

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180407

钟雄, 王硕, 包立, 张乃明, 刘大会, 夏运生, 李佳华. 间作作物菌根菌丝对红壤磷形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1624–1633

ZHONG X, WANG S, BAO L, ZHANG N M, LIU D H, XIA Y S, LI J H. Effects of intercropping and AMF inoculation on phosphorus forms in red soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1624–1633

## 间作作物菌根菌丝对红壤磷形态的影响\*

钟雄<sup>1,2</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 包立<sup>1,2</sup>, 张乃明<sup>1,2</sup>, 刘大会<sup>3</sup>, 夏运生<sup>1,2\*\*</sup>, 李佳华<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室 昆明 650201; 3. 湖北中医药大学 武汉 430065)

**摘要:** 丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)在植物与土壤系统中扮演着重要的角色, 能促进寄主植物对养分尤其是磷(P)的吸收。间作在提高土壤 P 素利用及增产增收等方面具有重要作用。本研究通过三室隔网分室盆栽模拟试验, 在玉米/大豆间作种植体系下, 对菌丝室进行不同形态 P 处理[不施 P(P0)、施用无机磷(IOP50)、施用有机磷(OP50)], 同时在根室进行不同 AMF 处理[不接种(NM)、接种 *Funneliformis mosseae* (FM)], 研究了不同外源形态 P 添加和 AMF 处理下, 菌根作物对菌丝室红壤中不同形态 P 吸收利用的影响。结果表明: 与单作-FM-IOP50 处理相比, 间作-FM-IOP50 处理下的玉米 P 吸收量显著增加 150.2%, 大豆 P 吸收量增加 24.5%; 除大豆单作-P0 处理外, 接种 FM 均明显降低菌丝室土壤有效磷含量。除大豆单作-FM 处理外, 施用 IOP50 使土壤有效磷含量在单作条件下最高, 而在间作条件下则最低。对红壤 P 形态的分级结果表明, 接种 AMF 均一定程度增加了 Ca<sub>2</sub>-P、Al-P、Org-P、O-Al-P、Ca<sub>10</sub>-P 的含量, 而间作则显著提高了作物对土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Fe-P 的吸收; 相比其他处理, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P、O-Al-P 含量在间作-FM-IOP50 组合处理下较高 ( $P < 0.05$ )。相关分析显示, Ca<sub>2</sub>-P 与玉米植株 P 吸收量呈显著负相关, 而 O-Al-P 与大豆植株 P 吸收量呈显著负相关。总之, 接种 FM、磷肥施用与间作均在一定程度上促进了宿主作物对 P 的吸收累积。其中间作-FM-IOP50 组合是促进间作玉米生长、P 素吸收及 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P、O-Al-P 增加的最佳组合, 通过促进无机磷的活化而改善作物对 P 素的吸收利用, 有效削减土壤 P 素的残留, 若将其应用于滇池流域, 可望减少 P 素的流失。

**关键词:** 丛枝菌根真菌(AMF); 间作; 玉米; 大豆; 磷形态; 磷吸收; 土壤有效磷

中图分类号: S344.2; S513 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)11-1624-10

## Effects of intercropping and AMF inoculation on phosphorus forms in red soils\*

ZHONG Xiong<sup>1,2</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, BAO Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Naiming<sup>1,2</sup>, LIU Dahui<sup>3</sup>, XIA Yunsheng<sup>1,2\*\*</sup>, LI Jiahua<sup>1</sup>

(1. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Repair Engineering Laboratory, Kunming 650201, China; 3. Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can help host plants in the uptake of nutrients, especially phosphorus (P). Intercropping also can promote use efficiency of P in soils and increase crop yield. In order to study the effects of different P additions and AMF

\* 国家自然科学基金项目(41161041, 41105756)、云南省科技创新人才计划项目(2015HC018)、院士专家工作站项目(2015IC022)和云南省高新技术产业发展项目(201605)资助

\*\* 通信作者: 夏运生, 主要研究方向为菌根生理及污染控制。E-mail: yshengxia@163.com

钟雄, 主要研究方向为土壤侵蚀与环境。E-mail: zhongxiangyx@163.com

收稿日期: 2018-04-24 接受日期: 2018-06-04

\* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41161041, 41105756), the Science and Technology Innovation Talent Plan Project of Yunnan Province (2015HC018), the Academician Expert Workstation Project of Yunnan Province (2015IC022), and the Hi-tech Industrial Development Project of Yunnan Province (201605).

\*\* Corresponding author, E-mail: yshengxia@163.com

Received Apr. 24, 2018; accepted Jun. 4, 2018

treatments on the absorption and utilization of different forms of P of intercropping corps in red soils, a pot simulation experiment was conducted using the three-compartment method. Under maize-soybean intercropping system, the hyphal compartments were treated with different forms of P — no P (P0), inorganic P (potassium dihydrogen phosphate – IOP50) and organic P (soy lecithin – OP50). Different AMF treatments, including no AMF (NM), inoculation with *Funneliformis mosseae* (FM), were performed in the root chamber. Intercropped maize and soybean, mono-cropped maize and soybean were planted in the experiment. The results showed that compared with mono-cropping-FM and IOP50 treatment, P uptake in maize increased by 150.2% and P uptake in soybean increased by only 24.5% under intercropping-FM and IOP50 treatment. Except mono-cropped soybean and P0 treatment, FM inoculation significantly decreased available P content in hyphal compartment soils. In addition to soybean mono-cropping-FM treatment, IOP50 application yielded the highest soil available P content under mono-cropping, and the lowest under intercropping conditions. AMF inoculation increased the contents of Ca<sub>2</sub>-P, Al-P, Org-P, O-Al-P and Ca<sub>10</sub>-P to a certain extent, while intercropping significantly increased crop uptake of Ca<sub>2</sub>-P and Fe-P in the soil. Under combined intercropping, FM and IOP50, the contents of Ca<sub>2</sub>-P, Org-P and O-Al-P in the soil were higher ( $P < 0.05$ ) compared with other treatments. Correlation analysis showed that Ca<sub>2</sub>-P was significantly negatively correlated with P uptake in maize, while O-Al-P was significantly negatively correlated with P uptake in soybean. In conclusion, FM inoculation, P fertilizer application and intercropping all promoted P absorption and accumulation of host crops to a certain extent. Among these, FM, IOP50 and intercropping was the best combination for the promotion of intercropped maize growth, P uptake and increased Ca<sub>2</sub>-P, Org-P and O-Al-P of red soil. If applied to Dianchi watershed, it is expected to reduce the loss of P.

