

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
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	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11	

封面图说:水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110251582

张宇亭, 朱敏, 线岩相洼, 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.

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.

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

张宇亭, 朱 敏, 线岩相洼, 申 鸿, 赵 建, 郭 涛*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:在温室盆栽条件下,分别模拟单作、间作和尼龙网分隔种植,比较接种丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌 *Glomus intraradices* 和 *Glomus mosseae* 对菌根植物玉米和非菌根植物油菜生长和磷吸收状况的影响,并分析土壤中各无机磷组分的变化。结果发现,接种 AM 真菌可以促进土壤中难溶性磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P)向有效态磷转化,并显著降低总无机磷含量 ($P<0.05$),显著提高菌根植物玉米的生物量和磷吸收量 ($P<0.05$),特别是在间作体系中使玉米的磷营养竞争比率显著提高了 45.0%—104.1% ($P<0.05$),显著降低了油菜的生物量和磷吸收量 ($P<0.05$),从而增强了菌根植物的竞争优势,降低了非菌根植物与菌根植物的共存能力。揭示了石灰性土壤中 AM 真菌对植物物种多样性的影响,有助于更加全面地理解 AM 真菌在农业生态系统中的作用。

关键词: 石灰性土壤;种间竞争;无机磷组分;丛枝菌根真菌

Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms

ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, SHEN Hong, ZHAO Jian, GUO Tao*

College of Resources and Environment, Southwest University, Tiansheng Road 1, Chongqing 400716, China

Abstract: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) form mutualistic associations with more than 85% of terrestrial plant species and play key roles in nutrient cycling and ecosystem functioning. Most plant individual stimulates nutrient availability through their fungal partner. Highly mycorrhizal-dependent plant species derive more benefits from AMF in comparison to low mycorrhizal dependency plant species. But the effects of AMF on the competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants remained largely unclear, particularly in an environment with low phosphate bioavailability. The increased phosphate availability for host plants and enhanced plant phosphorus nutrition is a major outcome of the AM symbiosis and then AMF colonization could and consequently increase plant biomass. The larger plants are then expected to be successful competitors.

In our previous, AMF colonization significantly decreased phosphorus concentration and content of rape roots compared with non-inoculation treatments, while in contrast mycorrhizal association improved phosphorus nutrition of maize plants. The results clearly showed the beneficial effects of mycorrhizal associations on AMF host plants in competition with non-host plants. In this previous research, plants were cultivated in purple soil with higher phosphorus availability which is more important as this determined the effect of AMF inoculation on host plant P nutrition. Then in this research, calcareous

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJK2010B012)

收稿日期:2011-10-25; 修订日期:2012-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guotaosd@swu.edu.cn

fluvo-aquic soil with lower phosphorus availability was used and different form of inorganic phosphorus were measured to reveal the effect of AMF inoculation on competition between mycorrhizal plant and non-mycorrhizal plants species.

Maize (*Zea mays* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants were cultivated in three different interaction patterns, namely intraspecific (monoculture), interspecific (intercropping) and no interaction (nylon net split). All plants were inoculated with *Glomus intraradices*, *Glomus mosseae* or remained uninoculated. The strength of competition was measured as the reduction in biomass caused by the presence of a competitor. The results showed that AMF inoculation decreased soil inorganic phosphate significantly and transformed more $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P into higher availability phosphorus form. In the intercropping treatment, the inoculation improved the plant growth and phosphorus uptake of maize, and meanwhile decreased the growth and phosphorus uptake of rape significantly. Our results clearly showed the strong competitive strength and phosphorus competitive strength of maize to rape, and the beneficial effects of mycorrhizal associations was due to the favorable growth of host plants over non-host plants. It reveals that AM fungus may play an important role in structuring plant community and needs a comprehensive insight to understand the effect of AM fungus on plant biodiversity in ecosystems.

Key Words: calcareous soil; interspecific competition; inorganic P forms; arbuscular mycorrhizal fungus

磷作为植物生长发育的必需营养元素之一,其在土壤中的化学有效性很低。石灰性土壤作为典型的有效磷缺乏土壤,无机磷组分分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和闭蓄态磷(O-P)等6种类型,其中被视为植物无效磷源或潜在磷源的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 分别占到了70%和10%,而植物有效和缓效磷源仅占20%^[1]。自然生态系统中,植物可以调节其自身的生命活动过程来适应低磷环境^[2],由于物种差异及植物的生态适应性,菌根植物和非菌根植物对土壤磷营养的吸收利用机制有明显的差别。大量研究表明,丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌能与自然界大部分植物建立共生关系,帮助植物有效利用土壤中难溶态磷^[3-7],如 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P ,改善宿主植物磷养分状况。非菌根作物在获取土壤有效养分上有其特有机理,如油菜(*Brassica napus* L.)的根系在缺磷条件下通过加大有机酸分泌量来降低土壤pH值,使磷酸钙的溶解度提高,增加土壤有效磷含量^[8-11]。此外,AM真菌通过调控宿主植物的生理状况和养分的资源获取能力,可以进而转变为生态系统效应^[12],使生态系统中不同植物的生物量发生改变^[13],且在提高宿主植物获取无机养分资源的同时,还能通过影响植物竞争关系的模式和强度来间接影响植物群落结构^[14-20]。

国内外学者在研究AM真菌对植物种间竞争的影响中,多集中在能与AM真菌形成共生关系的植物^[15-16,18-19]或非菌根突变体^[21]上进行研究,而对菌根植物和磷高效的非菌根植物种间竞争关系的研究较少。本研究通过将玉米和油菜在石灰性土壤上进行不同模式的种植,研究接种不同AM真菌对土壤各无机磷形态和植物磷吸收量的影响,以期阐明AM真菌影响石灰性土壤无机磷组分及菌根植物和非菌根植物竞争关系中的作用。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试植物:玉米 *Zea mays* L. (东单80号)和油菜 *Brassica napus* L. (渝油23)。挑选大小一致颗粒饱满的种子,用10% H_2O_2 浸泡消毒10 min,用去离子水冲洗3次并浸泡5 h(玉米)或1 h(油菜)后均匀铺于湿润滤纸上,于25℃恒温培养箱中催芽。出芽1 d后播种。

