

内蒙古露天煤矿区回填土壤具生态适应能力 丛枝菌根真菌的筛选

张淑彬¹, 纪晶晶², 王幼珊^{1,*}, 邹国元¹, 胡振琪^{2,*}

(1. 北京市农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083)

摘要:在盆栽试验条件下,应用灭菌的露天煤矿区回填土壤为培养基质,研究 8 个丛枝菌根真菌菌种(株)对沙打旺生长及根系侵染的影响。结果表明,分离自江西和新疆的 *Glomus mosseae* 的 2 个菌株在露天煤矿区回填土壤上能够显著提高沙打旺的生物量,并能有效改善植株的磷、氮营养;其侵染率均在 50% 以上,且根外繁殖体数显著高于其他接种处理。说明此两个菌株在该土壤上具有良好的生态适应能力,有助于露天煤矿区植被重建和生态恢复等研究工作的进一步开展。

关键词:丛枝菌根真菌; 沙打旺; 吸磷量; 吸氮量

文章编号:1000-0933(2009)07-3729-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

The screening of arbuscular mycorrhizal fungi with high ecological adaptations in backfill soil of open pit mining area in Inner Mongolia

ZHANG Shu-Bin¹, JI Jing-Jing², WANG You-Shan^{1,*}, ZOU Guo-Yuan¹, HU Zhen-Qi^{2,*}

1 The Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agriculture and Forest Science, Beijing 100097, China

2 Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3729 ~ 3736.

Abstract: The effects of eight isolates of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on the plant growth and root colonization of *Astragalus adsurgens* were investigated in greenhouse pot experiment with backfill soil of open pit mining area. The results showed that two isolates of *G. mosseae* from Jiangxi and Xinjiang increased the biomass of plant and effectively enhanced P and N nutrition of host plant. The infection rates of these two isolates were above 50%, and the number of extraradical propagule was more than that of the other isolates. It was proved that the ecological adaptability of two isolates, *G. mosseae*-2 and *G. mosseae*-3 in the backfill soil were significantly higher than that of the other isolates; they are expected to benefit the plant cover reconstruction and ecological restoration in open pit mining area.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Astragalus adsurgens*; P uptake; N uptake

近年来,国内外关于矿区土地复垦和生态重建的研究十分活跃,其中矿山废弃物地生优良先锋植物种类的筛选和培育、土壤改良及施肥、生物复垦技术等方面已取得了许多进展。但是多数矿区人工植被因为生物种类单一,抗逆性差,仅仅表现出生态治理的短期行为,使矿区人工植被重建的生态效应仍不明显。而且矿区土壤在进行工程复垦重构的过程中仍然存在着很多障碍因素:其一,矿区的土壤经过人为扰动,微生物的数量和种类受到很大影响,从而影响了整个生态系统的稳定^[1];其二,矿区土壤经过回填,土壤的肥力状况恶化,特别是磷的含量降低^[2],从而严重抑制植物的生长。其三,矿区土壤在回填的过程中经过机械压实,各个土

基金项目:北京市科学技术委员会资助项目(D0706004040431);国家科技部科技基础条件平台建设资助项目(2005DKA21201);国家教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-04-0484)

收稿日期:2008-04-02; 修订日期:2008-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huzqbj@yahoo.com.cn

