

接种菌根对神东矿区采煤沉陷地的生态修复效应

岳辉¹, 毕银丽¹, ZHAKYPBEK Y.², 蒋明明¹, 高斐¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, UL Satpayev 22, Almaty 050013, Kazakhstan

摘要 丛枝菌根真菌技术对采煤沉陷区进行土地微生物修复是目前研究的热点之一。本文以神东采煤沉陷区种植的紫穗槐接种丛枝菌根真菌为研究对象,经 16、25 和 28 个月监测和对接种菌丝密度与土壤有效磷含量的相关性分析,表明接种对植物生长和根际土壤理化性状产生的一定影响。回归分析方法表明,接种菌丝密度与有效磷含量随着时间的推移逐渐降低,而对照逐渐呈现正相关性;不同的监测时间相关性不同,如 9 月的菌丝密度与有效磷含量的相关性优于 6 月的,这与菌根发育时间密切相关。神东矿区采煤沉陷地紫穗槐试验结果证明,接种菌根真菌能够在宏观上有效地促进紫穗槐生长和发育,在微观上改良植物生长的基质条件。

关键词 丛枝菌根真菌;紫穗槐;根际土壤;菌根修复

中图分类号 S154

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.36.009

Ecological Reclamation Effect of Arbuscular Mycorrhizal Inoculum on Subsided Land in the Area of Shendong Coal Mine

YUE Hui¹, BI Yinli¹, ZHAKYPBEK Y.², JIANG Mingming¹, GAO Fei¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China

2. Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, UL Satpayev 22, Almaty 050013, Kazakhstan

Abstract Currently, arbuscular mycorrhizal fungi technology becomes one of the hotspots in the research on land microbial remediation for mining subsidence. Taking *Amorpha fruticosa* planting in the mining subsidence of Shendong mining area as a study object, AMF vaccinated on *Amorpha fruticosa* after 16 months, 25 months, and 28 months, respectively are used to analyze its effect on the growth of plant and on rhizosphere soil physical properties. And then the correlation between hyphae density and effective phosphorus of rhizosphere is analyzed. By using regression analysis, it is indicated that in different monitoring time, for example, hyphae density and effective phosphorus in September had better linear fitting than that in June, which is closely associated with development time of mycorrhizal. With the time passing by, the correlation of vaccination between hyphae density and effective phosphorus content is gradually decreased; however, the positive correlation of un-vaccinated is gradually emerged. The results of mycorrhizal bioremediation on mining subsidence in Shendong mining area prove that vaccination not only could effectively promote growth and development of *Amorpha fruticosa* in macroscopic, but also could improve the growth matrix conditions in microscopic.

Keywords arbuscular mycorrhizal fungi; *Amorpha fruticosa*; rhizosphere soil; mycorrhizal bioremediation

0 引言

采煤造成的地面沉陷是神东矿区最严重的生态环境问题之一。截止 2008 年底,神东矿区累计采煤沉陷区面积为 7800hm²,而且每年新增沉陷区面积达 200hm²[1]。长期的沉陷、风蚀、水蚀导致土壤理化性质、肥力状况发生了质的变化,土地生产力下降。沉陷使植物根系拉伤现象严重,土壤结构被

扰动,微生物种群减少,土壤贫瘠,植被难以定植,加剧了当地生态恢复的难度,人地矛盾突出[2]。因此,微生物复垦技术特别是菌根复垦技术逐渐成为众多学者研究的热点[3-4]。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi,AMF)是一种普遍存在于陆生植物根际的有益共生微生物,能够与 80% 的陆生植物形成共生体[5]。作为陆地生态系统中的“关键共生

收稿日期:2012-05-30;修回日期:2012-10-30

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAC10B03);教育部博士点基金(20090023110009);中央高校基本科研业务费(2009KD01)

作者简介:岳辉,博士研究生,研究方向为环境修复和菌根技术,电子邮箱:milan19830928@163.com;毕银丽(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:E382450003M),教授,研究方向为土地复垦及微生物复垦技术,电子邮箱:byl@cumb.edu.cn