供试土壤:供试土壤为石灰性潮土,土壤经121℃湿热灭菌处理2 h,其基本理化性质为有机质7.41 g/kg,全氮0.30 g/kg,碱解氮12.93 mg/kg,全磷0.75 g/kg,有效磷16.29 mg/kg,全钾17.52 g/kg,pH(H_2O)8.1。供试土壤各无机磷组分含量如表1所示:

供试菌种:*Glomus mosseae* (*G. m*)和*Glomus intraradices* (*G. i*)。两个菌种接种剂均来自中国农业大学资源环境学院,接种剂含有AM真菌孢子、菌丝片段、侵染根段,孢子密度>10个/g。

表 1 供试土壤中各级无机磷含量

Table 1 Content of inorganic P forms in soils

Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Ca ₁₀ -P		Al-P		Fe-P		O-P		总无机磷 Total /(mg/kg)
Content /(mg/kg)	C/T /%	Content /(mg/kg)	C/T /%	Content /(mg/kg)	C/T /%	Content /(mg/kg)	C/T /%	Content /(mg/kg)	C/T /%	Content /(mg/kg)	C/T /%	
6.53	1.13	42.57	7.37	398.06	68.92	15.63	2.71	34.37	5.95	80.38	13.92	577.54

C/T 表示各形态无机磷含量占无机磷总量的百分数

1.2 试验设计

试验为二因素试验设计,因素一为种植方式,因素二为接种处理。试验容器选用塑料花盆(高 15.5 cm,外直径 22.5 cm)(图 1),将塑料花盆从中间分隔开,用聚氯乙烯粘合剂将尼龙网或塑料布粘在中间,并用密封胶密封使其不漏水,从而将盆分隔成两个根室,将玉米和油菜分别种植于 3 种不同的模式下:① 间作模式(不分隔);② 尼龙网分隔种植模式(两植物根系用 30 μm 尼龙网分隔);③ 单作模式(塑料布完全分隔)。不同



图 1 3 种不同种植模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three different cropping patterns

接种处理包括:对照、接种 *G. m*、接种 *G. i*,按土壤质量的 10% 加入接种剂。单作和尼龙网分隔处理接种时两个根室分别装土 1600 g,并加入 160 g 接种剂,间作种植模式装土 3200 g,接种剂 320 g,对照处理加入相同重量的已灭菌接种剂(121 °C 湿热灭菌 2 h)。试验共计 9 个处理,每个处理重复 4 次。各处理均施加 NH₄NO₃ 氮肥(N 50 mg/kg),播种玉米 4 颗、油菜 10 颗,玉米生长 1 周、油菜生长 2 周后,以生长势一致为依据间留苗各 2 株。此外,为使土壤含水量保持在田间持水量的 70%,每个根室浇水 276 mL,并每天补充水分。试验在西南大学植物营养光照培养室进行,每天用生物镉灯补充光照,人工控制光照时间(13 h/d)。

1.3 样品分析

作物生长 70 d 后收获,地上部和地下部分开,依颜色和形态的不同认真区分土壤中两种植物的根系,具体方法为:将土壤轻轻拍打疏松,尽量减少根系的人为断裂,先找出油菜主根,顺油菜主根挑出须根(颜色发白较为细小),而玉米根系颜色发黄且较粗,依此可挑选出两植物 95% 以上的根系,用水清洗干净。取鲜根 1 g 并剪成 1 cm 长根段,测定根系侵染率。剩下的样品 105 °C 杀青半小时后 70 °C 烘干,用于生物量及 P 的测定。将各处理土样混匀后风干备用。

供试土壤的基本理化性质均采用常规分析方法进行测定,pH 值的测定土水比为 1:2.5;植物样品的磷含量采用钒钼黄比色法进行测定^[22],磷吸收量为植物磷含量和生物量的乘积;菌根侵染率采用方格交叉法测定^[23];土壤无机磷的测定采用蒋柏藩、顾益初石灰性土壤无机磷分级方法^[22]。

1.4 数据处理

应用 SAS 软件(Version 6.12; SAS Institute, Cary, NC)对试验数据进行二因素统计分析,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。

种间相对竞争能力是衡量一种作物相对另一种作物对资源竞争能力大小的指标^[24]。以作物 a 相对作物 b 为例,当 $A_{ab} > 0$,表明 a 竞争能力强于 b;当 $A_{ab} < 0$,表明 b 竞争能力强于 a。计算公式为:

$$A_{ab} = \frac{Y_{ia}}{Y_{sa} \cdot Y_{ia}} - \frac{Y_{ib}}{Y_{sb} \cdot Y_{ib}}$$

式中, Y_{ia} 、 Y_{sa} 、 Y_{ib} 、 Y_{sb} 分别表示间作物 a、单作物 a、间作物 b、单作物 b 的生物量; Z_{ia} 、 Z_{ib} 分别表示作物 a 和 b 在间作种的面积比例(在本试验中二者均为 1:1)。

竞争比率是用来表示间作中作物 a 相对于作物 b 对某一养分竞争能力的大小。它是作物竞争养分能力的定量化描述^[25],可以用来检验处理对养分竞争的影响^[21]。公式为:

$$CR_{ar} = \frac{PU_{ia} \cdot F_a / PU_{sa}}{PU_{ib} \cdot F_b / PU_{sb}}$$

式中, PU_{ia} 和 PU_{ib} 分别为作物 a 和作物 b 在间作中磷的吸收量; PU_{sa} 和 PU_{sb} 分别为作物 a 和作物 b 在单作中磷的吸收量; F_a 和 F_b 分别表示作物 a 和作物 b 间作的密度相对于单作的比例(本试验中二者均为 1:1)。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率和植株生长状况