层的容重发生变化,土壤的孔隙度变小,团粒结构受到破坏^[3],阻碍了植物根系对水分与养分的吸收,从而影响整个生态系统的恢复。尤其在一些干旱地区,煤矿区开采造成的扰动由于干旱缺水等气候条件的影响而变得更为严重,因此矿区植被重建应该真正考虑生态系统的稳定性和可持续性。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌作为分布最广泛、最普遍的一类土壤微生物,它与植物根系形成的共生体在生态系统中起着重要的调节作用:它能够促进土壤中其他微生物群落的建立^[4];也可以通过增加植物根系对营养的吸收来恢复矿区植被,使幼苗成活并生长^[5,6];AM真菌能够通过菌丝的缠绕和多糖分泌物的粘结促进土壤水稳性团聚体的形成,并增强其稳定性^[7],从而改善复垦土壤的结构,利于植被根系养分的吸收。van der Heijden 等^[8]的研究成果表明,菌根真菌影响着自然生态系统植物种群的建立,菌根真菌的多样性决定着植物的生物多样性、生态系统的变化。研究表明,丛枝菌根可以显著促进在矿区废弃物中植物的生长^[9]。毕银丽研究结果得到丛枝菌根真菌在矿区环境治理中发挥了较好的生态作用,增加了植株对营养物质和水分的吸收,促进了白蜡的生长^[10];因此,菌根在矿区中的应用将成为矿区土地复垦与生态重建的新突破口。本试验利用盆栽方法,选择露天煤矿复垦区主要固沙植物沙打旺,在露天煤矿回填土壤上接种不同 AM 真菌,筛选出适应于露天煤矿区植被复垦的 AM 真菌,为矿区植被恢复提供有效资源和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试作物:沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall),播种前将充分吸水的种子用 1% 的甲醛浸泡 10min 进行表面消毒,用蒸馏水洗净后置于 28~30℃ 培养箱中催芽。

供试 AM 真菌菌种(株):*Glomus diaphanum*, *Glomus microaggregatum*, *Acaulospora mellea*, *Glomus intraradices*, *Glomus etunicatum*, *Glomus mosseae*-1, *Glomus mosseae*-2, *Glomus mosseae*-3 等 8 种,菌种来自北京市农林科学院植物营养与资源研究所国家自然科学基金资助的“中国丛枝菌根真菌种质资源库(Bank of Glomales in China, BGC)”,来源编号见表 1。

供试土壤:取自内蒙古伊金霍洛旗后朴连塔露天煤矿复垦区,其基本理化性质为:全氮 0.108g·kg⁻¹,碱解氮 23.9 mg·kg⁻¹,有机质 2.71g·kg⁻¹,有效磷(Olsen-P)1.22 g·kg⁻¹,有效钾(NH₄OAC-K)23.6 mg·kg⁻¹,EC 4.96 mS·m⁻¹,pH=9.38,全镉 0.10 mg·kg⁻¹,全铅 10 mg·kg⁻¹,全铜 3.8 mg·kg⁻¹,全锌 26.5 mg·kg⁻¹,全砷 1.5 mg·kg⁻¹。经湿热灭菌后备用。

表 1 菌种来源与编号

Table 1 The origin and number of AM fungi

处理 Treatment	菌种 AM fungi	中国丛枝菌根真菌种质 资源编号 The number of Bank of Glomales in China(BGC)	国家科技资源平台资源号 The number of National Natural Science and Technology Platform	来源地 Source	宿主植物 Host plant
CK	—	—	—	—	—
T1	<i>G. diaphanum</i>	BGC GZ01-2	—	贵州	槐 <i>Sophora japonica</i>
T2	<i>G. microaggregatum</i>	BGC HLJ01A	—	黑龙江	黄檗 <i>Phellodendron amurense</i>
T3	<i>A. mellea</i>	BGC BJ02A-1	1511C0001BGCAM0020	北京	银杏 <i>Gingo biloba</i>
T4	<i>G. intraradices</i>	BGC AH01	—	安徽	狗牙草 <i>Cynodon dactylon</i>
T5	<i>G. etunicatum</i>	BGC NM02B	—	内蒙	青蒿 <i>Artemisia annua</i>
T6	<i>G. mosseae</i>	BGC HEB02	—	河北	玉米 <i>Zea mays</i>
T7	<i>G. mosseae</i>	BGC JX01	—	江西	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>
T8	<i>G. mosseae</i>	BGC XJ01	1511C0001BGCAM0016	新疆	新疆韭 <i>Allium flavidum</i>

1.2 方法

试验采用盆栽方法在温室进行。试验设不接种对照处理 CK,以及分别接种 AM 真菌 *G. diaphanum*、*G. microaggregatum*、*A. mellea*、*G. intraradices*、*G. etunicatum*、*G. mosseae*-1、*G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3,共计 9