**Keywords:** Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); Intercropping; Maize; Soybean; Phosphorus form; Phosphorus uptake; Soil available phosphorus

磷(P)作为作物生长发育的三大限制性元素之一,其在土壤中的化学有效性低是限制作物生产的重要原因<sup>[1]</sup>。由于红壤对 P 具有较强的吸附和固定特性,其中的 P 难以满足作物生长的需求。土壤中的无机磷作为作物 P 的主要来源,在土壤中的组分分为磷酸二钙(Ca<sub>2</sub>-P)、铝磷酸盐(Al-P)、铁磷酸盐(Fe-P)、磷酸十钙(Ca<sub>10</sub>-P)和闭蓄态磷(O-P)等类型。其中 Ca<sub>10</sub>-P 和 O-P 为土壤的潜在 P 源,两种类型 P 源共占土壤无机磷的 80%<sup>[2]</sup>。而磷肥施入土壤后作物利用率仅为 20%左右,浪费资源且污染环境。因此,提高土壤 P 素利用率是当前农业领域的研究热点<sup>[3]</sup>。

大量研究表明,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与自然界大部分植物建立共生关系,并帮助植物有效利用土壤中难溶态磷(如 Ca<sub>2</sub>-P、Al-P),改善寄主植物 P 养分状况<sup>[4-7]</sup>。此外,AMF 在提高寄主植物获取养分资源的同时,还能通过影响植物竞争关系的模式间接影响植物群落结构,改善土壤环境,具有极其重要的生态价值和经济价值<sup>[8]</sup>。近年来,除我国北方的各类作物间作外,西南地区的玉米(*Zea mays*)-大豆(*Glycine max*)间作模式得到迅速发展<sup>[9]</sup>。玉米-大豆间作是禾本科与豆科作物间作的典型模式,能在时间和空间上实现种植集约化,具有相对稳产、高产的优势。研究表明,豆科和禾本科作物间作通过根系的交互作用及种间的促进作用可提高土壤 P 利用率<sup>[10-12]</sup>。

目前,菌根技术在间作土壤中 P 吸收利用方面的研究受到广泛关注。前人研究表明,接种 AMF 能扩大植物根系对养分的吸收空间,并活化土壤中的

难溶性无机磷酸盐和有机磷<sup>[13-14]</sup>。张宇亭等<sup>[1]</sup>研究表明,接种 AMF 可以促进根际土壤中难溶性磷(Ca<sub>2</sub>-P 和 O-P)向有效态磷转化,并显著降低了总无机磷含量。贾广军等<sup>[15]</sup>运用隔根技术在玉米/大豆间作条件下接种 AMF,研究结果表明,接种 *Funneliformis mosseae* (FM)可在一定程度上增加玉米生物量和株高,并在根系不分隔处理下使玉米吸 P 量增多、生长较好。张丽等<sup>[7]</sup>研究了外源 P 与 AMF 对间作玉米种植红壤无机磷形态的影响,结果表明无论是否接种 AMF,间作处理使根室土壤有效磷含量显著降低,说明间作能够促进玉米植株对土壤有效磷的吸收。而在菌丝室外源 P 添加下,AMF 菌丝与间作对滇池流域红壤 P 形态的影响研究尚鲜见报道。本文以玉米/大豆间作体系为对象,研究了不同形态外源 P 添加下对间作作物接种 FM 后,菌丝作用下红壤 P 形态的变化以及被植物吸收利用的影响,并筛选出优势 P 高效利用组合,可为磷肥施用、间作与 AMF 在农业生产上的协同应用提供科学依据,同时可降低土壤有效磷残留,减少 P 流失,为流域农业非点源 P 污染控制提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自昆明市晋宁县(102°55'E, 25°02'N)红壤,土壤风干后过 2 mm 筛,混匀后装小布袋中进行高压蒸汽灭菌(121 °C 间歇灭菌共 2 h),放于牛皮纸上晾置 2~3 d,然后收入密封塑料袋中,尽量避免微生物污染。其基本化学性质为: pH 6.22, 有机质

23.26 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 5.76 mg·kg<sup>-1</sup>, 全磷 1.0 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 34.65 mg·kg<sup>-1</sup>, 全氮 1.12 g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 75.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 全钾 11.92 g·kg<sup>-1</sup>。

供试寄主植物为‘农大 108’玉米和本地大豆。挑选大小一致且籽粒饱满的种子, 用 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 表面消毒 10 min, 再用蒸馏水冲洗多次, 然后置于放有湿润定量滤纸的培养皿中, 于 25 °C 恒温培养箱中催芽 2 d 后播种。

供试 AMF 由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供, 为 *Funneliformis mosseae* (BGCZ01A、1511C0001BGCAM0012), 本试验所需菌根菌剂由玉米和三叶草(*Trifolium* sp.) 扩繁得到。

供试 P 均为分析纯, 无机磷选用磷酸二氢钾, 有机磷选用大豆卵磷脂。

## 1.2 试验设计

试验于 2016 年 9—11 月在云南农业大学科研大棚内进行, 温室内昼夜气温分别为 (30±3) °C 和 (20±2) °C, 采用自然光照, 用称重法确保土壤含水量。本试验采用三室隔网分室(图 1)研究方法, 为 3 因素试验, 共涉及根室玉米单作、玉米/大豆间作、大豆单作共 3 种植方式和 2 个不同丛枝菌根处理[不接种 AMF(NM)、接种 *Funneliformis mosseae*(FM)]; 同时分别在菌丝室中设不添加 P、添加无机磷和添加有机磷 3 个处理, 施 P 量为 50 mg·kg<sup>-1</sup>, 分别用 P0、IOP50、OP50 表示, 共计 18 个处理, 不接种处理重复 4 次, 接种处理重复 3 次。

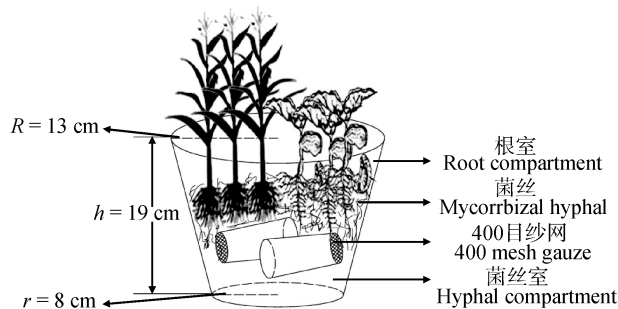


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the pot used in the experiment

试验所用 5 L 塑料盆高 19 cm, 底部直径 16 cm, 顶部直径 26 cm, 装土前用与盆大小一致的塑料袋内衬于盆壁, 作为根室。共装土约 4 kg。供试土壤共分 3 层装入盆内: 底层装 2.5 kg 土壤; 中间层土壤进行接种处理, 每盆加菌剂 75 g, 对照加入等量的灭菌菌剂 (75 g), 与 900 g 土壤充分混匀后装盆; 覆盖土为 350 g, 最后在表层均匀覆盖 25 g 细沙; 共装土约 4 kg。作为菌丝室的两个塑料小瓶为底部封闭的白色圆柱形状,

