

DOI: 10.5846/stxb201301280181

马放, 苏蒙, 王立, 张雪, 李世阳. 丛枝菌根真菌对小麦生长的影响. 生态学报, 2014, 34(21): 6107-6114.

Ma F, Su M, Wang L, Zhang X, Li S Y. Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth of wheat. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6107-6114.

丛枝菌根真菌对小麦生长的影响

马 放^{1,2}, 苏 蒙¹, 王 立^{2,*}, 张 雪², 李世阳²

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 哈尔滨工业大学, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了促进经济作物小麦的生长, 提高土壤氮磷循环与转化效率, 选择两种优良丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)——摩西球囊霉 (*GM*, *Glomus mosseae*)、根内球囊霉 (*GI*, *Glomus intraradices*), 研究 AMF 在小麦整个营养生长阶段中对其生长以及对土壤中植物生长需求的大量元素——氮、磷的作用及影响。结果表明: 人工施加菌剂可显著提高 AMF 对小麦的侵染率, 施加 GM 菌剂时, 小麦侵染率提高 24.54%, 同时, 株高提高 14.08%, 小麦地上生物量提高 24.05%。GM 效果优于 GI。施加菌剂后, 小麦侵染率与土壤中水解性氮呈显著正相关; 植物地上生物量与土壤中总氮, 水解性氮呈显著负相关。表明 AMF 可活化土壤中的氮元素, 同时促进作物生长, 强化对土壤中氮元素的利用。

关键词: 丛枝菌根真菌; 菌根依赖性; 小麦; 营养生长; 营养元素

Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth of wheat

MA Fang^{1,2}, SU Meng¹, WANG Li^{2,*}, ZHANG Xue², LI Shiyang²

1 Liaoning University School of Environment, Shenyang 110036, China

2 Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin 150090, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is one of the most widely spread micro-organisms, which could form symbiotic associations with most of the vascular plants in natural or artificial ecosystems. Previous reports revealed that AMF could promote the growth of plant by improving the utilization rate of nutrients of plants. Therefore AMF is receiving more and more attention from domestic and overseas researchers. As a new microbial fertilizer, AMF is expected to play an important role in the reduction of chemical fertilizer and be further used in controlling the pollution in natural water bodies. Wheat is one of the most important economic crops, especially in China, which is the major food crop only behind rice. Therefore, the efforts to maximize the production of wheat by applying the minimum chemical fertilizer have dual significances both in economy and ecology. In this research, we selected two species of native AMF in the field as inocula, GM (*Glomus mosseae*) and GI (*Glomus intraradices*). By investigating the status of wheat in different growth periods, we study the effects of AMF on the utilization rate of nitrogen and phosphorus of wheat and the final effects on the production. The results indicated that the roots of wheat could be infected by AMF in natural field ecosystem, In addition, the artificial application of AMF could significantly improve the infection rate of AMF on wheat. The infection rate could be increased by 24.54% by inoculating GM and 21.93% by GI. Moreover, the height of wheat and the aboveground biomass were increased through inoculating GM by 14.08% and 23.5%, respectively; the height of wheat and aboveground biomass was increased through inoculating GI by 13.57% and 21.7%, respectively. The results also indicated that the plant height and biomass changes comply with logistic curve. According to the curve, we found that AMF could promote plants' growth, particularly on roots. Specifically, the effect of GM was more effective than GI in the present research. The content of phosphorus in soil reached the peak level on the 120th day. The variable quantity of phosphorus in soil without the infliction of AMF is 6.35 mg/kg, and the absorptive amount could be increased by inoculating GM and GI to 11.55 mg/kg and 10.41 mg/kg, respectively. In addition, the content of hydrolytic nitrogen in soil reached the peak level during 120—150 days. However,

基金项目: 国家自然科学基金 (51179041); 水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07201003); 黑龙江省自然科学基金 (E201206); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金 (2012RFLXS026); 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题 (2014TS05)

收稿日期: 2013-01-28; 网络出版日期: 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wli@hit.edu.cn

the variable quantity had been decreased by 16.96 mg/kg by inoculating GM, at the same time, decreased by 14.67 by inoculating GI. Furthermore, there was a significantly positive correlation between the AMF infection rate and the content of hydrolytic nitrogen in the soil. And the aboveground plant biomass was negatively correlated with the content of total nitrogen and hydrolytic nitrogen in the soil. The results demonstrated that AMF could activate the nitrogen in the soil and improve the growth of wheat, benefitting the utilization of nitrogen.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; mycorrhizal dependency; wheat; vegetative growth; nutrient elements

丛枝菌根真菌 (Arbuscula mycorrhizal fungi, AMF) 广泛的分布在土壤中, 对自然环境中植物营养的摄取有着十分重要的作用^[1-2]。其可以在植物根内皮层细胞形成泡囊和丛枝结构, 从而与植物形成互惠互利共生体。在这种共生体系中, 植物为菌根真菌提供需要的碳源和能量, 菌根在根外土壤中形成根外菌丝网, 扩大植物根系吸收范围, 从而提高植物对氮、磷养分和水分的吸收^[3], 改善寄主植物的营养状况^[4-8]。从而促进植株生长^[9-10]。