个处理,每个处理重复 4 次。接种处理中每盆菌剂用量为 20g,不接种对照处理加入等量的灭菌菌剂和 20ml 菌种悬液,以保证其它微生物的种类相一致。每盆装基质 1600g,播种 15 粒,出苗后间留 8 株。植物生长期间用称重法浇水,使其基质的含水量维持在最大持水量的 5%。每盆每月 1 次浇 Hoagland 营养液 100ml,整个生长期共浇 3 次营养液。

在盆栽条件下,沙打旺在温室生长至 120d 收获。植株在 60 ~ 70℃ 下烘 72h,称干重并测定植株中的氮(凯氏法)、磷(钒钼黄比色)含量。菌根侵染率采用墨水醋染色法^[11],按 Trouvelot A. 等^[12]方法计算根系侵染率。土壤中菌丝密度用菌丝抽率法测定^[13]。菌根效应和菌根吸收贡献率的计算公式分别为:

$$\text{菌根效应}^{[14]}(\%) = [(\text{菌根植物干物重} - \text{不接种植物干物重}) / \text{不接种植物干物重}] \times 100$$

$$\text{菌根吸收贡献率}^{[15]}(\%) = [(\text{菌根植物吸磷(氮)量} - \text{不接种植物吸磷(氮)量}) / \text{菌根植物吸磷(氮)量}] \times 100$$

应用 SAS 软件对试验数据进行统计分析,5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

2 结果分析

2.1 不同 AM 真菌对沙打旺的生长效应

不同接种处理对沙打旺干物重的影响见表 1。可见不同接种处理的植株干物重有明显的不同。接种 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 显著增加了植株的干物重,尤其以 *G. mosseae*-3 的促进作用最显著。与对照相比,其他接种处理对植株干物重无明显影响,处理 T4 即接种 *G. intraradices* 显著降低了沙打旺的植株干物重。

表 1 不同 AM 真菌菌株对沙打旺的生长效应

Table 1 Effect of different isolates inoculation on the growth of the *Astragalus adsurgens*

处理 Treatment	菌株 Isolates of AMF	干物重 Dry weight (g·pot ⁻¹)			菌根效应 Mycorrhizal effectiveness (%)
		地上部 Shoot	根系 Root	总干物重 Total dry weight	
CK	—	3.15 bc	5.38 bc	8.53 bc	0
T1	<i>G. diaphanum</i>	3.06 bc	4.83 cd	7.89 bc	-7.5
T2	<i>G. microaggregatum</i>	3.74 ab	5.58 bc	9.32 b	9.2
T3	<i>A. mellea</i>	3.53 abc	4.68 cd	8.21 bc	-3.8
T4	<i>G. intraradices</i>	2.88 c	4.22 d	7.10 c	-16.8
T5	<i>G. etunicatum</i>	3.35 abc	5.95 bc	9.30 b	8.9
T6	<i>G. mosseae</i> -1	3.60 abc	4.13 d	7.73 c	-9.4
T7	<i>G. mosseae</i> -2	3.94 a	5.35 bc	9.29 b	8.9
T8	<i>G. mosseae</i> -3	4.07 a	7.06 a	11.13a	30.4

应用 LSD 法检验处理间差异程度,同一竖栏中的不同字母表示差异达到 5% 显著水平(下同) The LSD method was used to test the significance of difference, mean values followed the same letters in a column are not significantly different at $P < 0.05$ (The same below)

菌种(株)之间的差别也很明显,接种 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 处理的植株地上部干重显著高于接种 *G. diaphanum*、*G. intraradices* 处理;接种 *G. mosseae*-3 处理的植株干重显著高于其他 6 个接种处理。

菌根效应为在一定条件下菌根真菌促进植物生长的效应大小,可以用来预测某种菌种或菌株在特定植物上的应用潜力。从表 1 可见,不同接种处理的菌根效应不同,其中 *G. mosseae*-3 的菌根效应最高,达到 30.4%;*G. microaggregatum*、*G. etunicatum*、*G. mosseae*-2 的菌根效应次之,均为 8.9%;*G. diaphanum*、*A. mellea*、*G. intraradices*、*G. mosseae*-1 的菌根效应均为负效应。