物”,AMF 在土壤贫瘠条件下,可通过其庞大的菌丝网络提高植物对矿质养分的吸收;促进土壤团聚体的形成;在极端环境下,通过改善营养增强植物抗重金属、抗旱、抗虫害的能力;在此基础上使土壤微生态环境得到较大改善^[6-7]。本文利用丛枝菌根的生理生态特性,在神东矿区采煤沉陷地种植的紫穗槐上接种菌根真菌,研究其对沉陷区的植物生长、土壤理化性状的影响,以期探索出一条适于采煤沉陷区微生物复垦的新方法,为菌根技术在矿区土地微生物修复的大规模推广应用提供理论基础和现实依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点选择在陕西省神木县大柳塔镇活鸡兔矿区塌陷地。该地处于鄂尔多斯高原与黄土高原交接地带,北有毛乌素沙地,南有黄土高原,是黄土高原地貌演化的过渡地带,为水蚀和风蚀两相侵蚀地区。试验基地建于沟壑区三道梁上,属典型的干旱半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 362mm,主要集中在 6—9 月,年际与年内降水分配极不均匀;年蒸发量 2297.4—2838.7mm,是降水量的 6—7 倍;年平均气温 7.3℃,热量指标变化剧烈。该地土层瘠薄,土壤有机质含量低,N、P、K 贫乏,储水保肥和抗蚀能力差。试验地的土壤基本理化性状为:最大饱和持水量为 16.7%,pH 值为 8.6,电导率为 0.61ms/cm,有效磷为 3.4mg/kg。

1.2 试验材料

(1) 试验植物:紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)。

(2) 试验菌株:供试菌种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的内生菌根真菌菌种——摩西球囊霉菌(*Glomus mosseae*, G.m)和白色球囊霉菌(*Glomus albidus*, G.a)。

1.3 试验设计

试验设接种(+M)与对照(CK)两个区,接种区分为 G.m 和 G.a。2008 年 5 月开始进行栽植,株高 20cm,种植间距为 1m×2m,菌剂随苗木一起接入,每株 20g。浇水达土壤最大饱和持水量,以后每周浇水一次,一个月后免水分自然管理。2008 年 8 月测定植株株高、地径、冠幅和成活率。2009 年 4 月补施一次菌剂,剂量为 20g/株。对照区不施菌剂。2009 年 9 月进行第 1 次监测(2009-09-09),2010 年 6 月进行第 2 次监测(2010-10-06),2010 年 9 月进行第 3 次监测(2010-10-09)。

1.4 样品采集

分别对 G.m, G.a, CK 区采用 S 型法随机选定 15 个样点,采集新鲜根际土壤样并且编号,将土样装入自封袋带回实验室,根际土风干后剔除杂物过 2mm 筛备用。

1.5 测定指标和方法

(1) 植株生长量和成活率

用游标卡尺测量植株地径,用钢尺测量冠幅和株高。计算紫穗槐成活率公式,成活率 (%)=(成活株数/栽种株数)×

100%。

(2) 菌根侵染率和菌丝长度

用 Phillip 和 Hayman 的 KOH 脱色-曲利苯蓝染色法,玻片镜检测定侵染根段数^[8];计算菌根侵染率公式,菌根侵染率 (%)=(菌根段数/被检根段数)×100%^[9]。菌丝密度采用真空泵微孔滤膜抽滤-网格交叉法测定^[10]。

(3) 根际土壤理化性状

pH 值为水土比 5:1 的玻璃电极-酸度计法;电导率(Electrical Conductivity, EC)为水土比 5:1 浸提-电导法;有效磷为 0.5mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾为 1.0mol/L NH₄OAC 浸提-火焰光度法^[11]。

1.6 统计方法

采用 SPSS 统计软件和微软 Excel 表格处理软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 接种菌根对植物成活率的影响

接种菌根对紫穗槐成活率的影响见图 1。对比植株的 16 个月生长期(2009 年 9 月)、25 个月生长期(2010 年 6 月)和 28 个月生长期(2010 年 9 月)可以发现,接种菌根能明显提高紫穗槐的成活率达 30%以上,不同菌根对成活率的影响不显著。接菌区植株在 2010 年 6 月监测的成活率较 2009 年 9 月降低,对照区下降更为明显,可能是植株在越冬时适应性不同所致。接种菌根增加了植株抵御极端环境的能力使得接菌区植株成活率明显高于对照区。

