

# 接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响

胡晶晶, 毕银丽, 龚云丽, 宋子恒, 张健, 裘浪

(中国矿业大学(北京), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 煤炭井工开采往往造成地表塌陷, 导致了土壤养分贫瘠和水分缺乏, 土壤沙化和水土流失, 从而限制了当地矿区植被生长, 而从枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AM 真菌)对植被生长有促进作用。以文冠果为宿主植物, 采用野外原位监测和室内分析方法, 研究了未接种和接种丛枝菌根真菌对采煤沉陷区复垦植物文冠果生长和土壤特性的影响。结果表明: 与未接种 AM 真菌处理相比, 接种 AM 真菌显著提高了文冠果根系菌根侵染率和土壤根外菌丝密度, 7 月接种 AM 真菌文冠果的株高、冠幅和地径提高了 31.89%, 23.07%, 9.89%。同时, 9 月接种 AM 真菌处理的根际土壤全氮、碱解氮和有机碳含量分别比对照组增加 0.29 g/kg, 13.0 mg/kg 和 1.4 g/kg, 接种 AM 真菌显著提高了根际土壤的含水率、总球囊霉素和易提取球囊霉素, 而速效磷和速效钾的含量显著降低。相关分析结果表明, 菌根侵染率、土壤根外菌丝密度与根际土壤理化性质之间存在协同反馈效应。因此, 接种 AM 真菌促进了采煤沉陷区复垦植被文冠果的生长和土壤的改良, 这对矿区水土保持、维持生态系统稳定性和持续性具有重要意义。

**关键词:** 丛枝菌根真菌; 文冠果; 采煤沉陷区; 土壤特性

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0341-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.053

## Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth of *Xanthoceras sorbifolia* and Soil Properties in Coal Mining Subsidence Area

HU Jingjing, BI Yinli, GONG Yunli, SONG Ziheng, ZHANG Jian, QIU Lang

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083)

**Abstract:** Coal mining often causes surface subsidence, resulting in poor soil nutrient and water deficiency, soil desertification and soil erosion, which limits the growth of vegetation in the mining area. However, the arbuscular mycorrhiza fungi (AM fungi) can promote the growth of vegetation. We took *Xanthoceras sorbifolia* as host plant and studied the effect of inoculated and non-inoculated AM fungi on plant growth and soil properties in the coal mining subsidence area by the method of in-situ field monitoring and lab analysis. The results showed that compared with the treatment of non-inoculated AM fungi, inoculation of AM fungi significantly increased the mycorrhizal infection rate and the hyphal density of outside the roots. The plant height, crown height, and ground diameter of *X. sorbifolia* inoculation with AM fungi in July increased by 31.89%, 23.07% and 9.89%, respectively. Compared with the treatment of non-inoculated AM fungi, the contents of total nitrogen, available nitrogen and soil organic carbon in rhizosphere soil treated with AM fungi in September increased by 0.29 g/kg, 13.0 mg/kg and 1.4 g/kg, respectively. Inoculation with AM fungi significantly increased the water content of the rhizosphere soil, total glomalin and easily extracted glomalin, while the content of available phosphorus and available potassium decreased significantly. Correlation analysis showed that there was a synergistic feedback effect between mycorrhizal infection rate, the hyphal density of outside roots and rhizosphere soil physical and chemical properties. Thus, the inoculation of AM fungi promoted the growth of *X. sorbifolia* and soil improvement in the coal mining subsidence area, which is of great significance to soil and water conservation, to maintain the stability and sustainability of the ecosystem in the mining area.

