明球囊霉素是有机碳的重要来源, 接种 AM 真菌可以提高根际土壤球囊霉素含量。

## 2.5 相关性分析

根际微生态的作用是一个复杂的过程。根际养分与植物生长相关分析表明(表 4), pH 值与株高、冠幅存在极显著负相关( $P < 0.01$ ), 说明过高的 pH 值对植物的生长有抑制作

用, 这与岳辉等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。株高、冠幅与全氮极显著负相关( $P < 0.01$ ), 冠幅与速效磷、速效钾显著负相关; 成活率与速效磷、速效钾、碱解氮含量含量极显著正相关, 与全氮显著正相关。说明植物的存活、生长离不开养分的供给, 土壤养分是植物生长发育限制因子。EEG 与株高、冠幅极显著负相关, TG 与成活率极显著正相关, 说明球囊霉素可以作为促进植物生长的有力指标。

菌根侵染率与株高、冠幅显著或极显著相关, 菌丝密度与成活率极显著正相关。菌丝密度是测定菌根侵染效率的重要指标<sup>[19]</sup>, 说明菌根侵染率与菌丝密度具有协同作用, 但在促进植物生长方面有所不同。

表 4 根际养分与植物生长相关性分析  
Table 4 Correlation analysis of root nutrient and plant growth

项目	株高	冠幅	成活率	pH 值	电导率	速效磷	速效钾
pH 值	-0.77**	-0.82**	0.11	1			
电导率	-0.64**	-0.71**	0.33	0.95**	1		
速效磷	-0.32	-0.43*	0.61**	0.74**	0.85**	1	
速效钾	-0.31	-0.40*	0.61**	0.53**	0.65**	0.77**	1
碱解氮	-0.21	-0.33	0.63**	0.53**	0.66**	0.78**	0.77**
全氮	-0.65**	-0.73**	0.39*	0.89**	0.93**	0.87**	0.77**
有机碳	0.51**	0.42*	0.72**	-0.06	0.12	0.47**	0.39*
侵染率	0.29	0.19	0.61**	-0.01	0.12	0.48**	0.56**
菌丝密度	-0.85**	-0.87**	0.15	0.88**	0.86**	0.68**	0.63**
EEG	-0.71**	-0.78**	0.30	0.75**	0.77**	0.72**	0.76**
TG	0.15	0.07	0.53**	-0.10	0.03	0.39*	0.62**
项目	碱解氮	全氮	有机碳	侵染率	菌丝密度	EEG	TG
全氮	0.73**	1					
有机碳	0.44*	0.17	1				
侵染率	0.56**	0.31	0.74**	1			
菌丝密度	0.58**	0.92**	-0.13	0.02	1		
EEG	0.74**	0.92**	0.07	0.28	0.92**	1	
TG	0.40*	0.32	0.57**	0.76**	0.14	0.42*	1

注:\*\*表示在 0.01 水平上相关性显著,\*表示在 0.05 水平上相关性显著。

土壤速效磷、速效钾、碱解氮、全氮、有机碳含量间呈显著或极显著正相关, 说明养分间存在协同作用。根际土壤养分指标与菌根侵染的关系表明, 速效磷、速效钾、碱解氮、有机碳含量与菌根侵染率极显著正相关( $P < 0.01$ ), 说明 AM 菌根能够活化土壤中难溶态的磷, 增加了磷的有效性, 促进植物对磷的吸收, 提高根际周围氮、钾的有效性, 改善可利用碳源的含量状况。速效磷、速效钾、碱解氮与菌丝密度极显

著正相关。菌根侵染率与菌丝密度极显著正相关, 相关系数达到 0.74, 表明侵染率越高, 菌丝生长量越大。

EEG 与 pH 值、速效磷、速效钾、碱解氮、全氮、有机碳极显著正相关, 与 TG 显著正相关; TG 与菌根侵染率、菌丝密度、速效钾极显著正相关, 与速效磷、碱解氮显著正相关。说明土壤酸碱性、土壤质量、菌根真菌都能显著影响球囊霉素平衡状态。

### 3 讨论

植物生长发育和土壤质量是评价矿区生态修复好坏的重要内容之一,干旱半干旱地区水分、养分不足常导致植物成活率不高,长势差,“小老树”现象普遍。研究区地处毛乌素沙地南缘,良好的植被覆盖是防风固沙的重要手段。符亚儒等<sup>[20]</sup>研究表明,在干旱半干旱地区,防风固沙效果好坏与植物的株高、冠幅显著相关。本试验通过接种AM真菌G.m显著提高了紫穗槐成活率7.2%~9.7%,极显著增加紫穗槐株高34%~62%、增加冠幅39%~65%,说明在采煤沉陷区接种AM真菌G.m,能够促进紫穗槐的生长发育,解决了紫穗槐成活率低的问题,紫穗槐的良好长势对增加复垦区植被盖度、减少水土流失,增加生物多样性,防治风沙危害,改善生态环境意义重大。