普通塑料材质, 小瓶高 8.5 cm, 瓶口直径约 3.5 cm, 底部直径约 5 cm, 瓶口用胶水粘有 400 目尼龙网(菌根菌丝可以穿过尼龙网到菌丝室土壤中吸收养分, 而根系不能穿过), 装土量共约 300 g, 按所设定的 P 添加比例向分室土中加入 P, 混匀后装瓶, 且均匀加入所需水分, 使土壤含水量达 13%, 然后把两小瓶横向斜对着埋入塑料袋内靠近底层土壤中间的水平位置上。

选出芽 1 cm 左右颗粒饱满的玉米和大豆种子, 间作处理每盆播种玉米 4 颗, 大豆 6 颗, 玉米和大豆各占半盆, 出苗 4 d 后间苗至 2 颗玉米和 4 颗大豆; 单作玉米和单作大豆每盆分别播种 6 颗和 10 颗, 出苗 4 d 后分别间苗至 4 棵玉米和 8 颗大豆。为了保证植物生长期间不受缺 N、K 营养的胁迫, 在植物生长至 40 d 时浇灌 1 次营养液(N 60 mg·kg<sup>-1</sup>, P 30 mg·kg<sup>-1</sup>, K 67 mg·kg<sup>-1</sup>, Ca 20 mg·kg<sup>-1</sup>, Mg 7.5 mg·kg<sup>-1</sup>, Mn 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>, Cu 0.35 mg·kg<sup>-1</sup>, Zn 0.9 mg·kg<sup>-1</sup>, Mo 0.02 mg·kg<sup>-1</sup>)。

## 1.3 样品采集与测试分析

植物生长 10 周后收获, 将植株地上部和地下部分分开收获, 收获后的根系先用清水冲洗干净, 之后用蒸馏水漂洗 1 次, 放在牛皮纸上晾干。最后将植株地上部和根系烘干后测定生物量。

植株含 P 量参考《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>测定, 植株 P 吸收量(mg·株<sup>-1</sup>)是相应植株的 P 含量(%)与其干重(g·株<sup>-1</sup>)的乘积。

植物收获后收集菌丝室土壤过 2 mm 筛后混匀, 取部分新鲜土样置于 4 °C 冰箱待测土壤磷酸酶, 部分土样风干后待分析有效磷及各形态 P。其中, 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定, 磷酸酶采用对硝基苯磷酸盐法测定。

根据酸性土样 P 分级新方法<sup>[17]</sup>, 土壤分级包括 7 个连续提取步骤: (1) 0.25 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> (pH 7.5) 提取 Ca<sub>2</sub>-P; (2) 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F (pH 8.5) 提取 Al-P; (3) 0.7 mol·L<sup>-1</sup> NaClO (pH 8.05) 提取高活性有机磷 (Org-P); (4) 0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH-0.1 mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 提取 Fe-P; (5) 1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 提取闭蓄态铝磷 (O-Al-P); (6) 连二亚硫酸钠柠檬酸钠提取闭蓄态铁磷 (O-Fe-P); (7) 0.25 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取 Ca<sub>10</sub>-P。Ca<sub>2</sub>-P 和 Ca<sub>10</sub>-P 是土壤中两类比较重要的磷酸盐化合物, 其中 Ca<sub>2</sub>-P 具有较高的有效性, 而 Ca<sub>10</sub>-P 是一种潜在性 P 源, 对提高土壤有效磷含量也有重要作用; Al-P 和 Fe-P 均是红壤中的有效态 P 源, 其中 Al-P 与 Ca-P 占有有效磷的比例可达 92% 以上, 并且和作物产量具有一定的相关性; Org-P 是土壤中具有高活性的有机磷, 它能转化为高活性的有效磷源供给植物吸收利用; O-P 作为闭蓄态磷酸盐, 与土壤中有效磷的含量呈显著的负相

关, 这部分磷酸盐只有在强还原条件下才能分解释放出来, 不能作为有效态 P 源, 因此 O-P 的增加可以在一定时期内反馈 P 的固定情况。

#### 1.4 数据分析

试验数据使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 统计软件对菌根处理情况、菌丝室施 P 处理和种植模式进行多因素方差分析, 交互作用显著情况下对所有处理进行 LSD 多重比较, 检验菌根处理、菌丝室施 P 处理和种植模式之间的差异显著性 ( $P < 0.05$ )。交互作用不显著的情况下分别对菌根处理、菌丝室施 P 处理和种植模式处理进行多重比较, 检验各自处理间的差异显著性。

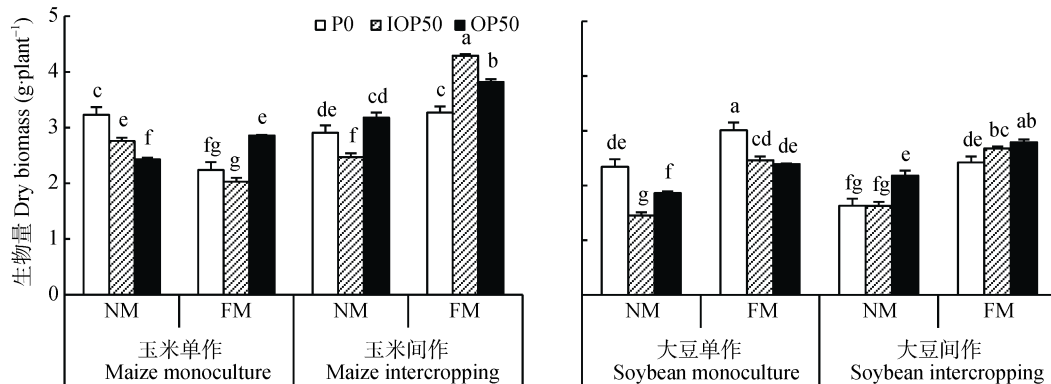


图 2 接种 AMF 及施用不同形态磷肥对玉米-大豆间作系统植株生物量的影响

Fig. 2 Effects of AMF inoculation and application of different forms of phosphate fertilizer on plant dry biomass of maize-soybean intercropping system

P0、IOP50 和 OP50 分别指在菌丝室中不添加 P、添加无机磷  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、添加有机磷  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。NM、FM 指不接种 AMF、接种 *Funneliformis mosseae*。不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。P0、IOP50 and OP50 are treatments of no P, addition of inorganic P  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and addition of organic P  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . NM and FM are treatments of no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level among different treatments.