**Keywords:** arbuscular mycorrhizal fungi; *Xanthoceras sorbifolia*; coal mining subsidence area; soil properties

煤炭是我国最主要的能源,在我国能源消费结构中占 62.0%<sup>[1]</sup>。随着我国经济的快速增长,煤炭资源的开发对我国经济建设和社会发展起到了重要的支撑作用,但是煤炭资源开发也引发了一系列的生态环境问题。大柳塔煤炭井工开采造成地表塌陷,其对植被和土壤结构破坏较大,使得土壤肥力降低、土壤沙化及水土流失,生态退化更为严重,这不利于沉陷区土壤和生态系统可持续发展<sup>[2]</sup>,制约着矿区植被生长和恢复。采用工程复垦很难使复垦植物适应养分贫瘠水分缺乏的环境,因此,能否在采煤沉陷地改良土壤和提高植被恢复速度,并在水土保持上高效利用土地是目前急需解决的问题。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AM 真菌)是土壤重要的微生物之一,能与 80% 以上的陆生植物形成互惠共生关系,在促进植物养分吸收、修复根系功能、土壤结构改良、复垦土壤的水肥供应、生态修复等方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。近年来,微生物复垦技术作为人工复垦重要技术之一,已成为矿区生态恢复的研究热点。该技术能够熟化生土、改良土壤、加快生态复垦速度<sup>[3]</sup>。已有研究<sup>[4]</sup>表明,人工接种 AM 真菌促进采煤沉陷区柠条根系和地上部分的生长,提高植物的抗逆性和土壤的改良。人工接种丛枝菌根真菌能促进宿主植物对土壤中营养元素碳、氮、磷、钾等<sup>[5]</sup>的吸收,提高宿主植物对干旱和高温的抗性。接种丛枝菌根真菌能够改善扰动矿区土壤的微生物环境<sup>[6]</sup>,AM 真菌分泌的球囊霉素,可提高土壤团聚体的稳定性、保水性及改善土壤理化性质<sup>[7]</sup>。

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)属于无患子科文冠果属,具有较强的抗耐盐碱能力、抗寒旱能力、抗病性,其根系发达,保水性强,在黄土丘陵、沟谷和沙地都可正常生长,文冠果种子具有较高的含油率,是我国特有的油料经济树种<sup>[8]</sup>,并且是水土保持的先锋物种,所以选择文冠果作为干旱半干旱地区退化土壤的复垦植被。大柳塔矿区地处干旱半干旱地区,土壤养分贫瘠和水分缺乏是当地植被生长最大的限制因子之一,目前接种 AM 真菌对矿区复垦植物文冠果的生长和土壤改良影响的研究相对较少。因此,本文以文冠果为复垦植物,测定 AM 真菌菌根效应指标、文冠果生长和根际土壤理化指标,为了研究接种 AM 真菌对采煤沉陷区复垦 3 年文冠果生长及土壤理化性状的影响,旨在为开展矿山生态恢复并在水土保持上高效利用土地提供理论与技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验区位于陕西省神木县大柳塔镇东山煤矿开采

沉陷区国家水土保持示范园区(109°13′—110°67′ E, 38°50′—39°47′ N),处于黄土高原沟壑区向毛乌素沙漠的过渡地带。该区域属于典型的干旱半干旱高原大陆性气候,盛行偏西和西北大风,全年干旱少雨多风沙,年均大风日 14 d,年均降水量 441 mm,主要集中在 7—9 月,年均蒸发量 1 337 mm,年均气温 8.9 °C,年均日照时间 2 875.9 h。当地先锋植被主要以 1 年生的狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等为主。土壤类型以风沙土为主,0—20 cm 表层土壤基本理化性质为:有机碳 7.36 g/kg,碱解氮 32.1 mg/kg,全氮 0.60 g/kg,速效磷 8.16 mg/kg,速效钾 66.1 mg/kg,电导率 164 μS/cm,pH 8.35。

### 1.2 试验设计

该供试的文冠果植物种植于 2014 年大柳塔东山煤矿开采沉陷沙地。试验设计 2 个处理:接种 AM 真菌(Fm)和不接种 AM 真菌(CK),每个处理试验样地大小为 200 m×200 m,苗木种植间距为 1.67 m×3 m。以树龄 3 年的文冠果经济树种为供试苗木,上述苗木具有耐干旱贫瘠特性。供试 AM 真菌菌种为摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*, Fm),由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室通过盆栽沙土扩繁培养,生长 3 个月用受真菌侵染的根段和含有孢子(30 个/g)菌丝的沙土作为摩西管柄囊霉菌剂。

土壤采样时间为 2017 年 7 月中旬和 9 月中旬,在每个处理样地随机选取 15 个 10 m×10 m 的样方点并做标记,按照“S”形布点采样法和多点混合取样法,挖开植物根系周围 0—20 cm 土层,轻轻抖落收集根际土壤,同时快速剪下部分细根,用于测定根系菌根侵染率;收集的土样均匀混合后装入自封袋带回实验室内风干,仔细除去其中可见的植物残体及土壤动物,过 2 mm 土壤筛后供土壤的理化分析测试。最后填回表土,防止水分蒸发对植物造成损伤。