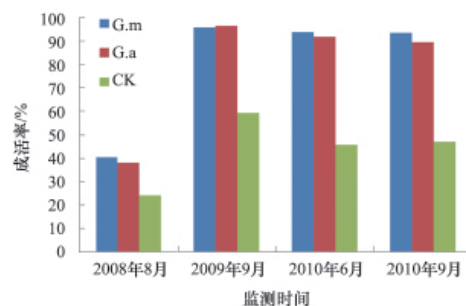


图 1 不同处理成活率对照

Fig. 1 Survival rate for different treatments

2.2 接种菌根对植物生长的影响

通过对比分析 4 个不同时间段紫穗槐的株高、地径和冠幅(表 1)可知,接种菌根明显促进了紫穗槐生长。紫穗槐生长 2a 后,菌根对植株株高、地径及冠幅的促进作用更为显著。不同菌根真菌对植物促进作用不同,对植株生长影响效应的大小为 G.m>G.a>CK。接种菌根有效地促进了植株的生长发育,能够产生明显的生态效应^[2]。

2.3 接种菌根对菌根侵染率的影响

菌根侵染率不仅是描述植物根系受菌根真菌感染程度的指标,也是反映丛枝菌根形成和 AM 真菌对植物亲和力的指标。接菌区植株侵染率明显高于对照区(图 2)。对照区 3 次

表 1 不同处理对紫穗槐生长的影响

 Table 1 Growth of *Amorphafruticosa* L. in different treatments

监测时间	不同处理	株高/cm	地径/cm	冠幅/m ²
2008年8月份	G.a	30.20±11.99 ^g	0.49±0.18 ^f	0.061±0.057 ^g
	G.m	33.47±11.79 ^f	0.55±0.20 ^e	0.069±0.059 ^g
	CK	28.64±11.14 ^g	0.49±0.19 ^f	0.052±0.054 ^g
2009年9月份	G.a	52.69±31.66 ^{cd}	0.83±0.43 ^e	0.436±0.633 ^e
	G.m	60.70±34.32 ^b	0.88±0.44 ^{abc}	0.631±0.835 ^a
	CK	46.66±26.71 ^e	0.72±0.33 ^d	0.285±0.433 ^{ef}
2010年6月份	G.a	54.43±33.09 ^e	0.82±0.44 ^e	0.347±0.471 ^{de}
	G.m	61.61±33.72 ^b	0.90±0.47 ^{ab}	0.454±0.606 ^e
	CK	49.55±28.61 ^{de}	0.71±0.32 ^d	0.249±0.323 ^f
2010年9月份	G.a	60.39±34.61 ^b	0.85±0.43 ^{bc}	0.41±0.523 ^{cd}
	G.m	69.49±35.76 ^a	0.91±0.47 ^a	0.539±0.675 ^b
	CK	51.78±29.00 ^{cd}	0.75±0.33 ^d	0.336±0.421 ^{de}

注:同一列数据后不同上标字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。

Note: Values in the same column but with different letters represent significantly different at $P<0.05$.

监测的菌根侵染率均达到 30%以上,这可能是由于土壤中本身存在一定种类和数量的土著菌根真菌。随着植株的生长,接种 G.m 区的侵染率波动较大,G.a 区的侵染率波动较小,对照区有增加的趋势但差异没有达到显著水平。侵染率的变化可能与接种菌根的植株生长速度较快有关。

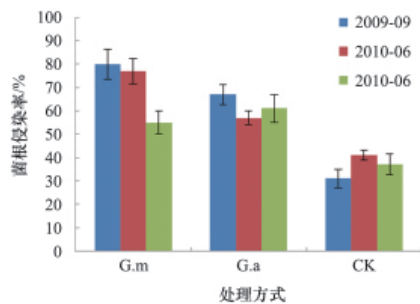


图 2 不同处理对菌根侵染率的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on infection rate

2.4 接种菌根对菌丝密度的影响

菌丝密度反应了丛枝菌根对植物根际发育的影响。单位根际土的菌丝密度越大,越有利于根系对土壤营养和水分的吸收和运输,促进植株生长和抗性^[3]。随着接种菌根时间的延长,不同处理区的菌丝密度呈现相同规律(图 3)。不同菌的菌丝密度大小为 G.m>G.a>CK。从图 3 可以看出,接菌区和对照区的菌丝密度均随着生长时间的增加而增大,接菌区和对照区差异显著。说明紫穗槐经过 2a 生长后已经与丛枝菌根建立起稳定的共生关系。

2.5 接种菌根对土壤理化性状的影响

接种丛枝菌根对紫穗槐根际土壤理化性状的影响如表 2 所示。随着紫穗槐的生长,接菌区和对照区 pH 值和有效磷表现出显著性差异。其中 G.m 和 G.a 区根际土壤 pH 值比 CK 区