我国是农业生产大国, 每年化肥施加造成的农业面源污染严重, 利用丛枝菌根真菌对耕作土壤中营养元素的吸收利用来对农业面源污染进行控制是一条有效的途径^[11]。现有各类研究表明, 施加 AMF 菌剂后, 菌根能提高植物对土壤或肥料中养分的利用效果, 从而促进植物的生长^[12-14]。但目前各类研究大多集中于实验研究阶段, 对大田环境, 特别是农业生产种植环境下 AMF 菌剂运用情况的考察十分缺少。因此, 考察在大田环境下, 丛枝菌根真菌对作物的生长状况以及土壤养分情况的影响以及其相关性具有积极意义。

因此, 本研究选择南方主要经济作物——小麦为研究对象, 比较两种土著优势丛枝菌根真菌摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*, GM) 和根内球囊霉 (*Glomus intraradices*, GI), 考察在正常田间管理条件下其对小麦生长的影响以及土壤中氮、磷元素含量的影响。

1 材料和方法

1.1 材料

采用大田实验的方法, 实验地点在江苏省宜兴市和桥镇北新村城市水资源与水环境国家重点实验室“农业清洁生产示范基地 (E: 31°30'07.31, N: 119°52'06.17)”。土壤中总氮含量 185 g/kg, 水解性氮含量 44.38 mg/kg, 总磷含量 0.36 g/kg, 有效磷含量 17.42 mg/kg, pH 6.9。

施肥处理: 播种前施加基肥 (复合肥): 每 666.67 m² 施加 40 kg, 折合每 666.67 m² 施加总氮 6 kg, 每 666.67 m² 施加有效磷 8 kg, 每 666.67 m² 施加有效钾 4 kg; 提苗肥施加尿素, 每 666.67 m² 施加 12.5 kg。折合 666.67 m² 施加 N 5 kg; 2 月末—3 月初施加返青肥尿素, 每 666.67 m² 施加 12.5 kg。折合 666.67 m² 施加 N 5 kg。

供试菌剂: 供试 AMF 为广适菌种——摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*, GM), 根内球囊霉 (*Glomus intraradices*, GI), 由本课题组独立自主培养。以白三叶草为宿主分别对其进行扩繁, 产生的菌剂包括扩繁后产生的相应基质以及植物根段等, 菌剂孢子密度为 130/10 g。

宿主作物: 小麦种子为扬麦 (*Triticum aestivum* Linn) 14 号。

1.2 试验田设计

试验田共九块, 每块大小为 3 m×3 m, 分别接种摩西球囊霉 (GM)、根内球囊霉 (GI) 以及不接菌 (CK) 处理, 每种处理重复 3 次, 小麦播种时, 施加菌剂与小麦种子混合, 其中每小区施加菌剂量为 500 g/小区。每小区之间以 0.5 m 作为间隔, 并用厚度为 2 mm 的防水材料围隔。

1.3 试验方法

菌根侵染率检测方法 选取不同小麦生长周期的根系进行测定, 随机选取各条件中 1—2 cm 长植物根系进行解离与染色, 每个重复观察 100 个根段^[15]。

株高 采用卷尺测量, 每组处理, 测量 9 株小麦的高度。

生物量 包括地上生物量及地下生物量。地下部分洗净泥土, 吸干表面水分后和地上部分 105 °C 杀青 5 min 后 60—80 °C 烘干至恒重, 称量得地上、地下生物量, 两部分之和为总生物量。

菌根依赖性指数 (MD%) = 接菌后植物生物量 (M+) / 未接菌植物生物量 (M-) × 100%

根据 Nemeček^[16] 的分类方法,可将植物的菌根的依赖程度被分为三级,当 MD = 300% 时,为高强度依赖,MD = 200% 时,为中等强度依赖,MD = 100% 时,为弱依赖或无依赖。

土壤有效磷 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定 Olsen-P^[17]。

土壤总磷 消解-钼锑抗分光光度法^[17]。

土壤水解性氮 碱解扩散法^[18]。

土壤总氮 全自动凯氏定氮仪 UDK159^[19]。

1.4 采样方式

按照小麦的生长周期,分别在生长过程中的 30, 60, 120, 150, 180, 210 d 对土壤以及小麦地表植株以及地下根系进行采样。

1.5 数据分析

试验数据采用 Spss19.0 进行差异显著性分析和相关性分析,运用 Matlab, Origin 软件进行曲线绘制及曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 AMF 对小麦侵染效果

GM 与 GI 是两种土著菌根真菌,在自然条件下可与小麦形成菌根,但自然侵染能力较弱,通过人工强化技术可有效促进二者互利共生关系的形成,进而提高植物生长能力(图 1)。