### 1.3 测试项目与分析方法

用钢卷尺直接测量植株的株高和冠幅;用游标卡尺测量植株地径。菌根侵染率测定采用 Phillips 和 Hayman 的 KOH 脱色—曲利苯蓝染色法,玻片镜检测定侵染根段数<sup>[9]</sup>,计算公式为:菌根侵染率(%)=菌根段数/被检根段数×100%。土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,有机质采用重铬酸钾外加热法测定,速效磷采用钼锑抗比色法测定,速效钾采用 pH 7.0 醋酸铵浸提—火焰光度法测定,土壤含水率采用烘干法测定,pH 采用电位法(水土比 2.5:1)测定,电导率(EC)为水土比 5:1 浸提—电导法测定<sup>[10]</sup>。土壤根外菌丝密度采用真空泵微孔滤膜抽滤—

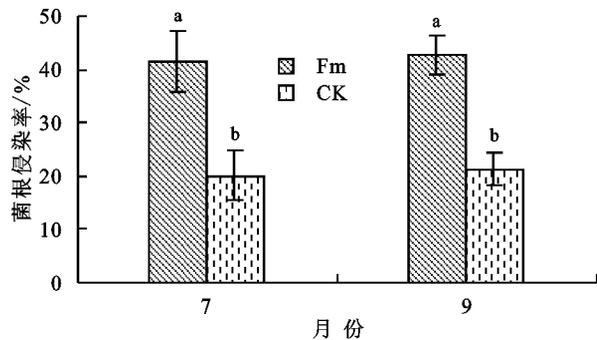
网格交叉法测定<sup>[11]</sup>。土壤球囊霉素含量的测定按照 Wright 等<sup>[12]</sup>和 Janos 等<sup>[13]</sup>的方法加以改进。

采用 Excel 2013 进行均值和标准差计算并作图;利用统计分析软件 SPSS 17.0 进行单因素方差分析(LSD 检验法,显著性差异水平为 0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种 AM 真菌对菌根侵染率和土壤根外菌丝密度的影响

根系菌根侵染率反映了丛枝菌根真菌与植物的亲密结合程度。由图 1 可知,文冠果根系菌根侵染率接菌组显著高于对照组,分别在 7 月和 9 月提高了 51.7%和 50.0%( $P<0.05$ )。同时,与 CK 处理相比,接种 AM 真菌显著提高了土壤根外菌丝密度( $P<0.05$ ),其中接菌组 7 月和 9 月的菌丝密度分别为 4.76, 4.81 m/g,为相应对照组的 3~4 倍(图 2),接种 AM 真菌增加了土壤中根外菌丝长度。表明 AM 真菌能够与文冠果建立良好的互惠共生关系,并能在土壤中形成较密的菌丝网络,扩大文冠果根系的生存空间,增强了运输水分养分的能力,从而增强文冠果对土壤中营养元素的吸收利用。



注:不同小写字母表示在 5%水平上有显著差异( $P<0.05$ )。下同。

图 1 接种 AM 真菌对文冠果根系侵染率的影响

### 2.2 接种 AM 真菌对文冠果生长特性的影响

接种 AM 真菌对文冠果生长特性具有明显影响(表 1)。7 月接菌组的文冠果株高、冠幅和地径均显著大于对照组,分别提高了 31.89%, 23.07%, 9.89%( $P<0.05$ )。9 月,文冠果株高、冠幅和地径也表现为接菌组>对照组,并且达到显著差异( $P<0.05$ )。这说明,接种 AM 真菌对复垦植物文冠果的株高、冠