试验结果表明(表 2), 无论接种 AM 真菌与否都未观察到油菜根系的 AM 真菌侵染结构, 不接种处理也没有观察到玉米根系的 AM 真菌侵染现象, 而接种 *G. i* 和 *G. m* 的玉米均可观察到 AM 真菌侵染, 侵染率分布在 48%—62% 之间。不同种植方式下玉米根系的 AM 真菌侵染率有所不同, 大小依次是: 单作 > 尼龙网分隔 > 间作。与单作处理相比, 间作处理接种 *G. i* 和 *G. m* 的玉米根系 AM 真菌侵染率分别降低了 17.4% 和 22.2% ($P < 0.05$)。即在此试验条件下, 菌根植物和非菌根植物间作, 出现了菌根植物根系 AM 真菌侵染率降低的现象。

由二因素方差分析可知, 玉米和油菜的生物量均受到接种处理和种植方式的极显著影响 ($P < 0.001$)。相对于不接种处理, 接种 AM 真菌均显著提高了菌根植物地上部和地下部的干重, AM 真菌对玉米的促生作用大小依次为间作 > 尼龙网分隔 > 单作。间作种植模式下, 接种 *G. i* 和 *G. m* 后玉米地上部干重相较对照分别显著提高了 88.0% 和 67.1%, 地下部干重也分别显著提高了 89.8% 和 79.6%。间作种植和尼龙网分隔种植模式下, 接种 AM 真菌显著降低油菜植株地上部和地下部的干重, 间作种植模式下的降低幅度高于尼龙网分隔种植。说明在此试验条件下, 接种 AM 真菌促进间作体系中菌根植物(玉米)生长的同时, 抑制了非菌根植物(油菜)的生长。

表 2 不同种植模式和接种处理条件下的菌根侵染率和植株干重

Table 2 Root colonization rate (%) and dry weight of plants under different cropping patterns and mycorrhizal inoculation treatments

种植模式和接种处理 Cropping pattern and mycorrhizal inoculation	侵染率/% Root colonization rate		玉米干重/(g/盆) Dry weight of maize		油菜干重/(g/盆) Dry weight of Rape	
	玉米 Maize	油菜 Rape	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
间作 Intercropping						
CK	ND b	ND	7.98±0.84 b	2.96±0.34 b	3.65±0.26 a	0.47±0.08 a
+ <i>G. i</i>	49.54±4.36 a	ND	15.00±1.40 a	5.61±0.57 a	1.58±0.48 b	0.20±0.09 b
+ <i>G. m</i>	48.01±4.39 a	ND	13.33±0.96 a	5.31±0.31 a	1.80±0.36 b	0.24±0.01 b
平均值 Mean	32.52 B		12.10 A	4.63 A	2.34 B	0.30 B
尼龙网分隔 Mesh barrier						
CK	ND b	ND	7.89±0.36 b	2.53±0.14 b	4.32±0.26 a	0.75±0.07 a
+ <i>G. i</i>	55.69±3.51 a	ND	13.30±0.37 a	4.06±0.16 a	3.17±0.19 b	0.45±0.04 b
+ <i>G. m</i>	53.48±3.08 a	ND	12.71±1.07 a	4.21±0.37 a	3.25±0.19 b	0.51±0.02 b
平均值 Mean	36.39 AB		11.30 B	3.60 B	3.58 A	0.57 A
单作 Monocropping						
CK	ND b	ND	8.09±0.32 b	2.54±0.08 b	3.81±0.25 a	0.58±0.13 a
+ <i>G. i</i>	59.96±3.39 a	ND	10.89±0.40 a	3.26±0.06 a	3.73±0.52 a	0.55±0.12 a
+ <i>G. m</i>	61.70±3.30 a	ND	11.91±0.72 a	3.41±0.27 a	3.74±0.64 a	0.54±0.13 a
平均值 Mean	40.55 A		10.30 C	3.07 C	3.76 A	0.56 A
方差分析 Significance due to:						
种植模式 Cropping pattern	* * *		* * *	* * *	* * *	* * *
接种处理 Inoculation	* * *		* * *	* * *	* * *	* * *
接种处理×种植模式 Inoculation × Cropping pattern	*		* * *	* * *	* * *	*

ND 表示无菌根真菌侵染; 不同小写字母表示同一种种植模式下不同接种处理在 $P = 0.05$ 水平差异显著性; 不同大写字母表示不同种植模式处理的平均值在 $P = 0.05$ 水平差异显著性; * $P = 0.05$ 水平显著性差异, ** 表示在 $P = 0.01$ 水平显著性差异, *** 表示在 $P = 0.001$ 水平显著性差异, NS 表示不显著

2.2 植株磷营养状况

如表 3 所示,与不接种对照相比,接种 AM 真菌处理玉米地上部和根系吸磷量均显著提高,促进作用大小依次为间作>尼龙网分隔>单作,其中间作种植模式下接种 *G. i* 和 *G. m* 处理玉米地上部吸磷量分别提高了 46.1% 和 23.0% ($P<0.05$),地下部吸磷量也分别提高了 38.1% 和 46.4% ($P<0.05$)。但在 3 种不同种植模式中,玉米地上部和根系磷含量分别显著降低了 14.5%—28.2% 和 9.0%—27.6%,这应是植株生物量提高比率高于磷吸收量提高比率而造成的稀释作用。

相反,在间作种植和尼龙网分隔种植模式下,与不接种的对照相比,接种 AM 真菌处理油菜地上部和根系磷贮存量均显著降低,且间作种植模式显著低于尼龙网分隔种植,其中间作种植模式下接种 *G. i* 和 *G. m* 油菜地上部吸磷量分别降低了 35.5% 和 29.5% ($P<0.05$),地下部吸磷量也分别降低了 47.2% 和 35.4% ($P<0.05$)。但在这两种模式下,地上部和根系磷含量均显著升高 ($P<0.05$),这可能是由于 AM 真菌影响了非菌根植物的正常生长,较低生物量下表现出了较高的磷含量。