2.2 不同 AM 真菌对沙打旺的吸磷效应

与对照相比,接种 *G. diaphanum*、*A. mellea*、*G. intraradices*、*G. etunicatum*、*G. mosseae*-1、*G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 显著提高了沙打旺地上部的含磷量;所有接种处理均显著增加了根系的含磷量(表 2)。

与对照相比,接种处理均显著提高了植株地上部和根系的吸磷量,而且不同接种处理间有差异。接种 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 处理沙打旺的地上部吸磷量显著高于其他接种处理,接种 *G. mosseae*-3 处理沙打旺的根

系吸磷量是最高(表2)。

根据接种与对照植株的吸磷总量计算菌根的吸收贡献比率。结果显示,不同接种处理菌丝对 P 的吸收贡献比率存在差异,接种 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 处理的菌根吸收贡献比率明显高于其它处理,分别为 46 和 54%; *G. diaphanum*、*G. intraradices* 的菌根吸收贡献比率较低,均低于 30%(表2)。

表2 不同 AM 真菌(菌株)对沙打旺吸磷效应的影响

Table 2 Effect of different isolates inoculation on the P uptake of *Astragalus adsurgens*

菌株 Isolates of AMF	含磷量 P concentration (mg·kg ⁻¹)		吸磷量 P uptake (mg·pot ⁻¹)		菌根吸收贡献率 Mycorrhizal P contribution (%)
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	
CK	10.87 e	0.46 e	3.43 d	2.47 d	0
<i>G. diaphanum</i>	12.65 cd	0.79 cd	3.80 cd	3.80 c	22
<i>G. microaggregatum</i>	12.29 de	0.73 cd	4.60 bc	4.03 bc	32
<i>A. mellea</i>	12.73 cd	0.84 bc	4.48 bc	3.93 bc	30
<i>G. intraradices</i>	13.14 bcd	1.01 a	3.77 cd	4.30 bc	27
<i>G. etunicatum</i>	13.88 abc	0.67 d	4.62 bc	4.04 bc	32
<i>G. mosseae</i> -1	13.33 bcd	1.06 a	4.81 b	4.35 bc	36
<i>G. mosseae</i> -2	15.15 a	0.93 ab	5.97 a	5.02 b	46
<i>G. mosseae</i> -3	14.21 ab	1.01 a	5.74 a	7.15 a	54

2.3 不同 AM 真菌对沙打旺的吸氮效应

由表3可知,与对照相比,接种 *A. mellea*、*G. intraradices*、*G. mosseae*-1、*G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 的植株根系含氮量显著高于对照处理;除 *G. mosseae*-2 外,所有其他处理对沙打旺植株地上部含氮量都没有明显的影响。

从接种 AM 真菌对沙打旺不同部位的吸氮量的影响看,仅有接种 *G. mosseae*-3 处理显著提高了植株地上部和根系的吸氮量,而且显著高于其他接种处理。

不同接种处理菌根对 N 的吸收贡献比率同样存在差异,接种 *G. mosseae*-3 处理的菌根吸收贡献比率明显高于其它处理,*G. diaphanum*、*G. intraradices*、*G. etunicatum* 的菌根吸收贡献比率较低,均低于 10%(表3)。

表3 不同 AM 真菌(菌株)对沙打旺吸氮效应的影响

Table 3 Effect of different isolates inoculation on the N uptake of *Astragalus adsurgens*

菌株 Isolates of AMF	植株含氮量 P concentration (mg·kg ⁻¹)		植株吸氮量 P uptake (mg·pot ⁻¹)		菌根吸收贡献率 Mycorrhizal P contribution (%)
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	
CK	11.28 abc	3.97 d	35.5 bc	21.23 de	0
<i>G. diaphanum</i>	11.80 ab	4.47 cd	35.8 bc	20.80 e	0
<i>G. microaggregatum</i>	10.97 bcd	5.16 bd	40.9 b	28.64 b	18
<i>A. mellea</i>	10.36 cd	5.80 ab	36.3 bc	27.11 cb	11
<i>G. intraradices</i>	11.67 ab	6.39 a	33.0 c	26.77 cbd	5
<i>G. etunicatum</i>	12.24 a	3.79 d	40.6 b	22.54 cde	10
<i>G. mosseae</i> -1	10.72 bcd	6.40 a	38.6 bc	26.40 bed	12
<i>G. mosseae</i> -2	10.09 d	5.97 ab	39.7 b	31.93 b	20
<i>G. mosseae</i> -3	11.69 ab	6.28 a	47.2 a	44.50 a	38