幅和地径等生长特性具有促进作用,提高了文冠果生长速度。

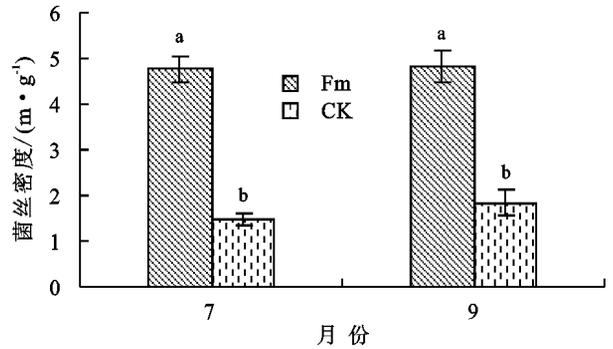


图 2 接种 AM 真菌对土壤根外菌丝密度的影响

表 1 AM 真菌对文冠果生长的影响

监测时间	处理	株高/cm	冠幅/cm	地径/cm
7 月	Fm	62.62±0.59b	24.01±0.16b	0.91±0.06a
	CK	42.65±0.86d	18.47±0.46d	0.82±0.01c
9 月	Fm	66.95±0.46a	25.30±0.36a	0.91±0.01a
	CK	54.78±1.76c	21.05±0.86c	0.83±0.01b

注:表中数值为平均值±标准误差;不同小写字母代表在 5%水平上有显著差异( $P<0.05$ )。下同。

### 2.3 接种 AM 真菌对文冠果根际土壤理化性质的影响

由表 2 可知,接种 AM 真菌能显著改善土壤的肥力状况。接种 AM 真菌的根际土壤全氮、碱解氮和有机碳均显著高于对照组,7 月文冠果根际土壤的全氮、碱解氮和有机碳的含量表现为接菌组>对照组,分别提高了 44.8%, 20.4%, 38.7%;9 月接菌组的全氮、碱解氮和有机碳含量分别比对照组显著增加了 0.29 g/kg, 13.0 mg/kg, 1.4 g/kg( $P<0.05$ )。与 CK 处理相比,7 月和 9 月接种 AM 真菌均显著提高了土壤含水率。说明接种 AM 真菌对因采煤沉陷造成的土壤养分和水分流失有一定的缓解作用。

然而,7 月和 9 月文冠果根际土壤的速效磷和速效钾表现为接菌组低于对照组,分别显著降低 37.2%, 17.7%和 21.7%, 25.9%,这可能是由于 AM 真菌增强了文冠果对土壤中磷钾的吸收。接菌组的 pH 显著低于对照组,表明 AM 真菌降低土壤碱度,活化土壤中的盐基离子。接种 AM 真菌对文冠果根际土壤的电导率无显著影响,但成上升趋势。

表 2 接种 AM 真菌对文冠果根际土壤理化性质的影响

监测时间	处理	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤 含水率/%	pH	EC/ (μS·cm <sup>-1</sup> )
7 月	Fm	0.67±0.06a	64.6±1.73a	1.40±0.53b	34.0±1.43b	7.52±0.43a	2.78±0.49a	7.16±0.03c	21.7±1.93a
	CK	0.37±0.04b	51.4±0.23b	2.23±0.43ab	43.4±3.13a	4.61±0.23c	1.69±0.81b	7.50±0.23b	19.8±1.63a
9 月	Fm	0.68±0.03a	64.2±1.33a	1.91±0.73ab	35.1±0.93b	7.99±0.63a	3.08±0.85a	7.67±0.13ab	20.7±1.43a
	CK	0.39±0.05b	51.2±0.23b	2.32±0.93a	47.4±1.33a	6.59±0.43b	1.80±0.32b	7.92±0.23a	19.5±2.73a

## 2.4 接种 AM 真菌对文冠果根际土壤球囊霉素的影响

球囊霉素是 AM 真菌菌丝分泌产生的一类含金属离子的糖蛋白,在自然状态下极稳定,并随菌丝壁和孢子的降解释放到土壤中<sup>[12]</sup>。由表 3 可知,7 月和 9 月文冠果根际土壤的总球囊霉素含量和易提取球囊霉素含量均表现为接菌组显著大于对照组,其中 7 月和 9 月接菌组的总球囊霉素含量相比对照组分别增加了 46.8% 和 45.4%;与 CK 处理相比,7 月和 9 月接种 AM 真菌处理显著提高了文冠果根际土壤的易提取球囊霉素含量,分别比对照组增加了 0.17,0.16 mg/g。此外,接种 AM 真菌的文冠果根际土壤总球囊霉素与有机碳的比值和易提取球囊霉素与有机碳的比值均显著高于对照组。可以看出,接种 AM 真菌增加了土壤中球囊霉素的含量,文冠果的对照处理根际土壤也含有总球囊霉素与易提取球囊霉素,这主要是因为采煤沉陷区存在着土著丛枝菌根。这说明,球囊霉素是土壤有机碳的一个重要来源,接种 AM 真菌对矿区退化土壤碳积累具有明显改良作用。