菌根侵染率反映了菌根真菌与宿主植物的亲合程度,菌丝密度反映了菌根在促进植物生长、营养吸收和抗逆性等方面的能力<sup>[14]</sup>。AM真菌是自然界中最常见的、广泛分布的一种土壤微生物,陆地90%以上的有花植物都能够与它形成菌根共生体<sup>[8]</sup>。矿区生态复垦土壤不能像盆栽试验进行土壤灭菌,本试验研究表明,不接种G.m,紫穗槐侵染率大于50%,说明穗槐是菌根侵染植物,而且土壤中存在大量、侵染能力强的土著菌根真菌。菌根依靠菌丝在土壤中的扩展和延伸,扩大植物根系的接触面积,能够分泌各种酶类和生长调节物质,促进根系生长和根际微生态的改变,可增强植物对N、P、K等元素和水分的吸收利用,促进植物的生长<sup>[8,19,21]</sup>,减轻干旱胁迫<sup>[21]</sup>。相关分析表明,速效磷、速效钾、碱解氮含量与菌根侵染率、菌丝密度显著或极显著正相关,接种处理植株株高冠幅显著高于不接种处理(表2),同一监测时间,接种处理根际土壤速效磷、碱解氮、速效钾含量高于不接种处理(表3),植物生长越好,需要的养分越多,所以接种G.m能够提高根际土壤氮、磷、钾有效性。植物通过菌根侵染获得营养促进植物生长<sup>[22]</sup>,通过本实验发现,速效磷、速效钾、碱解氮、有机碳含量与菌根侵染率显著相关,与Marschner和Dell的结论一致。

根际作为根系、土壤界面的一个微环境,与微生物紧密结合促进养分循环。大量研究表明,植物根系和根际微生物的生理活性对土壤性状、植物养分吸收、生长发育和健康状况都具有明显的影响<sup>[23]</sup>。有机碳、氮、磷、钾含量、pH值是影响土壤质量、反映土壤养分供给的重要指标。接种G.m能有效降低复垦区土壤pH值,改善碱性环境对植物生长的危害,提高矿区根际土壤全氮、速效磷、速效钾等养分含量。土壤有机质和氮素的消长,主要决定于生物积累和分解作用的相对强弱、气候、植被、耕作制度诸因素,特别是水热条件,对土壤有机质和氮素含量有显著的影响<sup>[11]</sup>。研究区植物种类稀少、植被覆盖度低,每年回落或降解的有机碳源少,短时间复垦试验研究并未表现出增加趋势。应该在更长时间内探讨菌根的长效作用情况,本课题组在野外设置实验基地,正是为了长期跟踪菌根技术在矿区生态复垦中的应用效果。

### 4 结论

与不接种对照相比,复垦2~14个月期间,接种AM真菌能够显著促进采煤沉陷区紫穗槐的生长,显著改善根际土壤有效养分含量状况,具体表现如下:

1) AM能极显著提高紫穗槐成活率7.2%~9.7%,极显著促进紫穗槐株高增加34%~62%、冠幅增加39%~65%。

2) AM能够显著降低土壤pH值,改善植物生长碱性环境危害,提高土壤速效磷、速效钾、碱解氮、全氮、有机碳含量,改善根际土壤质量。根际土壤有机碳、全氮、速效磷、速效钾、碱解氮含量受菌根侵染率、菌丝密度的显著影响。接种AM极显著提高了紫穗槐的菌根侵染率16%~21%,极显著提高了菌丝密度50%~70%。

3) 球囊霉素相关土壤蛋白是土壤有机质的重要组成部分,可以灵敏反映土壤质量变化。由于本试验是在野外对干旱半干旱气候条件下采煤沉陷区先锋植物紫穗槐进行接种菌根监测,有关微生物复垦的土壤改良效果研究时间较短,还需要进一步观测研究,是下一步的工作重点。