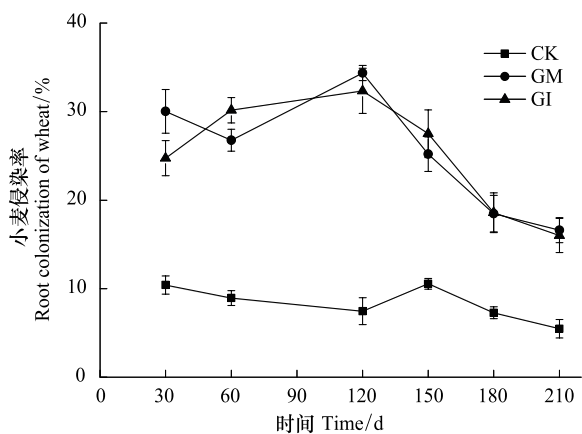


图 1 AMF 对小麦生长周期侵染率的影响

Fig.1 Effects of AMF on root colonization of wheat during the growth cycle

CK: 对照空白; GM: 摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*); GI: 根内球囊霉 (*Glomus mosseae*)

如图 1,人工强化施加菌剂可以显著提高麦田原生环境下 AMF 对小麦的侵染率 ($P < 0.05$)。接菌的小麦侵染率随着小麦的生长过程呈现先升高后降低

的变化。在 120 d 时 GM 侵染率最高 34.36%, GI 的小麦侵染率为 32.34%, 与 CK 相比,分别显著提高小麦侵染率 24.54%, 21.93%。

2.2 AMF 对小麦株高以及生物量的影响以及菌根依赖性的研究

小麦的株高和生物量是反应小麦生长状况的重要指标,考察菌剂强化对小麦生长的影响(图 2, 图 3)。

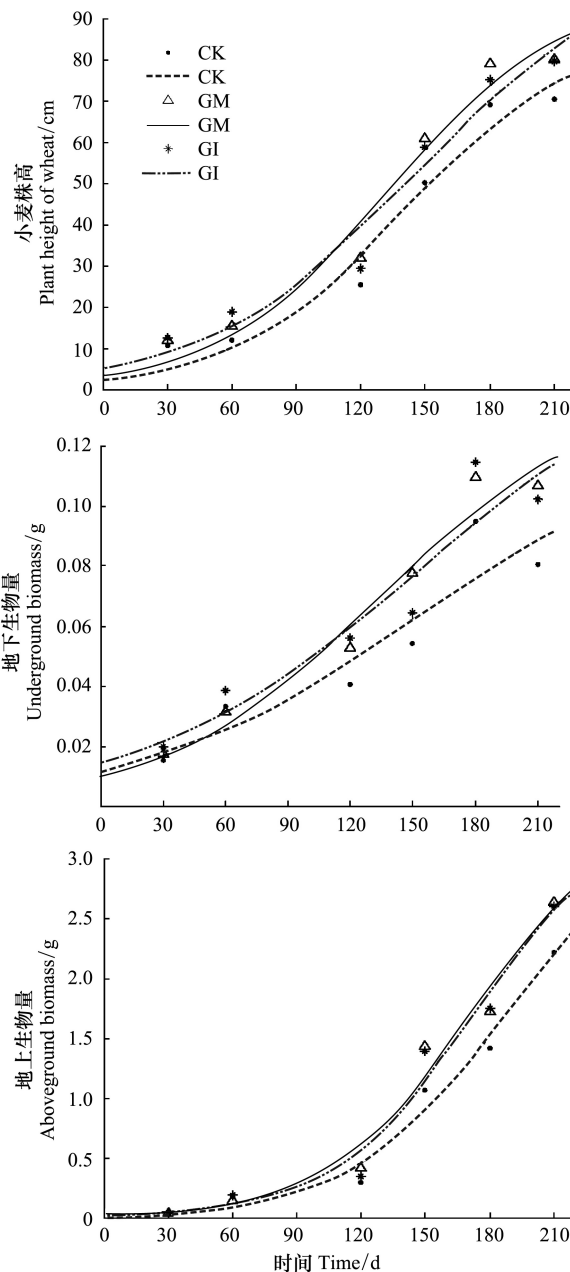


图 2 不同 AMF 侵染对小麦株高,地下生物量和地上生物量的影响

Fig.2 Effects of different AMFs on plant height underground biomass and aboveground biomass of wheat