## 2.5 AM 真菌特性与矿区土壤理化指标之间相关性分析

相关性结果表明(表 4),菌根侵染率与菌丝密度、全氮、碱解氮、有机碳、含水率和球囊霉素呈极显

著正相关( $P < 0.01$ ),菌丝密度与全氮、碱解氮、有机碳、含水率和球囊霉素呈极显著正相关。全氮与碱解氮、有机碳、含水率和球囊霉素呈极显著正相关,与速效钾呈显著负相关( $P < 0.05$ )。碱解氮与有机碳、含水率、总球囊霉素和易提取球囊霉素呈极显著正相关,与速效磷、速效钾呈显著负相关。有机碳与含水率、pH、总球囊霉素和易提取球囊霉素呈极显著正相关性;总球囊霉素与易提取球囊霉素呈极显著正相关性。球囊霉素与土壤含水率呈极显著正相关,菌丝分泌的球囊霉素随着孢子的形成和脱落进入土壤,促进了土壤的保水性。由此可知,菌根侵染率、根外菌丝密度与土壤理化性状之间存在协同反馈效应,AM 真菌在土壤养分转化过程中起着至关重要的作用。

表 3 接种 AM 真菌对文冠果根际土壤球囊霉素的影响

监测时间	处理	总球囊霉素/	易提取球囊霉素/	总球囊霉素与有机碳	易提取球囊霉素与有机碳
		(mg · g <sup>-1</sup> )	(mg · g <sup>-1</sup> )	比值/%	比值/%
7 月	Fm	1.71±0.03a	0.36±0.03a	22.89±0.02a	4.89±0.24a
	CK	0.91±0.06b	0.19±0.01b	19.71±0.01b	4.05±0.35b
9 月	Fm	1.74±0.07a	0.37±0.05a	21.81±0.01ab	4.69±0.75a
	CK	0.95±0.14b	0.21±0.01b	14.42±0.02c	3.22±0.13b

表 4 AM 真菌特性与矿区土壤理化指标之间相关性分析

指标	侵染率	菌丝密度	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾	有机碳	土壤含水率	pH	EC	总球囊霉素	易提取球囊霉素
侵染率	1											
菌丝密度	0.952**	1										
全氮	0.879**	0.931**	1									
碱解氮	0.771**	0.834**	0.789**	1								
速效磷	-0.320	-0.416	-0.348	-0.529*	1							
速效钾	-0.687**	-0.662**	-0.651**	-0.565**	0.445*	1						
有机碳	0.824**	0.843**	0.749**	0.688**	-0.189	-0.390	1					
土壤含水率	0.646**	0.692**	0.720**	0.565**	-0.103	-0.498*	0.614**	1				
pH	0.484*	0.475*	0.396	0.448*	-0.201	-0.322	0.719**	0.411	1			
EC	0.209	0.235	0.248	0.145	-0.205	-0.154	0.100	0.141	-0.053	1		
总球囊霉素	0.928**	0.958**	0.937**	0.891**	-0.358	-0.593**	0.815**	0.695**	0.449*	0.257	1	
易提取球囊霉素	0.863**	0.915**	0.900**	0.872**	-0.437	-0.538*	0.778**	0.613**	0.461*	0.193	0.943**	1

注: \*\* 表示  $P < 0.01$ ; \* 表示  $P < 0.05$ 。

## 3 讨论

大柳塔煤炭开采往往引发局部地表塌陷,从而加剧了水土流失,破坏了当地的生态环境,通过一定技术手段改善矿区植物的生长状况则变得非常重要。微生物复垦技术在矿区植被恢复和土壤改良中具有重要的作用。菌根侵染率反映了菌根真菌侵染宿主植物根系菌根的程度,本研究发现接种 AM 真菌能显著提高文冠果