2.4 不同 AM 真菌的侵染率和根外繁殖体数量

由图1可以看出,不同 AM 真菌对沙打旺的菌根侵染差异显著。*G. intraradices*、*G. mosseae*-1、*G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 的侵染率均在 40% 以上,表明它们与宿主植物形成了较好的共生关系。其他菌种(株)的侵染率均较低,不足 10%。

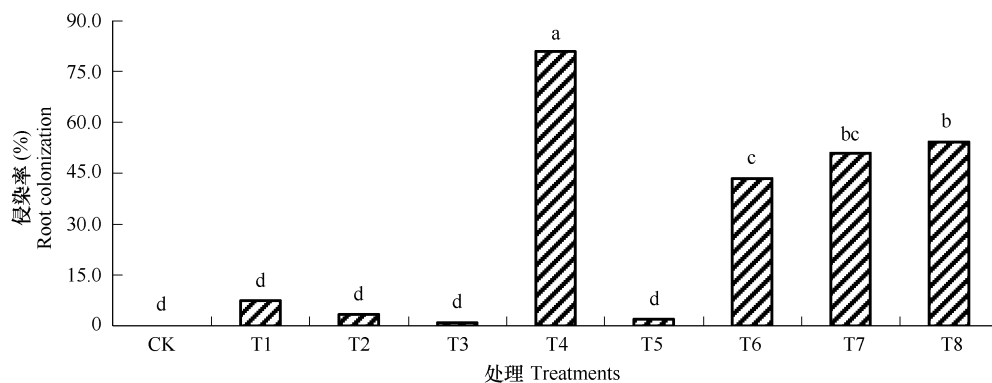


图1 不同 AM 真菌的菌根侵染率

Fig. 1 Colonization of different AM fungi after inoculating on *Astragalus adsurgens*

CK: 不接种处理 no treatment, T1: 接种 *G. diaphanum*, T2: 接种 *G. microaggregatum*, T3: 接种 *A. mellea*, T4: 接种 *G. intraradices*, T5: 接种 *G. etunicatum*, T6: 接种 *G. mosseae*-1, T7: 接种 *G. mosseae*-2, T8: 接种 *G. mosseae*-3

由图 2 可知,接种 *G. diaphanum*、*G. microaggregatum*、*G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 的土壤中孢子密度均显著高于对照。不同处理间也有差异,其中 *G. mosseae*-2 的孢子密度最高,20 克风干土中有 400 多个孢子;*G. diaphanum*、*G. microaggregatum* 和 *G. mosseae*-3 次之,在 150 以上;*G. etunicatum* 最低,仅几个。