对小麦生长过程中株高、地上生物量、地下生物量的随时间变化进行的曲线拟合,结果显示不同处

理的小麦的株高以及生物量(图2)均符合 logistic 曲线的变化规律(表1)。

表 1 不同 AMF 菌剂对小麦株高及生物量作用的拟合

Table 1 Fitting equation of wheat height and biomass by different AMF infection

生长性状 Growth characteristics	接种菌 Inoculant	拟合方程 Fitted equation	曲线最大值 K Maximum point	生长高峰期($T = \frac{\ln a}{b}$) Maximum growth period	相关性系数 Correlation coefficient
株高 Plant height	CK	$y_{CK} = \frac{87.3542}{1 + 34.6527e^{-0.0251t}}$	87.3542	141.3	0.9607
	GM	$y_{GM} = \frac{97.7933}{1 + 27.4958e^{-0.0245t}}$	97.793	135.3	0.9679
	GI	$y_{GI} = \frac{106.7411}{1 + 19.4391e^{-0.0201t}}$	106.7411	147.6	0.9650
地上生物量	CK	$y_{CK} = \frac{3.4663}{1 + 166.9512e^{-0.027t}}$	3.4663	189.5	0.9300
Underground Biomass	GM	$y_{GM} = \frac{3.2545}{1 + 221.1346e^{-0.0319t}}$	3.2545	169.2	0.9380
	GI	$y_{GI} = \frac{3.4233}{1 + 166.5727e^{-0.0297t}}$	3.4233	172.2	0.9440
地下生物量	CK	$y_{CK} = \frac{0.1227}{1 + 9.4705e^{-0.0154t}}$	0.1227	147.8	0.9230
Aboveground Biomass	GM	$y_{GM} = \frac{0.1411}{1 + 12.9611e^{-0.0188t}}$	0.1411	136.3	0.9771
	GI	$y_{GI} = \frac{0.1578}{1 + 9.786e^{-0.0149t}}$	0.1578	153.1	0.9417

CK;对照空白;GM(*Glomus mosseae*);摩西球囊霉;GI(*Glomus intraradices*);根内球囊霉

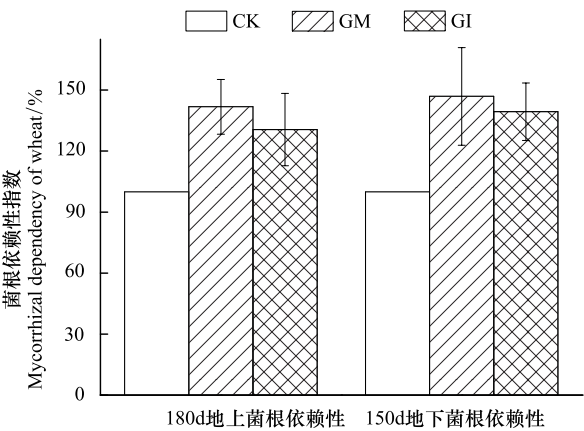


图 3 小麦菌根依赖性

Fig.3 Mycorrhizal dependency of wheat

接种小麦(GM、GI)相对于不接菌(CK),株高在60 d时显著开始提高,最终 GM、GI 接菌处理分别高于 CK 小麦 14.08%和 13.57%,但接种 GM 与 GI 之间

无显著差异。接种 AMF(GM、GI),150 d 时地下生物量的提高幅度分别为 43.3%和 18.9%,180 d 时地上生物量的提高幅度分别为 23.5%和 21.7%。根据对小麦株高及生物量周期变化的拟合方程发现(表1),GM 使小麦地上、地下生物量增长高峰期分别提前 20 d、11 d;GI 使小麦地上生物量增长高峰期提前 17 d。根据拟合方程结果,小麦地上生物量的最高生长时期位于 180 d 前后,地下生物量最快生长时期位于 150 d 前后,小麦根系的快速生长期要先于地上部分。

考察 180d 时小麦的菌根依赖性指数(图3),结果发现,小麦地上和地下对 GM 的菌根依赖指数分别为 123%和 143%,对 GI 的菌根依赖指数分别为 121%和 128%。小麦地下部分对 GM 的依赖性指数更高,由此可以说明小麦根系对 AMF 的菌根依赖性更高。

2.3 AMF 对麦田土壤中 P 素变化的影响

由图 4 可以看出不同处理下,土壤中总磷含量均呈现总体下降的趋势。GM 处理条件下,总磷含量最低为 0.411 g/kg,有效磷含量最高 18.50 mg/kg,60 d(分蘖期)、120 d(拔节期)、210 d(结实期)总磷含量与 CK 相比具有显著性差异($P<0.05$)。有效磷含量在 120 d(拔节期)、180 d(孕穗期)时与 CK 相比具有显著性差异($P<0.05$)。GI 处理土壤总磷最低

含量为 0.416 g/kg,有效磷最低为 15.08 mg/kg,总磷在 60 d(分蘖期)、120 d(拔节期)、210 d(结实期)与 CK 相比具有显著性差异($P<0.05$),有效磷含量在 120 d(拔节期)、180 d(孕穗期)时与 CK 相比具有显著性差异($P<0.05$)。有效磷含量变化最大值发生在 90—120 d,此时 CK 处理的土壤有效磷吸收量为 6.35 mg/kg,GM、GI 处理的土壤有效磷吸收量为 11.55 mg/kg 和 10.41 mg/kg。