表 3 不同处理条件下玉米和油菜地上部、根系磷含量磷吸收量

Table 3 phosphorus concentration and phosphorus uptake in maize and rape plants

种植模式和接种处理 Cropping pattern and mycorrhizal inoculation	玉米磷营养 P nutrition in maize			
	含量 Concentration/%		吸收量 Uptake/(mg/盆)	
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
间作 Intercropping				
CK	0.15±0.008a	0.11±0.005a	11.94±0.6c	3.34±0.27b
+ <i>G. i</i>	0.12±0.009b	0.08±0.005c	17.44±1.00a	4.60±0.59a
+ <i>G. m</i>	0.11±0.003b	0.09±0.005b	14.69±0.89b	4.88±0.23a
平均值 Mean	0.13 A	0.10 A	14.69 A	4.27 A
尼龙网分隔 Mesh barrier				
CK	0.14±0.006a	0.10±0.005a	10.98±0.81c	2.45±0.06b
+ <i>G. i</i>	0.11±0.007b	0.08±0.007b	14.25±0.79a	3.43±0.36a
+ <i>G. m</i>	0.10±0.012b	0.07±0.007c	12.94±0.74b	3.11±0.46a
平均值 Mean	0.12 B	0.09 B	12.73 B	3.00 B
单作 Monocropping				
CK	0.12±0.004a	0.08±0.003a	9.50±0.50 c	1.98±0.06b
+ <i>G. i</i>	0.10±0.005b	0.07±0.001b	10.56±0.61b	2.25±0.02a
+ <i>G. m</i>	0.10±0.003b	0.07±0.005b	11.94±0.74a	2.42±0.28a
平均值 Mean	0.10 C	0.07 C	10.67 C	2.22 C
方差分析 Significance due to:				
种植模式 Cropping pattern	* * *	* * *	* * *	* * *
接种处理 Inoculation	* * *	* * *	* * *	* * *
接种处理×种植模式 Inoculation×Cropping pattern	*	* * *	* * *	* *
油菜磷营养 P nutrition in rape				
种植模式和接种处理 Cropping pattern and mycorrhizal inoculation	含量 Concentration/%		吸收量 Uptake/(mg/盆)	
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
间作 Intercropping				
CK	0.22±0.020b	0.20±0.005b	7.89±1.04a	0.95±0.16a
+ <i>G. i</i>	0.33±0.044a	0.25±0.010a	5.09±1.07b	0.50±0.20b
+ <i>G. m</i>	0.31±0.019a	0.26±0.022a	5.56±0.97b	0.62±0.06b
平均值 Mean	0.29 A	0.24 A	6.18 C	0.69 B
尼龙网分隔 Mesh barrier				
CK	0.19±0.007b	0.18±0.016b	8.11±0.55a	1.33±0.14a

续表

种植模式和接种处理 Cropping pattern and mycorrhizal inoculation	油菜磷营养 P nutrition in rape			
	含量 Concentration/%		吸收量 Uptake/(mg/pot)	
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
+ <i>G. i</i>	0.22±0.016a	0.21±0.014a	6.90±0.54b	0.93±0.14b
+ <i>G. m</i>	0.22±0.026a	0.20±0.006a	7.15±0.55b	1.03±0.03b
平均值 Mean	0.21 C	0.20 B	7.39 B	1.10 A
单作 Monocropping				
CK	0.24±0.015a	0.19±0.013a	9.07±0.75a	1.10±0.18a
+ <i>G. i</i>	0.24±0.016a	0.20±0.009a	8.80±1.07a	1.07±0.26a
+ <i>G. m</i>	0.24±0.022a	0.19±0.028a	8.90±1.85a	1.03±0.39a
平均值 Mean	0.24 B	0.19 B	8.92 A	1.06 A
方差分析 Significance due to:				
种植模式 Cropping pattern	***	***	***	***
接种处理 Inoculation	***	***	**	**
接种处理×种植模式 Inoculation×Cropping pattern	***	**	NS	NS

2.3 植株竞争能力和对磷养分的竞争比率

由图 2 所示,未接种 AM 真菌时,玉米的竞争能力高于油菜,接种 *G. i* 和 *G. m* 后其竞争能力分别提高了 1065.7% 和 729.9% ($P<0.05$)。无论接种 AM 真菌与否,玉米相对油菜对磷营养的竞争比率均大于 1,表明在石灰性土壤中玉米对磷的竞争能力要强于油菜,接种 *G. i* 和 *G. m* 后,玉米相对油菜对磷的竞争比率分别提高了 104.1% 和 45.0% ($P<0.05$)。说明在石灰性土壤中,玉米的竞争能力和对磷的竞争比率均强于油菜,接种 AM 真菌可以显著提高玉米的竞争能力和对磷养分的竞争比率。并且,*G. i* 的作用要优于 *G. m*。相对于 *G. m*,接种 *G. i* 后玉米相对油菜的竞争能力和磷养分竞争比率分别提高了 28.8% 和 29.0% ($P<0.05$)。

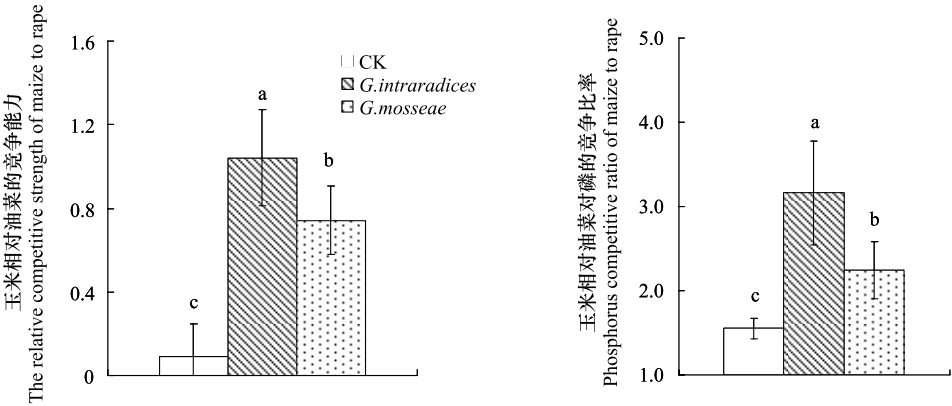


图 2 玉米相对于油菜的竞争能力和对磷养分的竞争比率

Fig.2 The relative competitive strength and phosphorus competitive ratio of maize Intercropping with rape