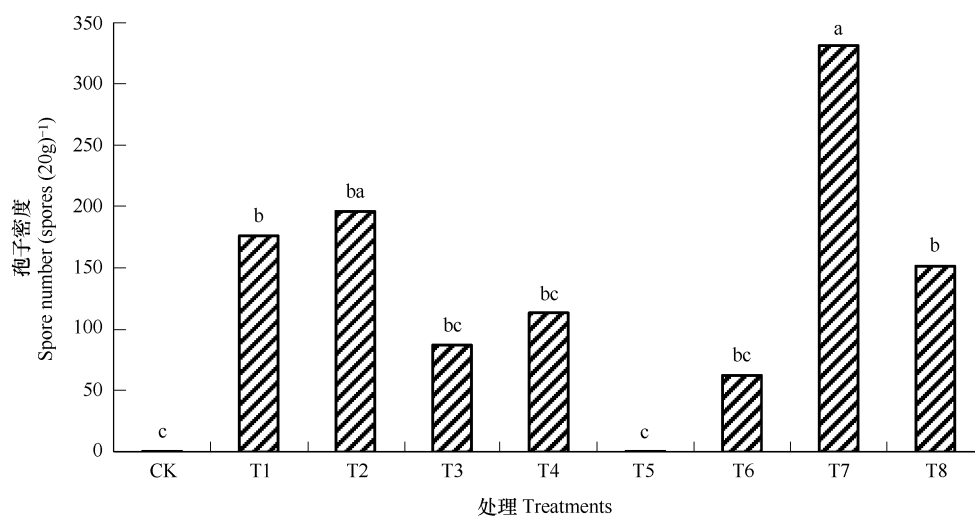


图2 不同处理土壤中 AM 真菌的孢子密度

Fig. 2 Spore density of AM fungi in the different treatment soil

CK: 不接种处理 no treatment, T1: 接种 *G. diaphanum*, T2: 接种 *G. microaggregatum*, T3: 接种 *A. mellea*, T4: 接种 *G. intraradices*, T5: 接种 *G. etunicatum*, T6: 接种 *G. mosseae*-1, T7: 接种 *G. mosseae*-2, T8: 接种 *G. mosseae*-3

不同 AM 真菌菌株在土壤中的菌丝长度也有差异,其中 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 最高,*G. diaphanum*、*A. mellea*、*G. etunicatum* 最低(图 3)。

从侵染率、孢子密度和菌丝长度 3 个反映真菌生长发育状况的指标可以看出,*G. mosseae* 易与沙打旺建立共生体,且 *G. intraradices* 最易与沙打旺建立共生体,但其根外繁殖体数量较少, *G. etunicatum* 和 *A. mellea* 不易侵染沙打旺根系,且根外繁殖体数量最少。 *G. mosseae* 种内不同菌株间根外繁殖体数量差异较大,顺序为 *G. mosseae*-2 > *G. mosseae*-3 > *G. mosseae*-1。

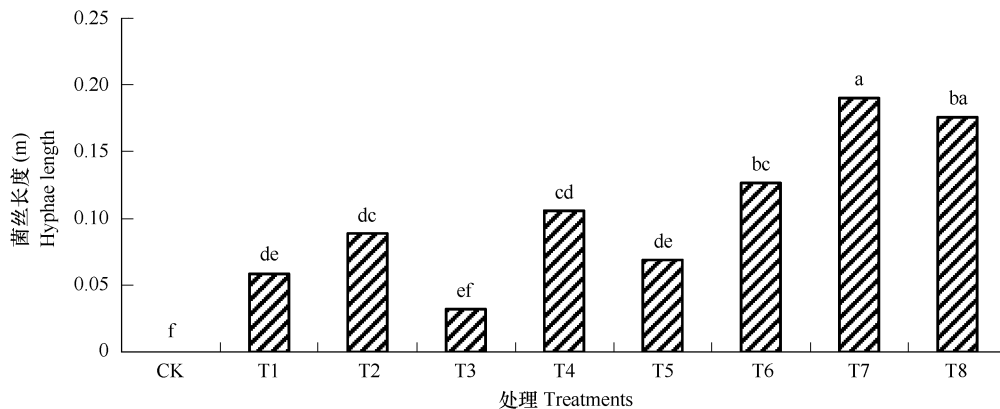


图3 不同处理土壤中 AM 真菌的菌丝长度

Fig. 3 Hyphae length of AM fungi in the different treatment soil

CK: 不接种处理 no treatment, T1: 接种 *G. diaphanum*, T2: 接种 *G. microaggregatum*, T3: 接种 *A. mellea*, T4: 接种 *G. intraradices*, T5: 接种 *G. etunicatum*, T6: 接种 *G. mosseae*-1, T7: 接种 *G. mosseae*-2, T8: 接种 *G. mosseae*-3