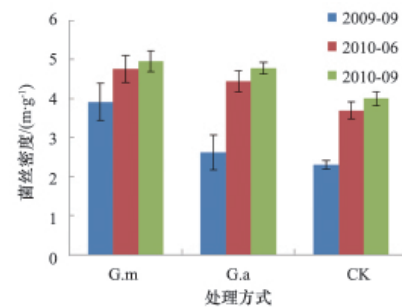


图 3 不同处理对菌丝密度的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on hyphae density

低,降低幅度为 0.18—0.4。变化最大的为 G.a 区,为 0.4,3 个监测时间点均达到这一水平;变化最小的为 G.m 区,2010 年 9 月份监测变化值为 0.18。对比 3 次测定的结果,根际土壤 pH 值和 EC 呈先上升后下降的趋势。2010 年 6 月份雨季到来前达到最高值,2010 年 9 月份雨季过后降低。结合大柳塔西山气象观测数据,2008—2010 年 6—9 月份的降雨量分别为:464.6、221.4 和 144.43mm,各占全年降雨量的 93.5%、75.7%和 54.7%,说明采煤沉陷区土地有盐碱化趋势。而接菌区 pH 值上升比对照区明显要小,结合接菌区紫穗槐的生长情况,可以认为接菌后紫穗槐能够降低盐碱化的影响^[4]。对照有效磷的测定结果可以发现,前 2 次测定中,G.m、G.a 和 CK 分别达到显著性差异,后一次显著性差异降低,对比 3 次测定结果,根际土壤有效磷含量均处于中低水平,这可能与土壤中有有效磷大量转移到植株内有关。EC 和速效钾含量在 3 次监测中变化并不显著。

2.6 紫穗槐菌丝密度与土壤有效磷含量之间的相关性分析

菌丝密度可被认为是测定菌根侵染效率的重要指标^[15]。研究表明,接种菌根能够增加植物对磷的吸收。运用 Excel 对 3 次测定结果分析得到菌丝密度与有效磷含量的线性回归方程(图 4 和图 5),以确定菌丝密度是否影响植物根际土壤有

表 2 不同处理对土壤理化性状的影响

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

监测时间	不同处理	pH 值	EC/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2009-09	CK	8.15±0.14 ^c	38.91±5.46 ^e	115.2±20.69 ^a	1.95±1.50 ^d
	G.m	7.89±0.09 ^f	38.67±4.87 ^e	96.6±32.38 ^a	8.86±0.35 ^a
	G.a	7.75±0.07 ^f	42.34±7.68 ^{b,c}	99.7±15.77 ^a	4.31±4.11 ^c
2010-06	CK	9.13±0.06 ^a	53.31±7.28 ^a	67.6±23.80 ^b	4.36±0.64 ^c
	G.m	8.84±0.05 ^b	47.43±6.01 ^b	74.5±33.86 ^b	6.75±0.97 ^b
	G.a	8.73±0.04 ^c	46.60±5.06 ^b	61.7±19.73 ^b	5.18±0.69 ^c
2010-09	CK	8.29±0.09 ^d	27.58±2.95 ^d	66.3±19.81 ^b	2.49±0.73 ^d
	G.m	8.11±0.12 ^e	20.69±2.17 ^e	57.3±17.32 ^b	2.00±0.33 ^d
	G.a	7.90±0.09 ^f	19.90±4.68 ^e	67.0±15.30 ^b	2.77±0.31 ^d

注:同一列数据后不同上标字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。

Note: Values in the same column but with different letters represent significantly different at $P<0.05$.

效磷含量。通过图 4 和图 5 可以看到,接菌(+M)紫穗槐在 2009 年 9 月雨季过后菌丝密度和有效磷含量正相关性大于 2010 年 6 月雨季到来前。对照紫穗槐(CK)在 2010 年 9 月雨季过后菌丝密度和有效磷含量正相关性大于 2010 年 6 月雨季到来前,这可能与菌丝生长的时间段有一定联系。每年的 6—9 月是植物生长的主要季节,在这个时间段内,气候温暖、湿润、多雨,菌根真菌有较强的生命力,地下菌丝网络得到充

分的发育,能够影响到土壤理化性状的变化。分析图 4 和图 5 发现,接菌紫穗槐菌丝密度与有效磷含量的正相关性随时间推移呈降低的趋势,这可能与土壤中的有效磷大量转移到植物体内有关;而对照区呈现从负相关性到正相关性的转变,这可能是由于接菌区土壤有效磷的转移速率要快于对照区,反映在对植物生长的促进作用上也表现为接菌区植物生长要明显优于对照区。