2.4 土壤无机磷动态

2.4.1 土壤无机磷含量

各处理石灰性土壤中各形态无机磷含量以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主, 占总无机磷含量的 67.3%—72.8%; 其次为 O-P, 占土壤中无机磷总量的 12.0%—14.5%; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P 和 Al-P 含量均低于无机磷总量的 8.0%; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最低, 仅占无机磷总量的 1% 左右(表 4)。

在间作模式下, 接种 AM 真菌处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、O-P 和总无机磷含量均低于未接种对照处理, 而 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 含量均高于未接种对照处理; 接种 *G. i* 和 *G. m* 处理土壤总无机磷含量分别显著低于未接

种对照 4.6% 和 8.2% ($P<0.05$)。

菌根植物和非菌根植物用尼龙网分隔种植后,在玉米室的土壤中,接种 AM 真菌后 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和总无机磷含量均显著低于未接种对照处理,而 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 O-P 含量有高于未接种对照处理的趋势,并且接种 AM 真菌的土壤的总无机磷含量均显著低于未接种对照处理 3.0% ($P<0.05$)。在油菜室的土壤中,土壤中的无机磷变化因接种不同 AM 真菌而有所不同:接种 *G. i* 后 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、 O-P 和总无机磷含量均显著低于未接种对照处理,而 Fe-P 含量显著高于未接种对照处理,并且土壤的总无机磷含量显著低于未接种对照处理的 5.0% ($P<0.05$);接种 *G. m* 后 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 含量均显著低于未接种对照处理,而 Al-P 、 Fe-P 含量显著高于未接种对照处理的土壤。

玉米单作种植后的土壤中,接种 AM 真菌后 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 和总无机磷含量均显著低于未接种对照处理,而土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 含量有显著高于未接种对照处理的趋势,并且接种 *G. i* 和 *G. m* 后土壤的总无机磷含量分别显著低于未接种对照处理 6.0% 和 3.5% ($P<0.05$)。非菌根植物(油菜)单作种植后的土壤中,接种 AM 真菌后各形态的无机磷和总无机磷含量与未接种对照处理相比均没有明显的差异 ($P<0.05$)。

表 4 不同处理条件下土壤中各形态无机磷含量

Table 4 Content of inorganic P forms in soils of different treatment

土壤分室 Different room of soil	不同形态无机磷含量 Content of inorganic P forms/(P, mg/kg)						总无机磷 Total/(P, mg/kg)
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	
间作 Intercropping							
CK	5.06±0.28a	23.58±3.59b	388.84±11.51a	12.98±0.51b	30.38±0.66b	77.93±1.70a	538.77±10.41a
+ <i>G. i</i>	4.11±0.19b	25.32±2.54b	361.90±22.20ab	14.39±0.76a	32.87±0.60a	75.20±2.39a	513.79±19.63b
+ <i>G. m</i>	4.36±0.25b	34.32±3.35a	339.93±20.87 b	15.12±0.27a	32.28±0.66a	68.65±4.11b	494.66±25.65b
平均值 Mean	4.51 C	27.74 C	363.55 B	14.16 A	31.84 A	73.93 A	515.74 C
尼龙网分隔玉米室 Maize room							
CK	5.54±0.20a	32.30±1.46b	387.12±9.57a	12.23±0.85b	30.92±0.22b	63.38±0.87c	531.49±9.97a
+ <i>G. i</i>	4.18±0.06c	41.46±0.71a	347.11±10.58b	14.88±0.50a	32.63±0.81a	75.25±0.69a	515.51±10.56b
+ <i>G. m</i>	4.75±0.30b	34.03±3.81b	358.79±20.22b	15.15±0.62a	32.71±0.87a	70.07±2.04b	515.49±22.86b
平均值 Mean	4.82 B	35.93 A	364.34 B	14.08 A	32.09 A	69.57 B	520.83 C
尼龙网分隔油菜室 Rape room							
CK	5.39±0.26a	33.33±2.48a	387.44±8.10a	12.83±0.30b	30.52±0.76b	78.57±0.62a	548.08±9.87a
+ <i>G. i</i>	4.12±0.08c	26.28±0.50b	370.86±2.26b	12.09±0.51c	32.74±0.57a	74.38±3.18b	520.48±4.97b
+ <i>G. m</i>	4.91±0.38b	27.70±1.29b	392.24±1.65a	13.60±0.47a	32.50±0.32a	72.93±2.86b	543.88±5.02a
平均值 Mean	4.81 B	29.10 C	383.52 A	12.84 C	31.92 A	75.29 A	537.48 AB
单作玉米 Monocropping of maize							
CK	4.18±0.22b	40.85±1.31a	389.89±7.35a	11.83±0.22b	31.74±0.31b	71.34±1.98a	549.83±4.73a
+ <i>G. i</i>	4.65±0.55ab	30.22±0.80c	368.97±3.87c	14.51±0.33a	32.09±0.35b	66.36±1.91b	516.80±5.16c
+ <i>G. m</i>	4.95±0.09a	33.20±1.61b	377.53±2.67b	14.39±0.72a	32.88±0.36a	67.38±2.55b	530.33±5.77b
平均值 Mean	4.59 BC	34.76 A	378.80 A	13.58 B	32.24 A	68.36 B	532.32 B
单作油菜 Monocropping of rape							
CK	5.34±0.47a	29.92±5.60a	391.23±8.78a	12.96±0.77a	31.83±0.49a	74.33±1.28a	545.61±10.91a
+ <i>G. i</i>	5.50±0.51a	32.55±4.88a	387.37±3.02a	13.20±0.68a	31.98±0.78a	75.29±2.32a	545.89±11.22a
+ <i>G. m</i>	5.72±0.45a	32.24±3.75a	386.60±11.96a	13.10±1.11a	31.98±1.39a	73.73±1.75a	543.38±16.18a
平均值 Mean	5.52 A	31.57 B	388.40 A	13.09 C	31.93 A	74.45 A	544.96 A
方差分析 Significance due to:							
种植模式 Cropping pattern	***	***	***	***	NS	***	***
接种处理 Inoculation	***	NS	***	***	***	***	***
接种处理×种植模式 Inoculation × Cropping pattern	***	***	**	***	*	***	**