根系菌根侵染率和土壤根外菌丝密度,说明文冠果能与 AM 真菌亲密结合,在土壤中形成较大的菌丝网络,这有利于增加文冠果对养分和水分的吸收面积<sup>[14]</sup>。接种 AM 真菌能促进文冠果地上部分株高、冠幅和地径的生长,这表明接种 AM 真菌能对文冠果生长发挥菌根效应,这与孙金华等<sup>[4]</sup>研究西部黄土区采煤沉陷地接种 AM 真菌对柠条株高、冠幅和地径生长的促进效果一致。由此可见,AM 真菌能促进矿区复垦

植物的生长,对于旱半干旱区防风固沙、提高植被覆盖度、减少水土流失等具有重大意义。

碳、氮等营养元素是表征土壤肥力的重要元素,AM 真菌的菌丝增加了文冠果根系与土壤的接触面积,从而提高了氮浓度,并吸收利用土壤中的无机氮和简单的氨基酸,加速矿化土壤中的有机氮,增加氮有效性<sup>[15]</sup>。复垦植物凋落物和根系分泌物为土壤提供碳素,因此接种 AM 真菌能显著提高土壤中的全氮、碱解氮和有机碳。AM 真菌菌丝延伸到远离根系的范围,活化了难溶性磷钾,扩大了磷钾的吸收,导致接种处理的根际土壤磷和钾含量降低<sup>[16-17]</sup>。接种 AM 真菌的根际土壤 pH 显著低于未接种,表明 AM 真菌降低土壤碱度,土壤中的盐基离子被活化,增强复垦植物文冠果对矿质元素的吸收利用能力。本试验同样发现菌根侵染率和土壤根外菌丝密度与全氮、碱解氮、有机碳和含水率等土壤因素呈极显著正相关,与速效钾呈极显著负相关。AM 真菌与植物根系形成共生关系后,通过 AM 真菌根外菌丝来吸收土壤中的碳、氮、磷、钾等营养元素并转运到宿主植物体内,改善植物营养状况,促进植物生长。

AM 真菌分泌的球囊霉素,主要成分是蛋白质和碳水化合物,是土壤有机碳库重要的组成之一<sup>[12]</sup>。本研究中接种 AM 真菌显著提高了土壤中球囊霉素和有机碳的含量,球囊霉素蛋白从菌丝表面脱落转变为土壤碳素,被土壤动物和植物吸收,提高土壤固碳能力<sup>[18]</sup>。耕地、草地和林地球囊霉素占土壤有机碳的比例为 12%~22%<sup>[19-20]</sup>,而本研究中,总球囊霉素在有机碳中的占比为 14%~23%,明显高于草地,说明球囊霉素是采煤沉陷区有机碳的重要来源和组成部分。接种 AM 真菌增加了土壤球囊霉素含量,同时提高了球囊霉素在有机碳中的占比,更突显了 AM 真菌在采煤沉陷区对土壤有机碳含量有着重要的贡献。接种 AM 真菌提高了土壤的含水率和球囊霉素,两者呈极显著正相关,说明 AM 真菌分泌的球囊霉素随着孢子的形成、脱落和降解,其亲水性加强了土壤团聚体的稳定性,进而提高了土壤的透气性、水分渗透能力和保水性<sup>[17]</sup>。因此,接种 AM 真菌显著改善了土壤的养分和水分含量,这能够缓解煤炭开采造成的土壤养分和水分流失问题,同时也是改良矿区土壤生态脆弱的有效途径。

## 4 结论

(1)丛枝菌根真菌与文冠果形成良好的互利共生关系,有利于促进植物生长。与 CK 处理相比,接种 AM 真菌处理的文冠果株高、冠幅和地径提高了

31.89%,23.07%,9.89%。

(2)接种 AM 真菌扩大了磷钾元素的吸收,活化了难溶性磷和钾,增加了土壤中全氮、碱解氮和有机碳含量,提高了土壤的含水率,同时降低土壤碱度。土壤肥力的提高和保水性的增强,这对养分贫瘠水分缺乏的矿区植被恢复、水土保持和生态重建具有重要意义。