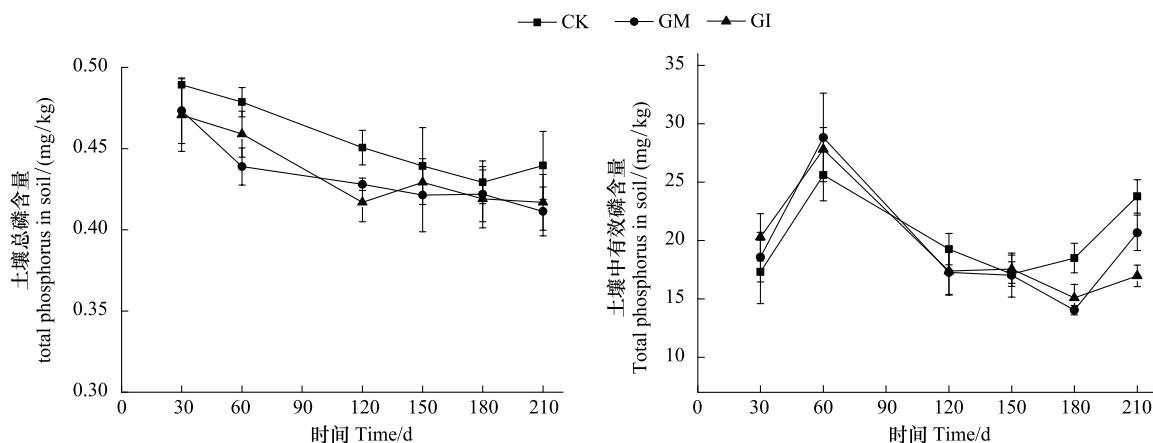


图 4 AMF 对土壤中总磷和有效磷的影响

Fig.4 Effect of different AMFs on total phosphorus (a) and available phosphorus (b) in soil

2.4 AMF 对麦田土壤中 N 素变化的影响

由图 5 可以看出,不同处理土壤中总氮以及水解性氮含量总体呈现下降趋势,随着小麦的生长时期的不同呈现先升高,后降低,然后又逐渐降低的变化规律。其中 GM、GI 处理的小麦各发育阶段土壤的总氮含量均显著低于 CK ($P<0.05$),最终总氮含

量对比 CK 分别降低了 13.1%和 12.6%。在 30d 时,GM、GI 处理的土壤有效氮含量显著高于 CK ($P<0.05$),其中 GM 处理的为 75.38 mg/kg,GI 处理的为 74.34 mg/kg;在 180d 时,施加 GM、GI 的土壤水解性氮含量显著低于 CK 处理($P<0.05$)。在 150 d 时,GM 与 GI 处理之间土壤总氮的含量呈现显著性差异

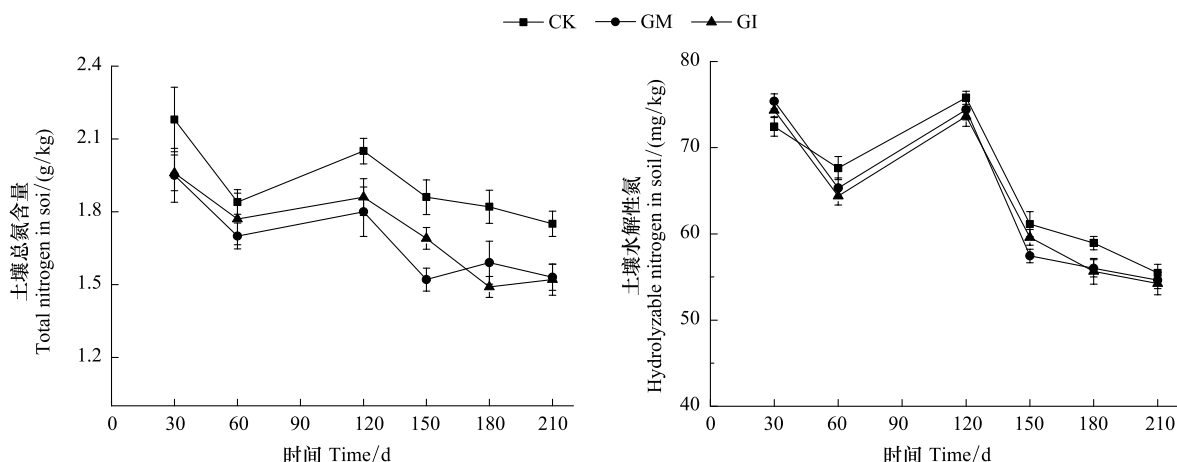


图 5 AMF 对土壤中总氮和水解性氮的影响

Fig.5 Effect of different AMFs on total nitrogen and hydrolyzable nitrogen in soil

($P < 0.05$)。120—150 d 时,土壤水解性氮的变化量最大,其中 CK 处理的土壤变化量为 14.05 mg/kg, GM 处理的土壤变化量为 16.96 mg/kg, GI 处理的土壤变化量为 14.67 mg/kg。