2.4.2 土壤不同组分无机磷的减少量

种植植物后,与未种植植物的原始土样相比,土壤中不同形态的无机磷和总无机磷含量均有不同程度的降低(图3),且受接种处理和种植模式处理的显著影响。

菌根植物和非菌根植物间作种植后,未接种对照处理土壤无机磷减少量以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,占无机磷减少总量的 49.0%,其次为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 Fe-P ,分别占无机磷减少总量的 23.8% 和 10.3%。接种 *G. i* 后土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,占减少总量的 56.7%,其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P ,分别占无机磷减少总量的 27.1% 和 8.1%。接种 *G. m* 后土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,占减少总量的 70.1%,其次为 O-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$,分别占无机磷减少总量的 14.2% 和 10.0%。

尼龙网分隔种植时,在玉米室的土壤中,未接种对照处理土壤无机磷减少以 O-P 为主,占无机磷减少总量的 36.9%,其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,分别占无机磷减少总量的 22.3% 和 23.8%。接种 AM 真菌的土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,分别占减少总量的 82.2% 和 63.3%,其次为 O-P ,分别占无机磷减少总量的 8.3% 和 16.6%。

尼龙网分隔种植的油菜室土壤中,未接种对照处理土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,分别占无机磷减少总量的 36.1% 和 31.4%,其次为 Fe-P ,占无机磷减少总量的 13.1%。接种 *G. i* 后土壤无机磷减少仍以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,分别占减少总量的 47.7% 和 28.6%,其次为 O-P ,占无机磷减少总量的 10.5%,且土壤中无机磷减少总量相对于未接种对照处理提高了 93.7%。接种 *G. m* 后土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 为主,分别占减少总量的 44.2% 和 22.2%,其次为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,占无机磷减少总量的 17.3%。

玉米单作种植时,未接种对照处理土壤各形态无机磷减少量以 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,分别占无机磷减少总量的 32.6% 和 29.5%,其次为 Al-P ,占无机磷减少总量的 13.7%。接种 *G. i* 和 *G. m* 后土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,分别占减少总量的 47.9% 和 43.5%,其次为 O-P ,分别占无机磷减少总量的 23.1% 和 27.5%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 也分别占到了 20.3% 和 19.9%。

非菌根植物(油菜)单作种植后,对照不接种和接种 AM 真菌各处理的无机磷减少总量并无明显变化,且均以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,二者之和占无机磷减少总量的 60% 以上,其次为 O-P ,占减少总量的 16.1%—19.5%。

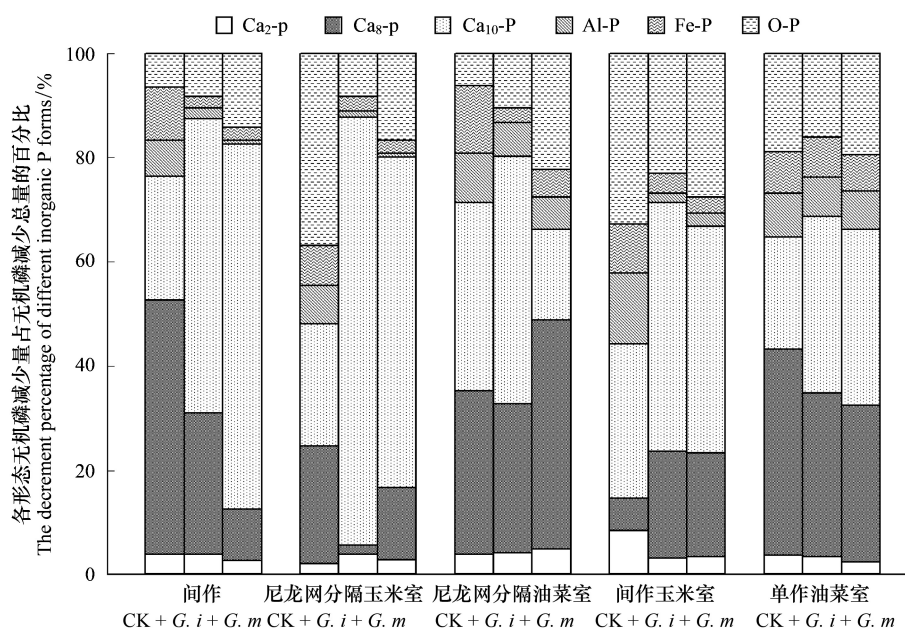


图3 不同处理条件下土壤中各形态无机磷减少百分比

Fig. 3 The decrement percentage of different inorganic P forms

3 讨论

本试验为了研究接种 AM 真菌对菌根植物和非菌根植物竞争的影响,设置了 3 种不同的种植方式,分别模拟菌根植物和非菌根植物的种间竞争作用状态。在间作模式下,菌根植物根系、菌根菌丝与非菌根植物根系三者之间有完全的相互作用,彼此间的种间相互作用关系最为强烈。用尼龙网分隔后,虽然植物根系间的直接相互作用被消除,但根系分泌的有机酸和生理活性物质可能会在植物根系间交换并且 AM 真菌的菌丝可以穿过尼龙网到达油菜根室,便于单独研究菌根菌丝与非菌根植物根系对养分的种间竞争作用。在单作种植模式下,植物根系间的相互作用被完全消除,菌根植物根系、菌根菌丝和非菌根植物根系彼此没有相互作用。在此试验条件下,由于土壤中有效磷含量较低,磷元素是作物生长的主要限制因子,而玉米与油菜竞争土壤中矿质养分也主要是对磷营养的竞争。