3 讨论

衡量 AM 真菌有效性的主要指标包括 AM 真菌对宿主植物的直接作用和间接作用。直接作用即 AM 真菌通过促进植物对矿质元素的吸收,改善植物的生长状况;间接作用指根外菌丝通过提高土壤质量而间接改善植物的生长状况^[16]。本试验主要以 AM 真菌对宿主植物的直接作用作为筛选高效菌株的指标,具体以宿主植物的生物量及吸磷、氮效应为主,并参考一些相关的真菌生物学指标,包括菌根侵染率、菌丝长度和孢子密度。菌根侵染率能反映共生体的形成状况,通常侵染程度高的 AM 真菌效应较高^[17];而 AM 真菌在土壤中形成的大量繁殖体根外菌丝和孢子,对于其在田间的持久性、对土壤理化性能和土壤条件的适应性具有重要影响^[16];根外菌丝还直接影响 AM 真菌吸收和运输营养的能力。

本试验所采用的露天煤矿区回填土壤,其有效磷、有效氮含量特别低。接种不同来源的 8 种 AM 真菌后表明,来自新疆的菌株 *G. mosseae*-3 对沙打旺生长的促进作用最强,即菌根效应最佳;分别来自黑龙江、内蒙、江西的 *G. microaggregatum*、*G. etunicatum*、*G. mosseae*-2 的菌根效应次之;而 *G. diaphanum*、*A. mellea*、*G. intraradices*、*G. mosseae*-1 则对沙打旺的生长没有促进作用,它们分别来自贵州、北京、安徽、河北。从 AM 真菌菌丝对沙打旺吸磷、氮的贡献率看,大多数 AM 真菌对沙打旺植株磷、氮含量都有促进作用,其中来自江西和新疆的两个菌株 *G. mosseae*-2、*G. mosseae*-3 对沙打旺植株磷、氮含量的菌丝吸收贡献比率最高,其他六种菌种(株)的菌丝吸收贡献比率较低。结果表明来自不同地域生态条件的 AM 真菌由于其适应能力的不同,导致其对沙打旺的生长效应和菌丝对氮、磷吸收的贡献率存在差异。

AM 真菌对植物的生长效应和磷、氮吸收贡献率是和它们的生物学特性分不开的,不同菌株的侵染率、孢子密度和菌丝长度等生物学指标有很大差异。王幼珊和张美庆等^[19]测定了 3 株不同来源的 *Glomus mosseae* 菌株,发现它们对芨芨草的侵染率和对产草量的影响很不相同。本研究中分离自江西、新疆的两个 *G. mosseae* 菌株的侵染率、孢子密度和菌丝长度均较高,其对沙打旺的生长效应和菌丝对氮、磷吸收的贡献率也最好。而虽然 *G. intraradices* 的侵染率最高,最易与沙打旺建立共生体,但其根外繁殖体数量较少;同样分离自河北的 *G. mosseae*-1 的侵染率较高,但其根外繁殖体数量也较少;*G. diaphanum*、*G. microaggregatum*、*A. mellea* 和 *G. etunicatum* 均不易侵染沙打旺根系,且 *A. mellea* 和 *G. etunicatum* 的根外繁殖体数量最少。使得他们对沙打旺的生长效应很低,甚至为负效应。因此我们认为可能菌根侵染率和根外繁殖体数量之间存在一定的制约关系,两者如不能达到一定程度的和谐,就不能发挥对植物的有利作用。

综上所述,由于该 8 种不同丛枝菌根真菌分离的宿主植物和来源地等生态条件不同,表现出其对沙打旺的生长效应和对露天煤矿区回填土壤的生态适应能力不同,这与其他研究者的研究结果^[18]相似。由本试验

筛选出分离自江西和新疆的 *G. mosseae* 两个菌株为高效菌株,可供露天煤矿区回填土壤的植物修复和农业生产所利用。

References:

- [1] Long J, Huang C Y, Teng Y, *et al.* Preliminary study on soil microbes and soil biochemical activities in mining wasteland. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):496—503.
- [2] Lei D M, Duan C Q, Wang M. Soil fertility and heavy metal Contamination in Abandoned Regions of Different Mine Tailings in Yunnan Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):612—616.
- [3] Wei Z Y, Hu Z Q, Bai Z K. The loose heaped ground method of soil reconstruction on the stack piles of open pit coalmine. *Journal of China Coal Society*, 2001, 6(1):18—21.
- [4] Song F Q, Yang G T, Meng F R. The rhizospheric of seedlings of *Populus ussuriensis* colonized by arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):211—216.
- [5] Yu J D. Primary study of mycorrhiza used for reclamation in northwest. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 2000, 20 (supplement):77—81.
- [6] Call C A, Davies F T. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizae on survival and growth of perennial grasses in lignite overburden in Texas. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1988, 24(4):395—405.
- [7] Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water stable aggregates in sandy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4):99—102.
- [8] van der Heijden, Klironimos N, Ursic M, *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 1998, 396(5):69—72.
- [9] Noyd R K, Pflieger F L and Norland M R. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of tocanite iron ore tailing. *Plant and Soil*, 1996, 179:89—98.
- [10] Bi Y L. New culture technology and ecological effects of arbuscular mycorrhizal fungi in land reclamation. Beijing: Geological Publishing House, 2007. 41—73
- [11] Horst V, Andrew P C, Urs W, *et al.* Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(12):5004—5007.
- [12] Trouvelot A, Kough J L, Gianinazzi Pearson V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systeme racinaire. Recherche de methods destination ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae*. Paris: INRA Press, 1986. 217—221
- [13] Jakobsen I, Abbott L K, Robson A D. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytologist*, 1992, 120:371—380.
- [14] Wang C X, Qin L, Feng G, *et al.* Effects of three arbuscular-mycorrhizal fungi on growth of cucumber seedlings. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):301—303.
- [15] Qian C, Cai X B, Gai J P, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizae inoculation on the growth and phosphorus uptake of sand fixation plant on the Tibetan. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):537—543.
- [16] Abbott L K, Robson A D and Gazey C. Selection of inoculant vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Methods in the Microbiology*, 1992, 24:1—21.
- [17] Abbott L K. Comparative anatomy of vesicular-arbuscular mycorrhizas formed on subterranean clover. *Australian Journal of Botany*, 1982, 97:437—446.
- [18] Liu B F, Zhao Q, Zhu J, *et al.* Screening of arbuscular mycorrhizal fungi with high ecological adaptations in purple soil. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2006, 28(4):577—609.
- [19] Wang Y S, Zhang M Q, Zhang C, *et al.* Selection of salt tolerant isolate of VA mycorrhizal fungi. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 (Supplement):79—83.

参考文献:

- [1] 龙健,黄昌勇,滕应,等. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性. 生态学,2003,23(3):496~503.
- [2] 雷冬梅,段昌群,王明. 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价. 农业环境科学学报,2007,26(2):612~616.
- [3] 魏忠义,胡振琪,白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法. 煤炭学报,2001,26(1):18~21.
- [4] 宋福强,杨国亭,孟繁荣,等. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域的研究. 生态环境,2004,13(2):211~216.
- [5] 郁纪东. 应用菌根技术进行西北地区土地复垦初探. 西安科技学院学报,2000,20(增刊):77~81.
- [7] 冯固,张玉凤,李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响. 水土保持学报,2001,15(4):99~102.
- [10] 毕银丽. 丛枝菌根培养新技术及其土地复垦生态效应. 北京:地质出版社,2007. 41~73.
- [14] 王倡宪,秦岭,冯固,等. 三种丛枝菌根真菌对黄瓜幼苗生长的影响. 农业环境科学学报,2003,22(3):301~303.
- [15] 钱成,蔡晓布,盖京苹,等. 丛枝菌根真菌对西藏高原固沙植物吸磷效率的影响. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):537~543.
- [18] 刘邦芳,赵淇,朱均,等. 灰棕紫泥土中具生态适应能力丛枝菌根真菌的筛选. 西南农业大学学报(自然科学版),2006,28(4):577~609.
- [19] 王幼珊,张美庆,张弛,等. VA 菌根真菌抗盐碱菌株的筛选. 土壤学报,1994,31(增刊):79~83.