2.5 AMF 侵染率与土壤营养、小麦生物量的相关性
AMF 可以改善土壤养分的有效性,促进作物生长,AMF 的侵染率与土壤中营养元素,特别是土壤中氮素有密切相关性(表 2)。

表 2 小麦生长过程中侵染率与土壤养分及作物生物量的相关系数

Table 2 Correlations among infection rate of wheat, nutrients in soil and crop biomass during the growth of wheat

参数 Parameters	接种菌 Inoculant	侵染率 Colonization rate	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Underground biomass	土壤全氮 Total soil nitrogen	土壤全磷 Soil total phosphorus	土壤水解性氮 Hydrolysable nitrogen	土壤有效磷 Soil available phosphorus
侵染率	GM	1	-0.879 *	-0.799	0.805	0.589	0.819 *	-0.122
Colonization rate	GI	1	-8.11 *	-0.707	0.735	0.528	0.699	-0.498
	CK	1	-0.666	-0.764	0.517	0.307	0.292	-0.353
地上生物量	GM		1	0.888 *	-0.829 *	-0.785	-0.853 *	-0.337
Aboveground biomass	GI		1	0.941 **	-0.906 *	-0.705	-0.878 *	-0.606
	CK		1	0.972 **	-0.761	-0.779	-0.835 *	-0.170
地下生物量	GM			1	-0.768	-0.817 *	-0.898 *	-0.443
Underground biomass	GI			1	-0.941 **	-0.840 *	-0.881 *	-0.702
	CK			1	-0.810	-0.795	-0.818 *	-0.055
土壤全氮	GM				1	0.661	0.915 *	0.088
Total soil nitrogen	GI				1	0.509	0.969 **	0.445
	CK				1	0.640	0.834 *	-0.295
土壤全磷	GM					1	0.756	0.167
Soil total phosphorus	GI					1	0.554	0.734
	CK					1	0.674	-0.269
土壤水解性氮	GM						1	0.082
Hydrolysable nitrogen	GI						1)	0.236
	CK						1	0.321

* 显著相关($P < 0.05$); ** 极显著相关($P < 0.01$)

由表 2 可以发现,随着小麦生长周期的变化,小麦地上生物量、地下生物量与土壤中的总磷、有效磷呈现负相关性,与水解性氮、总氮呈现显著负相关性($P < 0.05$)。小麦丛枝菌根真菌侵染率与土壤中的全氮、全磷、具有正相关性,GM 侵染率与水解性氮极显著正相关($P < 0.05$),并且施加菌剂的小麦,与土壤中全氮、全磷、水解性氮的相关性要高于 CK 处理的小麦。

3 讨论

3.1 AMF 对小麦侵染效果

施加菌剂的小麦侵染率要显著高于非施加菌剂的小麦($P < 0.05$),其中 GM 效果要优于 GI。在小麦的全生长周期内,早期侵染效果较高,由于小麦前期生长活力旺盛,强化的 AMF 菌剂内孢子或孢子果、菌丝、菌根根段等繁殖体远远高于自然生境土壤,而

形成强势侵染,从而可能加强植物根系与菌根真菌之间的共生结合,因此小麦侵染率较高^[20-21],最高点出现在 120 d,后期略有下降。随着小麦的生长,小麦根系木质化程度加强,不利于 AMF 侵染,而且根系面积扩大,均可能导致侵染率降低。

3.2 AMF 对小麦株高以及生物量的影响以及菌根依赖性

接菌处理并没有影响小麦株高以及生物量变化整体规律,但是在其中几个生长阶段会对小麦的株高和生物量有显著提高的效果,说明丛枝菌根真菌具有促进植物生长的作用。通过对整个生长过程的曲线拟合,发现接菌 AMF 会促使小麦最快生长速率时期的提前,其中地下部分的快速生长期要提前与地上部分,而且小麦根系对 AMF 的菌根依赖性高与地上部分,说明了 AMF 通过有效的促进根系发育,进而提高营养吸收范围,以保证植物旺盛生长。同

时经过比较发现 GM 菌剂处理要优于 GI 菌剂处理。

3.3 AMF 对土壤中磷含量影响

GM、GI 处理后的土壤中总磷含量普遍低于 CK 处理的土壤,说明丛枝菌根真菌可以促进植物对土壤中磷素的吸收。土壤中有效磷素的含量随时间变化呈现先升后降的总体趋势。处理初期,由于小麦进入分蘖越冬期,磷能使促使小麦的早分蘖早生根增强小麦的抗寒能力^[22],因此,在土壤中微生物的活化作用下,致使土壤中有效磷含量的增加^[23]。施加菌剂 GM、GI 后,土壤中有效磷含量高于非施加菌剂(CK)的土壤,其原因是丛枝菌根真菌可以分泌有机酸和磷酸酶使总磷中一部分难溶性磷酸盐活化^[13],施加菌剂后,这种活化作用被增强,导致土壤中有效磷含量更高。在小麦生长 120 d 后,土壤中有效磷含量明显降低,这是由于此时小麦处于拔节期,株高生长速率最大,小麦对土壤中有效磷具有较高的需求量。其中,GM、GI 的土壤的有效磷含量低于 CK 的土壤,说明施加菌剂可以促进植物对土壤中有效磷的利用,这与刘进法^[24]等人的研究结果一致。