理分别显著 ( $P < 0.01$ ) 增加 48.5%、64.4% 和 28.0%。在单作-NM 条件下, 对于植株生物量, P0 处理均高于 IOP50 和 OP50 处理; 在间作-FM 条件下, 结果与之相反, IOP50、OP50 处理均高于 P0 处理, 且 IOP50 处理下达到最大值。

由图 3 可知, 除玉米 NM-IOP50 处理、大豆 NM-P0 和大豆 FM-P0 处理外, 植株 P 吸收量在间作种植模式比单作模式下均有不同程度的增加。无论是玉米还是大豆, 在间作模式下, 植株 P 吸收量在 FM-OP50 处理下为最高, 其次为 FM-IOP50 处理。对于玉米植株, 与单作-FM 处理相比较, 间作-FM 处理下 P0、IOP50、OP50 处理 P 吸收量分别显著 ( $P < 0.001$ ) 增加 117.7%、150.2%、36.8%; 对于大豆植株, 与单作-FM 处理相比较, 间作-FM 处理下除 P0 处理以外, IOP50、OP50 处理分别使 P 吸收量显著 ( $P < 0.001$ ) 增加 24.5%、26.0%。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种 AMF 与施 P 对间作植株生物量及 P 吸收量的影响

经多因素方差分析, 菌根处理、菌丝室施 P 处理、种植模式对玉米生物量 ( $P < 0.001$ ) 和 P 吸收量 ( $P < 0.05$ ) 具有显著的交互作用; 三者交互作用对大豆生物量和 P 吸收量的影响未达到显著水平。

由图 2 可知, 无论单作或间作种植模式, 除玉米单作处理外, FM 处理促进了植物生物量的增加。间作模式下, P0、IOP50、OP50 条件下 FM 处理的玉米生物量较 NM 处理分别显著 ( $P < 0.001$ ) 增加 12.4%、73.7%、20.1%; 而 FM 处理的大豆生物量较 NM 处

### 2.2 间作体系接种 AMF 与施 P 对菌丝室土壤有效磷的影响

经多因素方差分析, 菌根处理、菌丝室施 P 处理、种植模式对土壤有效磷具有显著的交互作用 ( $P < 0.01$ )。由图 4 可知, P 添加处理对土壤有效磷含量的影响甚微。玉米单作下, 土壤有效磷含量在 FM-OP50 处理下最低; 大豆单作下, 土壤有效磷含量在 FM-IOP50 处理下最低。间作模式下, 土壤有效磷含量在 FM 复合处理下均低于 NM 处理, 其中在 FM-IOP50 处理下最低。

### 2.3 间作体系接种 AMF 与施 P 对菌丝室土壤磷酸酶活性的影响

经多因素方差分析, 菌根处理、菌丝室施 P 处理、种植模式对土壤磷酸酶活性具有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ )。由图 5 可知, 玉米单作下, 无论是否接种 AMF, P 添加处理会降低土壤的磷酸酶活性; 大豆

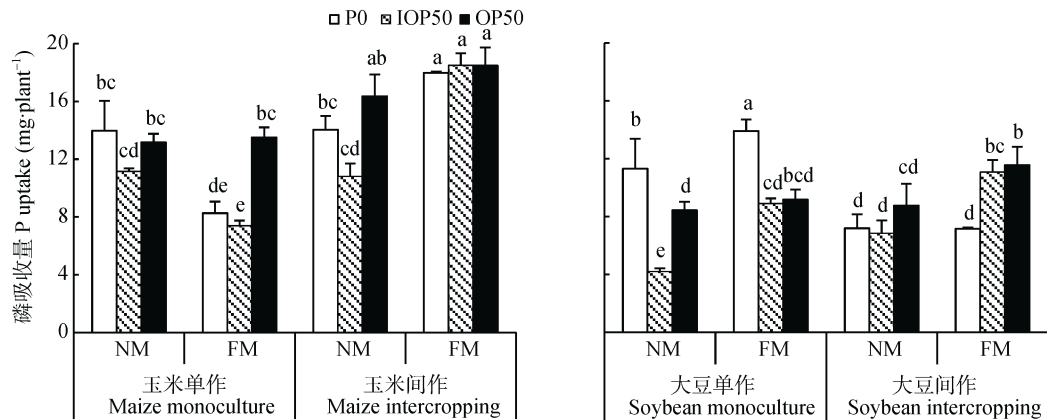


图 3 接种 AMF 及施用不同形态磷肥对间作植株 P 吸收量的影响

Fig. 3 Effects of AMF inoculation and application of different forms of phosphate fertilizer on plant P uptake of maize-soybean intercropping system

P0, IOP50 和 OP50 分别指在菌丝室中不添加 P、添加无机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>、添加有机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>。NM、FM 指不接种 AMF、接种 *Funneliformis mosseae*。不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。P0, IOP50 and OP50 are treatments of no P, addition of inorganic P 50 mg·kg<sup>-1</sup> and addition of organic P 50 mg·kg<sup>-1</sup>. NM and FM are treatments of no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level among different treatments.

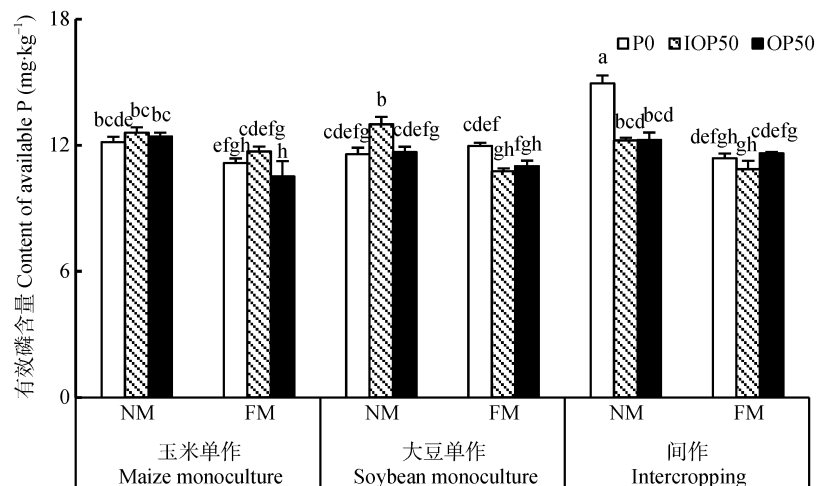


图 4 接种 AMF 及施用不同形态磷肥对菌丝室土壤有效磷的影响

Fig. 4 Effects of AMF inoculation and application of different forms of phosphate fertilizer on soil available P content in hyphal compartment

P0, IOP50 和 OP50 分别指在菌丝室中不添加 P、添加无机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>、添加有机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>。NM、FM 指不接种 AMF、接种 *Funneliformis mosseae*。不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。P0, IOP50 and OP50 are treatments of no P, addition of inorganic P 50 mg·kg<sup>-1</sup> and addition of organic P 50 mg·kg<sup>-1</sup>. NM and FM are treatments of no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level among different treatments.