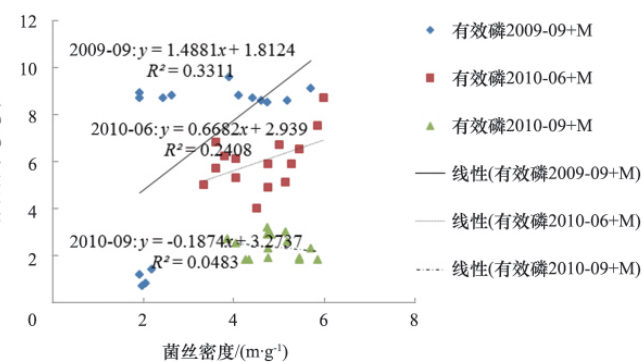


图 4 不同时间点接菌紫穗槐菌丝密度与有效磷含量回归方程

Fig. 4 Regression equation between hyphae density and olsen-P at different time points in +M

3 讨论

通过对采煤沉陷区紫穗槐接种丛枝菌根真菌,植物的根系与菌根共生,扩大了根系和菌丝共生体所接触到的土壤体积,菌根植物比对照植物具有更快的吸收效率。实验证明菌丝的吸磷速率约为根毛的 4 倍^[16],根外菌丝可伸长到根表 8cm 处土壤中吸收磷^[17],菌根的菌丝比植物根系更能贮存大量所吸收的磷,因而促使磷素不断地通过主动运输的方式进入到菌丝中并传递给宿主植物。本实验中接菌区和对照区植物根际吸收有效磷能力的差异反映在植物地上生物量上,即接菌紫穗槐成活率、株高、地径和冠幅显著好于对照区。

三室隔网法的研究结果表明,菌根际的磷酸酶活性明显高于非菌根际的酶活性^[18]。根际土壤酸性磷酸酶细胞化学定

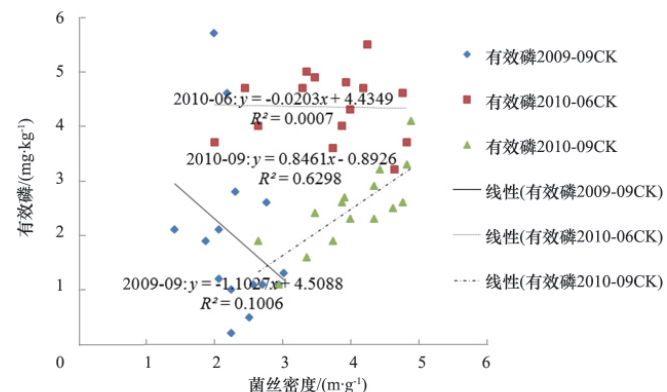


图 5 不同时间点对照紫穗槐菌丝密度与有效磷含量回归方程

Fig. 5 Regression equation between hyphae density and olsen-P at different time points in CK

位结果表明,磷酸酶主要位于活性菌丝上,未成熟菌丝、孢子和衰老菌丝上酶活性极低。这意味着菌丝有可能分泌磷酸酶,活化土壤有机磷^[19]。菌根真菌接种试验表明,菌根的有机磷耗竭区比对照的非菌根宽;菌丝室内土壤有机磷含量明显低于对照,说明外生菌丝具有活化土壤有机磷的作用^[20]。菌根真菌活化土壤有机磷的原因是土壤磷酸酶活性影响的结果。因此,菌丝可以酸化菌丝际进而促进难溶性磷矿物的溶解^[21]。本试验中接菌区根际土壤 pH 值显著低于对照区,说明菌根真菌能够有效的促进紫穗槐对土壤营养元素的吸收,改善土壤理化性状,改良植物的生长基质条件^[22]。

菌根侵染率和菌丝密度与磷吸收效率存在显著的正相关关系^[23]。在低磷条件下,AM 真菌对大豆植株的侵染强度与

接种处理的磷含量之间显著正相关^[24];随菌根感染率的提高,植株生物量、吸磷量均呈显著增加^[25]。本试验是在神东采煤沉陷地上进行的,土壤有效磷含量较低,试验结果表明菌丝密度与植物根际有效磷含量存在一定的线性拟合,在一定程度上支持了低磷条件下,菌根感染效率是植物磷吸收能力差异的主导因素之一的观点。