3.4 AMF 对土壤中氮含量的影响

氮素是植物生长利用的重要元素,施加菌剂(GM、GI)的总氮含量普遍低于非施加菌剂(CK)的总氮含量,表明丛枝菌根真菌会通过根外菌丝^[24]促进植物对土壤中氮的吸收。土壤中的水解性氮主要包括无机氮和一部分可溶性有机氮,本实验结果发现 GM、GI 对可以促进植物对土壤中水解性氮的吸收利用,这一结果与前人的研究结果一致^[12]。本实验中以小麦为宿主植物,接菌 GM 对土壤中氮素的利用明显优于接菌 GI 的土壤,这一结果与徐亚男^[13]对白三叶草的研究结果一致,与李侠^[25]对玉米研究结果不同,这要是由于宿主植物与菌根真菌的共生关系存在选择性,不同的宿主植物对不同菌根真菌的依赖性已经侵染率并不相同,且这种差异将直接影响到土壤中元素的活化和转化效率。

3.5 AMF 侵染率与土壤营养、小麦生物量的相关性

本实验土壤中侵染率与水解性氮之间表现出显著正相关,表明氮素有利于 AMF 的生长。被侵染的土壤中,可以被植物利用的水解性氮的增多会促进植物根系的发育^[26],根系的发育又增强了丛枝菌根真菌的侵染效果。小麦生物量与土壤中总氮以及水解性氮含量之间表现出显著负相关,说明氮素对植

物的生长起着十分重要的作用。施加菌剂(GM、GI)的小麦生物量与土壤中总氮含量呈现显著负相关变化,但未施加菌剂(CK)的小麦生物量并未与土壤总氮呈现出显著相关性,这主要是由于丛枝菌根真菌加强了对植物对土壤中各类形态氮素的利用^[27],进而加强小麦生物量与土壤中总氮的相关性。

4 结论

(1)施加 AMF 菌剂可以显著提高小麦的菌根侵染率。

(2)接种 AMF 可以有效提高小麦的株高以及生物量。

(3)AMF 可以改善小麦根际土壤养分,促进小麦对土壤氮素的吸收利用。

(4)GM 接菌处理效果优于 GI 接菌处理,更为适合作为人工强化菌剂使用。

References:

- [1] Mohammad A, Mitra B, Khan A G. Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorus levels in the field. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 103(1): 245-249.
- [2] Li H, Ye Z H, Chan W F, Chen X W, Wu F Y, Wu S C, Wong M H. Can arbuscular mycorrhizal fungi improve grain yield, as uptake and tolerance of rice grown under aerobic conditions? *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2537-2545.
- [3] Zhang Y T, Zhu M, Xian Y X W, Shen H, Zhao J, Guo T. Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7091-7101.
- [4] Jones M D, Durall D M, Tinker P B. A comparison of arbuscular and ectomycorrhizal *Eucalyptus coccifera*: growth response, phosphorus uptake efficiency and external hyphal production. *New Phytologist*, 1998, 140(1): 125-134.
- [5] Pairunan A, Robson A D, Abbott L K. The effectiveness of vesicular-arbuscular mycorrhizas in increasing growth and phosphorus uptake of subterranean clover from phosphorus sources of difference solubilities. *New Phytologist*, 1980, 84: 237-338.
- [6] Rai M, Acharya D, Singh A, Varma A. Positive growth responses of the medicinal plants *Spilanthes calva* and *Withania somnifera* to inoculation by *Piriformospora indica* in a field trial. *Mycorrhiza*, 2001, 11(3): 123-128.
- [7] Gyuricza V, Dupre de Boulois H. Effect of potassium and phosphorus on the transport of radio cesium by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, 101(6): 482-487.
- [8] Zakaria S M, Hirata H. Effects of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in paddy fields on rice growth and N, P, K nutrition under different water regimes. *Soil Science and Plant*