单作下, FM-OP50 处理土壤磷酸酶活性均显著高于其他处理。间作模式下, 无论是否 P 添加处理与接种 AMF, 土壤磷酸酶活性均显著低于玉米、大豆单作处理。接种 FM 的土壤磷酸酶活性在 P 添加处理下均高于 NM 处理。P0 处理下, 土壤磷酸酶活性在玉米单作下接种 FM 活性最高。IOP50 处理下, 无论何种种植模式, 土壤磷酸酶活性均低于 P0 与 OP50 处理。无论何种种植模式下, 土壤磷酸酶活性的最大值均出现在 FM 的复合处理中。

#### 2.4 间作体系接种 AMF 与施 P 对菌丝室土壤各形态 P 的影响

经多因素方差分析, 菌根处理、菌丝室施 P 处

理、种植模式对 Ca<sub>2</sub>-P、Al-P、O-Al-P、O-Fe-P、Ca<sub>10</sub>-P ( $P < 0.001$ ) 和 Org-P、Fe-P ( $P < 0.05$ ) 具有显著的交互作用。

由表 1 可知: 1) 土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量在间作-FM-IOP50 处理下显著高于其他复合处理, 而在玉米单作-NM-P0 处理下最低。无论何种种植模式与 P 添加处理下, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量在 FM 处理下均高于 NM 处理。在 3 种种植模式下, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量的最大值均处在 FM-IOP50 复合处理。无论是否接种 AMF, 土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量在不同种植模式 IOP50、OP50 处理下均高于 P0 处理。无论何种种植模式与 P 添加处理下, 接种 AMF 能提高土壤 Ca<sub>2</sub>-P 含量。2) 土壤 Al-P 含

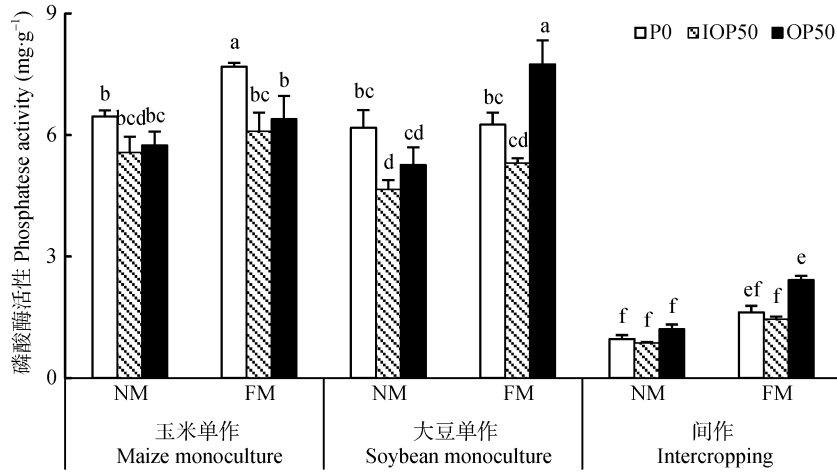


图 5 玉米-大豆间作和单作下接种 AMF 及施用不同形态磷肥对菌丝室土壤磷酸酶的影响

Fig. 5 Effects of AMF inoculation and application of different forms of phosphate fertilizer on soil phosphatase activity in hyphal compartment under maize-soybean intercropped and monoculture

P0、IOP50 和 OP50 分别指在菌丝室中不添加 P、添加无机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>、添加有机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>。NM、FM 指不接种 AMF、接种 *Funneliformis mosseae*。不同小写字母表示不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。P0, IOP50 and OP50 are treatments of no P, addition of inorganic P 50 mg·kg<sup>-1</sup> and addition of organic P 50 mg·kg<sup>-1</sup>. NM and FM are treatments of no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate significant differences at P < 0.05 level among different treatments.

表 1 玉米-大豆间作和单作下接种 AMF 及施用不同形态磷肥对菌丝室土壤各形态 P 含量的影响

Table 1 Effects of AMF inoculation and application of different forms of phosphate fertilizer on contents of different P forms in hyphal compartment under maize-soybean intercropped and monoculture

种植模式	菌丝室施 P	菌根处理	Ca <sub>2</sub> -P	Al-P	Org-P	Fe-P	O-Al-P	O-Fe-P	Ca <sub>10</sub> -P
Planting mode	P addition to hyphal compartment	AMF treatment							
玉米单作 Maize monoculture	P0	NM	21.90±0.34j	95.20±3.27i	0.11±0.00i	49.74±1.27g	52.39±3.77h	0.63±0.00j	87.84±1.66kl
		FM	50.36±2.35fg	136.83±4.51h	1.23±0.18h	56.43±1.21ef	93.53±1.19ef	1.14±0.05c	102.73±0.74fgh
	IOP50	NM	56.63±1.51de	170.82±1.33b	0.15±0.02i	67.22±1.69d	82.38±0.86fg	0.72±0.04i	104.15±2.23fgh
		FM	59.17±1.33d	172.42±1.47b	1.68±0.02gh	70.65±1.11d	98.00±1.40e	1.18±0.02bc	146.80±1.67a
	OP50	NM	44.45±1.25h	142.84±1.31fgh	2.74±0.04cd	89.93±1.73b	90.20±4.35efg	0.80±0.01hi	106.16±1.72fg
		FM	52.17±2.13fgh	183.74±5.80a	3.36±0.09b	103.00±2.41a	96.15±3.34e	1.88±0.02a	113.28±1.00de
大豆单作 Soybean monoculture	P0	NM	35.06±1.73i	142.71±2.01fgh	1.94±0.29fg	53.62±0.18fg	78.62±1.52g	0.78±0.02hi	86.96±0.71l
		FM	45.07±1.40gh	154.04±4.28de	2.40±0.22def	58.07±0.92e	92.59±2.57ef	0.95±0.05de	95.30±1.71ij
	IOP50	NM	53.78±1.19def	144.90±1.51efgh	2.74±0.13cd	55.25±1.05ef	165.03±10.76c	0.84±0.03fgh	101.57±0.89gh
		FM	56.19±0.36de	164.60±4.20bc	2.87±0.04bcd	58.57±0.57e	178.08±4.14b	1.19±0.05bc	106.95±0.16fg
	OP50	NM	45.30±0.91gh	145.59±1.34efgh	2.49±0.01def	59.59±0.14e	82.65±1.13fg	0.89±0.02efg	98.99±4.07hi
		FM	54.49±1.22def	161.01±1.79cd	3.41±0.19b	58.35±2.19e	95.82±0.62e	0.98±0.03d	120.69±2.43c
间作 Intercropping	P0	NM	44.86±1.21gh	19.70±0.46j	1.34±0.03h	81.34±1.84c	79.01±3.19g	0.81±0.03gh	92.29±0.48jk
		FM	52.19±1.29ef	23.38±2.37j	2.15±0.19efg	87.17±0.66b	136.12±0.63d	0.89±0.02efg	116.68±1.65cd
	IOP50	NM	67.20±3.52c	138.50±3.36gh	3.19±0.31bc	87.74±1.17b	82.66±1.95fg	0.95±0.01de	99.51±0.81hi
		FM	79.97±4.60a	151.60±6.83ef	4.48±0.38a	88.14±2.25b	191.88±2.89a	0.92±0.01def	136.65±0.77b
	OP50	NM	68.90±0.84bc	138.74±2.62gh	2.01±0.23fg	89.20±0.79b	172.22±0.70bc	0.95±0.02de	108.30±0.76ef
		FM	73.72±1.20b	146.98±1.84efg	2.70±0.20cde	89.35±0.78b	181.07±1.86ab	1.22±0.03b	134.32±2.02b

P0、IOP50 和 OP50 分别指在菌丝室中不添加 P、添加无机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>、添加有机磷 50 mg·kg<sup>-1</sup>。NM、FM 指不接种 AMF、接种 *Funneliformis mosseae*。同列不同小写字母表示不同处理间 P<0.05 水平差异显著。P0, IOP50 and OP50 are treatments of no P, addition of inorganic P 50 mg·kg<sup>-1</sup> and addition of organic P 50 mg·kg<sup>-1</sup>. NM and FM are treatments of no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at P < 0.05 level among different treatments.