3.1 AM 真菌对植物种间竞争能力的影响

AM 真菌对植物群落结构影响的作用机制就是不同植物(包括非菌根植物)对 AM 真菌侵染反应的不同而表现出不同的适应度^[13],植物个体之间对有限的必需养分的竞争结果是一个或多个竞争者的适应度(生物量)减小,国内外学者一般将这种竞争机制下的适应度用植株的生物量来表示^[26]。本研究中,间作下玉米的生物量显著的高于尼龙网分隔和单作种植(表 2),油菜恰好相反,说明当玉米和油菜根系有完全的相互作用时,油菜的适应度会降低,其获取养分的能力高于油菜。

数据显示(表 4),未接种 AM 真菌时,玉米磷吸收量也表现为单作种植<尼龙网分隔种植<间作种植,而油菜磷吸收量恰好相反,说明玉米相对于油菜有更强的竞争磷养分的能力(图 2),其原因可能是玉米在低磷胁迫的环境下根冠比会增加^[27],其相对庞大的根系相对于油菜细小的根系而言更具有对磷养分的竞争吸收能力^[28]。而接种 AM 真菌后,使生物量和磷营养状况发生改变,同时显著提高了菌根植物玉米的相对竞争能力和对磷养分的竞争比率,增加了菌根植物在种间竞争中竞争优势,表现为玉米相对于油菜的竞争力进一步的增加(图 2),可见,接种 AM 真菌对二者的竞争力产生了作用^[12,15,17-18],在此试验条件下玉米竞争能力的提高和油菜竞争能力的下降均源自丛枝菌根真菌的作用,使得菌根植物获得更大的竞争优势。同时研究发现,不同的 AM 真菌提高宿主植物的竞争能力是不同的,本研究中 *G. i* 的作用要优于 *G. m*。在此研究中,菌根植物玉米是作为具有竞争优势的物种存在的,当两种植物发生竞争时,接种 AM 真菌使竞争者——非菌根植物的适应度(生物量)减小^[26]、菌根植物适应度进一步增加。可见,在此试验条件下,菌根植物和非菌根植物共存于土壤有效磷供给较少的石灰性土壤时,AM 真菌可以帮助竞争力较强的菌根植物加强竞争优势,降低非菌根植物与菌根植物的共存能力。

3.2 AM 真菌对间作体系土壤无机磷动态的影响

石灰性土壤中无机磷可以分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和闭蓄态磷(O-P)6 种类型,不同组分的无机磷有效性差异很大, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 易被植物吸收,是植物的有效磷源, Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 有效性低于 $\text{Ca}_2\text{-P}$,可作为植物的第二有效磷源,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 在短期内难以为植物吸收利用,是植物的潜在性磷源^[1]。

各处理经过 70 d 的种植,由于植物根际、菌根际和菌丝际土壤中有效磷资源缺乏,低磷胁迫下油菜和玉米对潜在性磷源 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 活化利用加强。

接种 AM 真菌后可以促进石灰性土壤中的磷库—— $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 转化为有效磷形态供给植物吸收利用,当菌根植物和非菌根植物存在种间竞争作用时,正是由于菌根及菌根菌丝在获取磷营养上的强大作用对菌根植物和非菌根植物同时产生影响。研究发现,AM 真菌对菌根植物(玉米)的生物量和磷吸收量产生了显著的促进作用的同时,也对非菌根植物(油菜)的生物量和磷吸收量产生了显著的抑制作用($P<0.05$),并且这种促进作用和抑制作用随菌根植物根系和菌根菌丝能接触到的土壤范围的增大而增大,表现为单作种植<尼龙网分隔种植<间作种植。

尼龙网分隔玉米室和玉米单作种植土壤中,未接种 AM 真菌的玉米主要通过活化利用 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 来满足其对磷营养的需求,并且土壤中无机磷减少量以 O-P 为主,显示出其对 O-P 有较强的活化利用能力^[29]。

接种 AM 真菌后,土壤中无机磷的含量显著降低,且无机磷的减少量主要以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主,说明 AM 真菌与玉米根系建立共生结构后,玉米活化利用潜在性磷源的主要对象发生了改变,可能是玉米菌根分泌的 H^+ 或有机酸通过酸化、络合或螯合作用增强了对土壤难溶性钙磷的活化^[3]。油菜单作的土壤中,土壤中无机磷的减少量主要以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,油菜根系分泌的柠檬酸和苹果酸可以活化土壤中的难溶性磷^[8],尤其可以活化溶解石灰性土壤中的 Ca-P ^[30],此外油菜对 O-P 也有一定的活化能力。

石灰性土壤中接种 AM 真菌后加强了宿主植物对 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的活化利用,而油菜也主要活化利用钙磷,因此当菌根植物和非菌根植物存在种间竞争作用时,势必主要对土壤中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 进行活化利用;玉米油菜间作种植模式下,不接种对照土壤无机磷减少以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,接种 AM 真菌后 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的减少量明显的增加,说明在油菜根系、玉米菌根、AM 真菌菌丝三者对土壤磷资源的吸收利用强烈的竞争作用下,增加了对土壤潜在性磷源 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的活化,且主要以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主。尼龙网分隔种植油菜室的土壤中,由于菌根菌丝可以穿透尼龙网由玉米室延伸到油菜室根际范围内,特别是接种 *G. i* 后土壤中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和总无机磷减少量明显的增加,这也与接种 *G. i* 时,宿主植物具有更大的竞争力相一致。

在植物种植过程中,土壤中各形态无机磷组分处于一个不断变化的动态过程中,在植物根际、菌根际和菌丝际有效磷资源缺乏的情况下,菌根或非菌根植物势必通过自身生长和根系活动对土壤中的含量最高的无机磷库 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 进行转化,一方面由不可利用形态转化为可利用形态磷,另一方面可直接转化为其它形态的磷^[29],在本研究表 3 中,接种 AM 真菌后各有效态无机磷组分含量相对于对照的增加便证实了这一点。值得注意的是,AM 真菌菌丝本身并不能活化 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ^[7],因此, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 活化利用的加强可能是玉米菌根的作用,并且在强烈的竞争作用下油菜根系分泌物的数量也有可能大量增加,促进土壤难溶性磷向植物有效磷源进行转化。