- Nutrition, 1995, 41(3): 505-514.
- [9] Shrestha Y H, Ishii T, Kadoya K. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis, transpiration and the distribution of photosynthates of bearing satsuma mandarin [*Citrus reticulata*] trees. *Journal of Japanese Society of Horticultural Science*, 1995, 64(3): 517-525.
- [10] Chinnusamy M, Kaushik B D, Prasanna R. Growth nutritional and yield parameters of wetland rice as influenced by microbial consortia under controlled conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(5): 857-871.
- [11] Wang L, Jia W Q, Ma F, Li S Y, Zhang S J. Perspective of mycorrhizal technology application for environmental remediation. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2): 487-493.
- [12] Zhang X, Wang L, Ma F, Zhang S J, Xu Y N, Li Z, Fu S J. Effects of nitrogen and biological fertilizer coupling on rice resource utilization. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(8): 39-42.
- [13] Wang L, Xu Y N, Ma F, Zhang S J, Zhang X, Li Z. Effect of different AMF microbial inoculum on the growth of *Trifolium repens* lawn. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(10): 43-47.
- [14] Wu T, Tan Z Y. Vesicular arbuscular Mycorrhiza and its function on Phosphorus in Soil. *Hunan Agricultural Sciences*, 2005, (2): 41-43.
- [15] Liu R J, Chen Y L. *Mycorrhizology*. Beijing: Science Press, 2007: 79-82.
- [16] Nemec S. Response of six citrus rootstocks to three species of *Glomus*, a mycorrhizal fungus. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 1978, 91: 10-14.
- [17] Du S, Gao X Z. Technical specification for soil analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 52-58.
- [18] Du S, Gao X Z. Technical specification for soil analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 42-44.
- [19] Bao S D. Analysis of Soil Agrochemical. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 147-148.
- [20] Ding L, Bai K Z. Effect of atmospheric CO₂ increase on root nodules and mycorrhizal activity. *Journal of Hubei Institute for Nationalities*, 1997, 15(3): 6-9.
- [21] Zhang S J, Wang L, Ma F, Li S Y, Zhang X, Wu J T. Application of arbuscular mycorrhiza on promoting the growth of rice and reducing the usage of chemical fertilizer. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(6): 958-962.
- [22] Liang Y L, Kang S Z. Effect of irrigating-limited and phosphorus supplied on yield and water use of winter wheat. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(1): 60-67.
- [23] Li X Y, Zhao B Q, Li X H, Li Y T, Sun R L, Zhu L S, Xu J, Wang L X, Li X P, Zhang F D. Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [24] Liu J, Xia R, Wang M Y, Wang P, Ran Q, Luo Y. Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on AlPO₄ uptake by *Poncirus trifoliata*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2155-2160.
- [25] Li X, Zhang J L. Uptake of different forms of nitrogen by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2007, 21(2): 195-200.
- [26] Shi J W, Wang M B, Yu L Z, Zhang Y P, Zhang G M. Effects of soil available nitrogen and related factors on plant fine root. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10): 1634-1639.
- [27] Deng Y, Shen H, Guo T. Review of researches on nitrogen utilized by arbuscular mycorrhizal. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5627-5635.

参考文献:

- [3] 张宇亭, 朱敏, 线岩相注, 申鸿, 赵建, 郭涛. 接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响. *生态学报*, 2012, 32(22): 7091-7101.
- [11] 王立, 贾文奇, 马放, 李世阳, 张淑娟. 菌根技术在环境修复领域中的应用及展望. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 487-493.
- [12] 张雪, 王立, 马放, 张淑娟, 徐亚男, 李哲, 傅生杰. 生物肥氮肥耦合对水稻资源利用的影响. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(8): 39-42.
- [13] 王立, 徐亚男, 马放, 张淑娟, 张雪, 李哲. 不同 AMF 菌剂对白三叶草坪的扶壮作用. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(10): 43-47.
- [14] 吴铁, 覃照宇. VA 菌根及其对土壤中磷的作用. *湖南农业科学*, 2005, (2): 41-43.
- [15] 刘润进, 陈应龙. 菌根学. 北京: 科学出版社, 2007: 79-82.
- [17] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范. 北京: 中国农业出版社, 2006: 52-58.
- [18] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范. 北京: 中国农业出版社, 2006: 42-44.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 147-148.
- [20] 丁莉, 白克智. 大气 CO₂ 浓度增加对根瘤和菌根活动的影响. *湖北民族学院学报: 自然科学版*, 1997, 15(3): 6-9.
- [21] 张淑娟, 王立, 马放, 李世阳, 张雪, 吴洁婷. 丛枝菌根 (AM) 对水稻生长促进及化肥减量研究. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(6): 958-962.
- [22] 梁银丽, 康绍忠. 限量灌水和磷营养对冬小麦产量及水分利用的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(1): 60-67.
- [23] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 李燕婷, 孙瑞莲, 朱鲁生, 徐晶, 王丽霞, 李小平, 张夫道. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [24] 刘进法, 夏仁学, 王明元, 王鹏, 冉青青, 罗园. 接种丛枝菌根真菌对枳吸收利用磷酸铝的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2155-2160.
- [25] 李侠, 张俊伶. 丛枝菌根根外菌丝对不同形态氮素的吸收能力. *核农学报*, 2007, 21(2): 195-200.
- [26] 史建伟, 王孟本, 于立忠, 张育平, 张国明. 土壤有效氮及其相关因素对植物细根的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1634-1639.
- [27] 邓胤, 申鸿, 郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展. *生态学报*, 2009, 29(10): 5627-5635.