量在间作-NM-P0 处理下显著较低,而在玉米单作-FM-OP50 处理下最高。除玉米单作种植模式外,土壤 Al-P 含量均在 FM-IOP50 复合处理下高于其他复

合处理。无论何种种植模式与 P 添加处理,土壤 Al-P 含量在 FM 处理下均高于 NM 处理,且在玉米单作-P0 处理下较为显著。3)土壤 Org-P 含量在间作-FM-IOP50

处理下显著高于其他复合处理,而在玉米单作-NM-P0 处理下最低。其中,土壤 Org-P 含量最大值是最小值的 40 倍。无论何种种植模式与 P 添加处理,土壤 Org-P 含量同样在 FM 处理下均高于 NM 处理。无论何种种植模式, IOP50、OP50 复合处理下的土壤 Org-P 含量均高于 P0 复合处理。4) 土壤 Fe-P 含量在玉米单作-FM-OP50 处理下显著较高,而在玉米单作-NM-P0 处理下最低。除大豆-OP50 复合处理外,土壤 Fe-P 含量在其他任何复合处理下的 FM 处理均高于 NM 处理。无论种植模式如何,土壤 Fe-P 含量在 IOP50、OP50 复合处理均高于 P0 复合处理。5) 土壤 O-Al-P 含量在间作-FM-IOP50 处理下显著高于其他复合处理,而在玉米单作-NM-P0 处理下最低。无论何种种植模式与 P 添加处理,土壤 O-Al-P 含量在 FM 处理下均高于 NM 处理。无论何种种植模式与菌根处理,土壤 O-Al-P 含量 IOP50、OP50 处理下高于 P0 处理。6) 土壤 O-Fe-P 含量在玉米单作-FM-OP50 处理下显著较高,而在玉米单作-NM-P0 处理下最低。除间作-IOP50 复合处理以外,土壤 O-Fe-P 含量在其他任何复合处理下的 FM 处理均高于 NM 处理。无论何种种植模式与菌根处理,土壤 O-Fe-P 含量 IOP50、OP50 处理下高于 P0 处理。7) 土壤 Ca<sub>10</sub>-P

含量在玉米单作-FM-IOP50 处理下显著较高,而在大豆单作-NM-P0 处理下最低。无论何种种植模式与菌根处理,土壤 Ca<sub>10</sub>-P 含量 IOP50、OP50 处理均高于 P0 处理。无论何种种植模式与 P 添加处理,土壤 Ca<sub>10</sub>-P 含量在 FM 处理下均高于 NM 处理。

## 2.5 根室玉米、大豆植株 P 吸收量与菌丝室土壤中有效磷、磷酸酶活性及各无机磷形态之间的相关性分析

将根室玉米、大豆植株 P 吸收量与菌丝室土壤中有效磷、磷酸酶活性及各无机磷形态含量之间进行相关性分析,其相关性如表 2 所示。其中,土壤磷酸酶活性与土壤有效磷含量具有显著的负相关关系,说明菌丝室施 P 导致土壤有效磷的增加可能抑制了磷酸酶的活性;而各无机磷形态中 Ca<sub>2</sub>-P、Fe-P、O-Al-P、Ca<sub>10</sub>-P 与土壤有效磷含量间却存在显著的正相关关系,说明这几种形态 P 可能更易被植株吸收利用;此外,玉米、大豆植株 P 吸收量与土壤有效磷含量间存在负相关关系,其中, Ca<sub>2</sub>-P 与玉米植株 P 吸收量存在显著负相关关系,而 O-Al-P 与大豆植株 P 吸收量存在显著负相关关系,说明 Ca<sub>2</sub>-P 和 O-Al-P 可能分别更易被玉米和大豆获得。

表 2 植株 P 吸收量与菌丝室土壤中有效磷、磷酸酶活性及各无机磷形态之间的相关性

Table 2 Correlation between P uptake of plants and available P, phosphatase activity and different inorganic P forms in hyphal compartment soil

	土壤有效磷 Soil available P	土壤磷酸酶 Soil phosphatase	Ca <sub>2</sub> -P	Al-P	Org-P	Fe-P	O-Al-P	O-Fe-P	Ca <sub>10</sub> -P
土壤磷酸酶 Soil phosphatase	-0.301*								
Ca <sub>2</sub> -P	0.508**	-0.533**							
Al-P	0.092	0.478**	0.299*						
Org-P	0.226	-0.073	0.368**	0.321*					
Fe-P	0.336**	-0.596**	0.553**	-0.102	0.545**				
O-Al-P	0.369**	-0.412**	0.695**	0.152	0.302*	0.287*			
O-Fe-P	0.276*	0.108	0.342**	0.382**	0.506**	0.427**	0.243		
Ca <sub>10</sub> -P	0.534**	-0.126	0.665**	0.296*	0.342**	0.412**	0.521**	0.439**	
玉米 P 吸收量 P uptake of maize	-0.470*	-0.305	-0.531*	-0.378	0.160	0.120	-0.428	-0.403	-0.533
大豆 P 吸收量 P uptake of soybean	-0.124	0.296	-0.422	-0.188	-0.236	0.087	-0.508*	-0.236	-0.262

\*\*和\*表示相关性分别在 0.01 和 0.05 水平上差异显著。 \*\* and \* indicate that the correlations are significantly different at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

## 3 讨论

### 3.1 AMF 菌丝对土壤有效磷、磷酸酶及无机磷形态的影响

研究表明, P 不仅是 AMF 吸收的主要营养物质, 同时 P 本身又是一种信号物质, 能调控 AMF 共生体

系<sup>[18]</sup>, 促进寄主对 P 的吸收。当植物受到 P 胁迫时, AMF 不仅能提升寄主植物 P 的吸收运输速率, 还能提高寄主植物的菌根化水平, 进而促进寄主植物对土壤中 P 的吸收<sup>[19]</sup>。Clark 等<sup>[20]</sup>研究表明, 在不同施 P 水平下, 接种 AMF 显著增加植株吸 P 量, 土壤有