#### 参考文献(References)

- [1] 李建华, 邵春花, 卢朝东, 等. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤白三叶草生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 280-284.  
Li Jianhua, Gao Chunhua, Lu Chaodong, et al. Effect of combined application of microbial inoculum and fertilizer on white clover growth in reclaimed mine soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 280-284.
- [2] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1): 8-12.  
Hu Zhenqi, Wei Zhongyi, Qin Ping. Concept and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. Soils, 2005, 37(1): 8-12.
- [3] 崔树军, 谷立坤, 廉有轩, 等. 煤矿废弃地的微生物修复技术[J]. 金属矿山, 2010(4): 176-179.  
Cui Shujun, Gu Likun, Lian Youxuan, et al. Research of microbiology technology in ecological remediation of the abandoned coal mining land [J]. Metal Mine, 2010(4): 176-179.
- [4] 张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤质量研究进展与方向[J]. 土壤, 1999, 31(1): 2-8.  
Zhang Taolin, Pan Jianjun, Zhao Qiguo. Research progress and direction of soil quality[J]. Soils, 1999, 31(1): 2-8.
- [5] 岳辉, 毕银丽, Y. Zhakypbek, 等. 接种菌根对神东矿区采煤沉陷地的生态修复效应[J]. 科技导报, 2012, 30(36): 56-60.  
Yue Hui, Bi Yinli, Zhakypbek Y, et al. Ecological reclamation effect of arbuscular mycorrhizal inoculum on subsided land in the area of shendong coal mine[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(36): 56-60.
- [6] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. London: Academic Press, 1997.
- [7] Juge C, Prévost D, Bertrand A, et al. Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizae[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 61(10): 147-157.
- [8] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇禄. 菌根研究及其应用[M]. 北京: 中国林业出版

- 社, 1997.
- Gong Mingqin, Chen Yinglong, Zhong Chonglu. Applying research of mycorrhiza[M]. Beijing: China Forestry Press, 1997.
- [9] Vergeer P, Berg L J L, Baar J, et al. The effect of turf cutting on plant and arbuscular mycorrhizal spore recolonisation: Implications for heathland restoration[J]. Biological Conservation, 2006, 129(2): 226-235.
- [10] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.  
Bao Shidan. Agricultural chemical soil analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [12] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus Fasciculatum*[J]. New Phytologist, 1984, 97(3): 437-446.
- [13] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-160.
- [14] 杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等. 丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 113-116.  
Du Shanzhou, Bi Yinli, Wu Wangyan, et al. Ecological effects of arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 113-116.
- [15] 杜介方, 张彬, 解宏图, 等. 不同施肥处理对球囊霉素土壤蛋白含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 573-577.  
Du Jiefang, Zhang Bin, Xie Hongtu, et al. The effect of fertilization treatments on the concentration of GRSP[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 573-577.
- [16] Nichols K A, Wright S F. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(2): 215-220.
- [17] Halvorson J J, Gonzalez J M. Tannic acid reduces recovery of water-soluble carbon and nitrogen from soil and affects the composition of Bradford-reactive soil protein[J]. Soil Biology and biochemistry, 2006, 40(1): 186-197.
- [18] He X, Li Y, Zhao L. Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* Krasch. in Mu Us sandland, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(8): 1313-1319.
- [19] Graham J H, Linderman R G, Menge J A. Development of external hyphae by different isolates of mycorrhizal *Glomus* spp. in relation to root colonization and growth of troyer citrange[J]. New Phytologist, 1982, 91(2): 183-189.
- [20] 符亚儒, 高保山, 封斌, 等. 陕北榆林风沙区防风固沙林体系结构配置与效益研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 18-23.  
Fu Yaru, Gao Baoshan, Feng Bin, et al. Structure configuration and protecting benefit of Yulin sandbreak forest system in northern Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2): 18-23.
- [21] Heidari M, Karami V. Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2014, 13(1): 9-13.
- [22] Marschner H, Dell B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis[J]. Plant and Soil, 1994, 159(1): 89-102.
- [23] 高子勤, 张淑香. 连作障碍与根际微生态研究 I. 根系分泌物及其生态效应[J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 549-554.  
Gao Ziqin, Zhang Shuxiang. Continuous cropping obstacle and rizospheric microecology I. Root exudates and their ecological effects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(5): 549-554.

(编辑 田恬)

·学术动态·



## 中国科协年会科技政策论坛将于2014年5月23日在昆明召开

为更好实施创新驱动发展战略,推动科技政策在创新型国家建设中发挥更重要作用,由中国科协决策咨询专门委员会主办,中国科协调研宣传部、中国科学学与科技政策研究会承办的中国科协年会科技政策论坛将于2014年5月23日在昆明召开。

本次论坛以“市场·政府·创新”为主题,邀请国家有关部委及相关单位、研究机构的领导与专家就科技人员国际流动、科技资源配置、科技人员薪酬制度等主题开展研讨。

有意参会者请在2014年4月25日前登记报名。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/15487066.html>。