试验通过模拟间作种植模式研究了 AM 真菌对植物种间竞争作用的重要作用和对石灰性土壤中各形态无机磷动态变化的影响,进一步证实了 AM 真菌在提高菌根植物资源获取能力和相对竞争能力的重要作用。在土壤有效磷源极度缺乏的情况下,AM 真菌能够促进土壤难溶性磷源向有效磷源转化,从间作植物根际和非根际中获得更多的无机磷资源,改善了菌根植物的同时抑制了非菌根植物的生长和磷营养状况,提高了菌根植物的养分竞争比率和种间竞争能力,特别是在菌根植物本身就具有竞争优势时,接种 AM 真菌如何影响菌根植物和非菌根植物的竞争作用,如何影响物种多样性,有助于进一步更加全面理解 AM 真菌在生态系统中的作用。

References:

- [1] Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 663-670.
- [2] Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 417-421.
- [3] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. London: Academic Press, 2008: 145-187.
- [4] Pennisi E. The Secret life of fungi. *Science*, 2004, 304(5677): 1620-1622.
- [5] Richardson A E, Lynch J P, Ryan P R, Delhaize E, Andrew Smith F, Smith S E, Harvey P R, Ryan M H, Veneklass E J, Lambers H, Oberson A, Culvenor R A, Simpson R J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 2011, 349(1/2): 121-156.
- [6] Tawaraya K, Naito M, Wagatsuma T. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by hyphal exudates of arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(4): 657-665.
- [7] Yao Q, Li X L, Feng G, Christie P. Mobilization of sparingly soluble inorganic phosphates by the external mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Plant and Soil*, 2001, 230(2): 279-285.
- [8] Dakora F D, Phillips D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 35-47.
- [9] Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Dynamics and prospect on studies of high acquisition of soil unavailable phosphorus by plants. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 107-116.
- [10] Hoffland E. Quantitative evaluation of the role of organic acid exudation in the mobilization of rock phosphate by rape. *Plant and Soil*, 1992, 140(2): 279-289.

- [11] Cao Y P, Cui J Y. Phosphorous dynamic and biological availability in rhizosphere of rape seedlings grown on calcareous soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, (1): 49-54.
- [12] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 2004, 7(8): 740-754.
- [13] O'Connor P J, Smith S E, Smith F A. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity and community structure in a semiarid herbland. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 209-218.
- [14] Smith M D, Harhnett D C, Wilson G W T. Interacting influence of mycorrhizal symbiosis and competition on plant diversity in tallgrass prairie. *Oecologia*, 1999, 121(4): 574-582.
- [15] Chen M M, Chen B D, Wang X J, Zhu Y G, Wang Y S. Influences of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and ecological stoichiometry of clover and ryegrass grown in monoculture or in mixture at different phosphorus (P) levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1980-1986.
- [16] Gross N, Bagousse-Pinguet Y L, Liancourt P, Urcelay C, Catherine R, Lavorel S. Trait-mediated effect of arbuscular mycorrhiza on the competitive effect and response of a monopolistic species. *Functional Ecology*, 2010, 24(5): 1122-1132.
- [17] Schroeder-Moreno M S, Janos D P. Intra- and inter-specific density affects plant growth responses to arbuscular mycorrhizas. *Botany*, 2008, 86(10): 1180-1193.
- [18] Scheublin T R, van Logtestijn R S P, van der Heijden M G A. Presence and identity of arbuscular mycorrhizal fungi influence competitive interactions between plant species. *Journal of Ecology*, 2007, 95(4): 631-638.
- [19] Roberts A E, Radford L J, Orlovich D A. Do alterations of arbuscular mycorrhizal fungal communities change interactions between an invader *Hieracium lepidulum* and two co-occurring species? A glasshouse study. *Australasian Mycologist*, 2009, 28: 29-35.
- [20] van der Heijden M G A, Wiemken A, Sanders I R. Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plant. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 569-578.
- [21] Facelli E, Smith S E, Facelli J M, Christophersen H M, Andrew Smith F. Underground friends or enemies; model plants help to unravel direct and indirect effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant competition. *New Phytologist*, 2010, 185(4): 1050-1061.
- [22] Lu R K. Analytical Method for Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 107-314.
- [23] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 1980, 84(3): 489-500.
- [24] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs. Part II. Agronomy and research approaches. *Field Crop Abstracts*, 1979, 32(2): 73-85.
- [25] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2): 117-125.
- [26] Smith S E, Facelli E, Pope S, Smith F A. Plant performance in stressful environments; interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 3-20.
- [27] Zhang K W, Li K P, Liu Z G, Zhang J R. Effect of phosphorus level on phosphorus absorption and utilization of different genotype maize seedlings. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 795-801.
- [28] Hoad S P, Russell G, Lucas M E, Bingham I J. The management of wheat, barley, and oat root systems. *Advances in Agronomy*, 2001, 74: 193-246.
- [29] Miao S J, Han X Z, Qiao Y F, Zhou L R. Effects of crop species on phosphorus forms and utilization in black soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 105-109.
- [30] Zhang F S, Ma J, Cao Y P. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants. *Plant and Soil*, 1997, 196(2): 261-264.

参考文献:

- [1] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- [2] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 417-421.
- [9] 王庆仁, 李继云, 李振声. 植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 107-116.
- [11] 曹一平, 崔健宇. 石灰性土壤中油菜根际磷的化学动态及生物有效性. *植物营养与肥料学报*, 1994, (1): 49-54.
- [15] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 朱永官, 王幼珊. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响. *生态学报*, 2009, 29(4): 1980-1986.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 107-314.
- [27] 张可伟, 李坤朋, 刘治刚, 张举仁. 磷水平对不同基因型玉米苗期磷吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 795-801.
- [29] 苗淑杰, 韩晓增, 乔云发, 周连仁. 不同作物对黑土中磷素形态及有效性的影响. *土壤通报*, 2009, 40(1): 105-109.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元