效磷含量显著影响丛枝菌根的形成和发育。本研究中, 无论何种植植模式下, 接种 AFM 的土壤有效磷含量均有所降低, 其中在间作-FM-P0 处理下降低最为明显。AMF 还能分泌酸性磷酸酶, 矿化土壤中的有机磷, 增强植物根际土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性, 促进植物对 P 的吸收利用<sup>[14]</sup>。本研究中, 在玉米单作种植模式下, 土壤磷酸酶活性在 FM-P0 处理最高; 在大豆单作与间作模式下, 土壤磷酸酶活性均在 FM-OP50 最高, 且显著高于不接种的复合处理。这与付晓峰等<sup>[21]</sup>提出的接种 AMF 促进了南方红豆杉根际土壤酸性磷酸酶活性的增加、提高土壤微生物碳源利用率和土壤肥力的结论相一致。本研究中, 接种 AMF 均提高了除土壤中 Fe-P 外其他各 P 形态的含量, 可能是因为 AMF 可以活化促进难溶性磷的溶解, 开发土壤中新的 P 源, 促进植物对 P 的吸收。并且接种 AMF 后可以促进土壤中的 P 库——Ca<sub>10</sub>-P 和 O-P 转化为有效磷形态供给植物吸收利用<sup>[1]</sup>。结合相关性分析, 得出玉米的 P 吸收量与土壤有效磷、Ca<sub>2</sub>-P 均存在显著负相关性, 这与张丽等<sup>[7]</sup>研究结果相一致, 说明玉米植株对 P 吸收的增加可能主要来自于土壤 Ca<sub>10</sub>-P 形态的变化, 而由于玉米根系对 P 的吸收, 导致土壤有效磷含量减少。

### 3.2 间作对土壤有效磷、磷酸酶及磷形态的影响

研究表明, 土壤磷酸酶活性与土壤有机磷含量有密切的关系, 提高土壤磷酸酶活性可提高土壤有机磷含量<sup>[22]</sup>。另有学者认为, 土壤磷酸酶活性随土壤 P 含量的降低而增加<sup>[23]</sup>。本研究中, 土壤有效磷含量的高低在 3 种植植模式间大致相同。但在间作模式下, 土壤磷酸酶活性明显低于其他两种种植模式, 其根本原因可能是土壤酶活性主要决定于某一类微生物的数量多样性指数的降低, 使得针对于某一酶类的专一性微生物数量下降, 进而使相应酶活性下降<sup>[24]</sup>。从相关性来看, 土壤磷酸酶与土壤有效磷具有显著的负相关性。与单作相比, 间作下的土壤磷酸酶活性降低, 而土壤有效磷变化不明显, 说明植株在吸收土壤原有的有效磷外, 还有其他有效磷供给植物, 例如植物体本身的枯亡<sup>[25]</sup>和土壤微生物 P 的周转<sup>[26]</sup>都可以成为有效磷的来源。土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P 含量中的最大值均出现在间作模式的复合处理中, 分别是最小值的 3.6 倍与 40.0 倍, 说明间作有效提高了土壤 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P 的含量。

### 3.3 AMF 与间作对红壤 P 素协同利用的前景分析

无论何种植植模式, 接种 AMF 均会提高土壤磷

酸酶活性, 而土壤磷酸酶活性在间作种植模式下明显低于单作模式, 且土壤磷酸酶与土壤有效磷存在显著负相关性, 说明在玉米大豆间作时, 植株吸收了更多的土壤有效磷。在间作模式下, 土壤磷酸酶活性在接种 AMF 时更高, 因为 AMF 在寄主植物受到 P 胁迫时可以通过增加有机酸的分泌, 促进自身对土壤中难溶性含 P 化合物的利用, 改善其体内 P 营养状况, 促进生长发育<sup>[27]</sup>。土壤中 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P、Fe-P、O-Al-P、Ca<sub>10</sub>-P 与土壤磷酸酶存在负相关关系, 与土壤有效磷存在正相关关系, 说明间作体系下接种 AMF 提高了土壤中这几种 P 形态的含量。而 Ca<sub>10</sub>-P 与 Org-P 作为土壤中的潜在 P 源, 在间作模式下接种 AMF 促进作物对其吸收与利用, 这与张宇亭等<sup>[1]</sup>研究结果一致。土壤中 O-Fe-P 与土壤磷酸酶和有效磷存在正相关关系, 作为土壤有效磷中的难溶性磷, 间作下接种 AMF 使其在土壤中被活化, 提高了土壤中 P 的有效性与可利用性。此外, 基于间作-FM-IOP50 处理是促进间作玉米生长、P 素吸收及 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P、O-Al-P 增加的最佳组合, 如按上述组合进行播种收获, 并推广应用于诸如滇池流域乃至云南全省坡耕地, 不仅在农业生产中对作物生长有促进作用, 还能有效控制土壤 P 素的迁移, 以及有望减轻滇池水体富营养化情况。

## 4 结论

三室隔网分室研究表明, 采用间作种植模式, 接种 FM 均可以明显降低土壤有效磷的残留, 而外源 P 的施用则可能抑制土壤磷酸酶的活性。间作-FM-IOP50 可大幅促进间作作物对土壤 P 的吸收利用。对菌丝室土壤 P 分级情况的比较分析得出, 间作-FM-IOP50 的协同组合可活化土壤中的潜在 P 源而使 Ca<sub>2</sub>-P、Org-P、O-Al-P 等形态的含量明显增加。相关分析表明, Ca<sub>2</sub>-P 和 O-Al-P 可能分别是与玉米和大豆共生的菌根菌丝更容易获取的 P 源形态。总之, 接种 FM、菌丝室施 P 和间作均可在一定程度上促进间作作物对 P 的吸收利用。

## 参考文献 References

- [1] 张宇亭, 朱敏, 线岩相注, 等. 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[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7091-7101  
ZHANG Y T, ZHU M, XIAN Y X W, et al. Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7091-7101
- [2] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有