4 结论

(1) 在野外大田条件下接种丛枝菌根真菌对紫穗槐的生长有明显的促进作用,提升紫穗槐成活率达 30%以上,接菌能显著提高植物的地上生物量。

(2) 接种丛枝菌根真菌紫穗槐根际 pH 值比对照降低 0.18—0.4,菌丝密度与土壤有效磷含量存在一定的线性拟合,接菌促进了植物对有效磷的吸收,改良了矿区土壤基质。

参考文献 (References)

- [1] 陈士超, 左合君, 胡春元, 等. 神东矿区活鸡兔采煤塌陷区土壤肥力特征研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2009, 30(2): 115-120.
Chen Shichao, Zuo Hejun, Hu Chunyuan, et al. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2009, 30(2): 115-120.
- [2] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤田开采对地下水和植被的影响[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1408-1414.
Wang Li, Wei Sanping, Wang Qianjiu. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1408-1414.
- [3] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2068-2073.
Bi Yinli, Wu Fuyong, Wu Yukun. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2068-2073.
- [4] Johansson J F, Paul L R, Finlay R D. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2004, 48(1): 1-13.
- [5] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Liu Runjin, Li Xiaolin. *Arbuscular mycorrhizal and its application* [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] Frost S M, Stab D D, Williams S E. Long-term reestablishment of arbuscularmycorrhizal fungi in a drastical disturbed semiarid surface mine soil[J]. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15(1): 3-12.
- [7] Auge R M, Foster J G, Loeschner W H, et al. Symplastic molality of free amino acid and sugars in *Rosa* root with regard to VA mycorrhizae and drought[J]. *Symbiosis*, 1992, 12(1): 1-17.
- [8] Phillips J M, Haymen D S. Improved procedures for clearing 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.
- [9] 蔡邦平, 陈俊愉, 张启翔, 等. 中国梅侵染的调丛枝菌根调查研究[J]. 园艺学报, 2008, 35(4): 599-602.
Cai Bangping, Chen Junyu, Zhang Qixiang, et al. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(4): 599-602.
- [10] Jakobsen I, Abbott L K, Robosen A D. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. Spread of hyphae and phosphorus inflow into root [J]. *New Phytol*. 1992, 120: 371-380.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 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. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 113-116.
- [13] 杜善周, 毕银丽, 王义, 等. 丛枝菌根对神东煤矿区塌陷地的修复作用与生态效应[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 41-44.
Du Shanzhou, Bi Yinli, Wang Yi, et al. *Science & Technology Review*, 2010, 28(7): 41-44.
- [14] 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐性的作用机制[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 414-420.
He Zhongqun, He Chaoxin, Zhang Zhibin, et al. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(2): 414-420.
- [15] Graham J H, Lindeman R G, Men 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 Phytol*, 1982, 91(2): 183-189.
- [16] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a cal-careous soil [J]. *Plant and Soil*, 1991, 136(1): 41-48.
- [17] Brundrett M C. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: Understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis[J]. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2): 37-77.
- [18] 宋勇春, 冯固, 李晓林. 泡囊丛枝菌根对红三叶草根际土壤磷酸酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 171-175.
Song Yongchun, Feng Gu, Li Xiaolin. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2000, 6(2): 171-175.
- [19] 苏友波, 林春, 王三根. AM 菌根磷酸酶对玉米菌根际土壤磷的影响及其细胞化学定位[J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(2): 115-130.
Su Youbo, Lin Chun, Wang Sangen. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2003, 25(2): 115-130.
- [20] 李晓林, 周文龙, 曹一平. VA 菌根菌丝对紧实土壤中磷的吸收[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(1): 55-60.
Li Xiaolin, Zhou Wenlong, Cao Yiping. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1994(1): 55-60.
- [21] White J A, Brown M F. Uitrastructure and X-ray analysis of phosphorus granules in a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1979, 57(24): 2812-2818.
- [22] Daleo P, Alberti J, Canepuccia A, et al. Mycorrhizal fungi determine salt-marsh plant zonation depending on nutrient supply[J]. *J Ecol*, 2008, 96(3): 431-437.
- [23] 宋福强, 杨国亭, 孟繁荣, 等. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域环境的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 211-216.
Song Fuqiang, Yang Guoting, Meng Fanrong, et al. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 13(2): 211-216.
- [24] 刘灵, 廖红, 王秀荣, 等. 磷有效性对大豆菌根侵染的调控及其与根构型、磷效率的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 564-568.
Liu Ling, Liao Hong, Wang Xiurong, et al. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 564-568.
- [25] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 537-543.
Qian Cheng, Cai Xiaobu, Gai Jingping, et al. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 537-543.

(责任编辑 岳臣)