(3)接种 AM 真菌显著增加了土壤中球囊霉素含量,总球囊霉素和易提取球囊霉素增加 40%~50%,同时提高了球囊霉素与有机碳比值,这对土壤改良具有很好的修复效应。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 2017 年中国统计年鉴[EB/OL]. (2017-10-13)[2017-12-13]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>.
- [2] 毕银丽. 丛枝菌根真菌在煤矿区沉陷地生态修复应用研究进展[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 800-806.
- [3] 何新华,段英华,陈应龙,等. 中国菌根研究 60 年:过去,现在和将来[J]. 中国科学:生命科学, 2012, 42(6): 431-454.
- [4] 孙金华,毕银丽,王建文,等. 接种 AM 菌对西部黄土区采煤沉陷地柠条生长和土壤的修复效应[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2300-2306.
- [5] Lendenmann M, Thonar C, Barnard RL, et al. Symbiont identity matters: Carbon and phosphorus fluxes between *Medicago truncatula* and different arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Mycorrhiza*, 2011, 21(8): 689-702.
- [6] 王瑾,毕银丽,张延旭,等. 接种丛枝菌根对矿区扰动土壤微生物群落及酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(8): 1417-1423.
- [7] Smith S E, Facelli E, Pope S, et al. Plant performance in stressful environments: Interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas [J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 3-20.
- [8] 谢志玉,张文辉,刘新成. 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 948-954.
- [9] 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): 158-161.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:56-83.
- [11] Jakobsen I, Abbott L K, Robson A D. External hyphae of vesicular - arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. [J]. *New Phytologist*, 2010, 120(4): 509-516.

- 高光谱测试稳定性影响探讨[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 287-291.
- [21] 王国华, 张虎, 魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7): 67-71.
- [22] 汪洪涛. 基于近红外光谱技术预测森林土壤有机碳含量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [23] 杨爱霞, 丁建丽. 新疆艾比湖湿地土壤有机碳含量的光谱测定方法对比[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 162-168.
- [24] 刘翥, 杨玉盛, 朱锦懋, 等. 中亚热带 2 种经济林土壤可溶性有机质数量与光谱学特征比较[J]. 水土保持学报, 2014, 28(05): 170-175.
- [25] 郅晨龙, 卞正富, 杨德军, 等. 鄂尔多斯煤田高强度井工煤矿开采对土壤物理性质的扰动[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1448-1456.
- (上接第 340 页)
- [21] 刘键, 张志明, 马筠. 纳米技术与农业低碳经济 1. 纳米碳增效肥应用研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [22] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1429-1435.
- [23] 武美燕, 蒿若超, 田小海, 等. 添加纳米碳缓释肥料对超级杂交稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2010, 25(4): 86-90.
- [24] 肖元松, 彭福田, 房龙, 等. 树盘施肥区域大小对<sup>15</sup>N 吸收利用及桃幼树生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 957-964.
- [25] Grierson P F, Adams M A. Plant species affect acid phosphatase, ergo sterol and microbial P in a Jarrah (*Eucalyptus marginata* Donn ex Sm) forest in south-western Australia [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1817-1828.
- [26] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料的特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 779-785.
- [27] Serag M F, Kaji N, Tokeshi M, et al. The plant cell uses carbon nanotubes to build tracheary elements [J]. *Integrative Biology*, 2012, 4(2): 127-131.
- [28] 刘安勋, 廖宗文. 纳米材料对水团簇的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15780-15781.
- [29] Yuan Z D, Zhang Z, Wang X, et al. Novel impacts of functionalized multi-walled carbon nanotubes in plants: Promotion of nodulation and nitrogenase activity in the rhizobium-legume system [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(28): 9921-9937.
- [30] 乔俊, 赵建国, 解谦, 等. 纳米炭材料对作物生长影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 162-170.
- (上接第 345 页)
- [12] 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.
- [13] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 728-739.
- [14] Köhl L, Lukasiewicz C E, Heijden M G A V D. Establishment and effectiveness of inoculated arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils [J]. *Plant Cell and Environment*, 2016, 39(1): 136-146.
- [15] 邓胤, 申鸿, 郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5627-5635.
- [16] Monica I F D, Saparrat M C N, Godeas A M, et al. The co-existence between DSE and AMF symbionts affects plant P pools through P mineralization and solubilization processes [J]. *Fungal Ecology*, 2015, 17: 10-17.
- [17] 贺学礼, 郭辉娟, 王银银. 土壤水分和 AM 真菌对沙打旺根际土壤理化性质的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 508-513, 519.
- [18] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- [19] Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change [J]. *Plant and Soil*, 2003, 253(2): 293-299.
- [20] Rillig M C, Maestre F T, Lamit L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1257-1260.