- 效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663-670  
XIANG W S, HUANG M, LI X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 663-670
- [3] 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[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 417-421  
WANG Q R, LI J Y, LI Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 417-421
- [4] 宋春, 毛璐, 徐敏, 等. 玉米—大豆套作体系作物根际土壤磷素形态及有效性[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 226-230  
SONG C, MAO L, XU M, et al. Phosphorus fractions and availability of rhizosphere soil in a maize-soybean relay intercropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 226-230
- [5] ZHAO R X, GUO W, BI N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 88: 41-49
- [6] 付先恒, 年夫照, 谷林静, 等. 分室磷添加下菌根对滇池流域红壤间作玉米生长及磷素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1220-1227  
FU X H, NIAN F Z, GU L J, et al. Effect of inoculation of AMF on plant growth and phosphorus utilization in intercropped maize under chamber phosphorus addition on red soils in Dianchi Watershed[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1220-1227
- [7] 张丽, 柳勇, 谷林静, 等. 外源磷与 AMF 对间作玉米种植红壤无机磷形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (1): 26-33  
ZHANG L, LIU Y, GU L J, et al. Effect of phosphorus addition and different AMF on inorganic phosphorus forms in red soil under intercropping maize plants[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (1): 26-33
- [8] GROSS N, LE BAGOUSSE-PINGUET Y, LIANCOURT P, et al. Trait-mediated effect of arbuscular mycorrhiza on the competitive effect and response of a monopolistic species[J]. Functional Ecology, 2010, 24(5): 1122-1132
- [9] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 红壤旱地玉米对间作大豆和花生边行效应影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1010-1017  
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, et al. Marginal effect of soybean and peanut intercropped with maize in upland red soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1010-1017
- [10] 李中阳, 李菊梅, 徐明岗, 等. 外源磷对土壤无机磷的影响及有效性[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (3): 32-35  
LI Z Y, LI J M, XU M G, et al. Change and availability of soil inorganic phosphorus components influenced by phosphorus fertilizer application[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (3): 32-35
- [11] 孟凡凡, 王博, 刘宝泉, 等. 玉米-大豆带状间作下玉米品种产量和主要农艺性状比较分析[J]. 作物杂志, 2014, (3): 101-105  
MENG F F, WANG B, LIU B Q, et al. Analysis of yield and main agronomic traits of maize in maize and soybean strip intercropping system[J]. Crops, 2014, (3): 101-105
- [12] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累与分配差异及氮肥的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 46-57  
WANG X C, YANG W Y, DENG X Y, et al. Differences of dry matter accumulation and distribution of maize and their responses to nitrogen fertilization in maize/soybean and maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(1): 46-57
- [13] 姚青, 赵紫娟, 冯固, 等. VA 菌根真菌外生菌丝对难溶性无机磷酸盐的活化及利用 . <sup>32</sup>P 间接标记法[J]. 核农学报, 2000, 14(3): 145-150  
YAO Q, ZHAO Z J, FENG G, et al. Mobilization and utilization of sparingly soluble phosphates by VA mycorrhizal fungus external hyphae . <sup>32</sup>P indirectly labelling[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2000, 14(3): 145-150
- [14] 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 Y C, FENG G, LI X L. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in the rhizosphere of clover[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2000, 6(2): 171-175
- [15] 贾广军, 张仕颖, 谷林静, 等. 菌根对紫色土上间作玉米生长及磷素累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 516-524  
JIA G J, ZHANG S Y, GU L J, et al. Effect of mycorrhizal inoculation on growth and phosphorus accumulation of intercropped maize on purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(5): 516-524
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268-270  
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 268-270
- [17] 雷宏军, 刘鑫, 朱端卫. 酸性土壤磷分级新方法建立与生物学评价[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 860-866  
LEI H J, LIU X, ZHU D W. Development of a new phosphorus fractionation scheme in acid soils and biological evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 860-866
- [18] 谢贤安. 丛枝菌根共生体磷信号转运受体的发现及其分子机制的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013  
XIE X A. Transport and signaling through the AM symbiotic phosphate transceptor[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013
- [19] 周贤玉, 唐芝玲, 王志国, 等. 减量施氮与间作模式对甜玉米 AMF 侵染和豆结瘤及作物氮磷吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1139-1146  
ZHOU X Y, TANG Y L, WANG Z G, et al. Effects of reduced nitrogen application and intercropping on sweet corn AMF colonization, soybean nodulation and nitrogen and phosphorus absorption[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1139-1146

- [20] CLARK R B, ZETO S K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(7): 867–902
- [21] 付晓峰, 张桂萍, 张小伟, 等. 溶磷细菌和丛枝菌根真菌接种对南方红豆杉生长及根际微生物和土壤酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(2): 353–360  
FU X F, ZHANG G P, ZHANG X W, et al. Effects of PSB and AMF on growth, microorganisms and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Taxus chinensis* var. *mairei* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(2): 353–360
- [22] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 139–143  
GENG Y Q, BAI C X, ZHAO G L, et al. Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(S2): 139–143
- [23] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937–944
- [24] 柴强, 黄鹏, 黄高宝. 间作对根际土壤微生物和酶活性的影响研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(5): 105–110  
CHAI Q, HUANG P, HUANG G B. Effect of intercropping on soil microbial and enzyme activity in the rhizosphere[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(5): 105–110
- [25] 杜有新, 何春林, 丁园, 等. 庐山植物园 11 种植物的根际土壤氮磷有效性和酶活性[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1297–1302  
DU Y X, HE C L, DING Y, et al. Available nitrogen and phosphorus and biological enzyme activities in rhizosphere soils beneath 11 plant species in Lushan Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8): 1297–1302
- [26] KOUNO K, WU J, BROOKES P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 617–622
- [27] 罗燕, 樊卫国. 不同施磷水平下 4 种柑橘砧木的根际土壤有机酸、微生物及酶活性[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 955–967  
LUO Y, FAN W G. Organic acid content, microbial quantity and enzyme activity in rhizosphere soil of four citrus rootstocks under different phosphorus levels[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 955–967



## 欢迎订阅 2019 年《植物保护》杂志

《植物保护》创刊于 1963 年, 是由中国科协主管, 中国植物保护学会和中国农业科学院植物保护研究所主办的学术类刊物。本刊为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国农业核心期刊, 已被中国科学引文数据库(CSCD)、清华同方、万方、维普、龙源期刊网、超星等各大数据库收录。曾荣获国家期刊奖提名奖(科技类)、全国优秀科技期刊奖、中国科协优秀学术期刊奖等十余项奖励。2015 年受到中国科协精品期刊工程项目资助。2017 年荣获 2016 年百种中国杰出学术期刊称号, 并被评为第四届中国精品科技期刊。

**报道内容:** 有关植物病理、农林业昆虫、杂草及鼠害等农作物有害生物、植物检疫、农药等植物保护各学科原创研究性论文和具有创新性、实用性技术成果文章。理论与实践并重, 对生产有很强的指导作用。

**栏目设置:** 专论与综述、专家视角、研究报告、研究简报、调查研究、实验方法与技术、技术与应用、有害生物动态等。本刊兼营广告。

**读者对象:** 农林业科研院所研究人员、高等院校相关专业教师及研究生、各级植保科技人员、农药研究与生产人员、植物医生、农技干部等。

**发行和订阅:** 双月刊, 大 16 开, 铜版纸印刷, 240 页, 35 元/期, 210 元/年。国内邮发代号 2-483, 全国各地邮局均可订阅。国外由中国国际图书贸易总公司发行, 发行代号 BM450。直接在本刊编辑部订阅, 可享受 9 折优惠, 全年 189 元, 若需挂号, 每期另加 3 元。

**联系方式:** 北京市海淀区圆明园西路 2 号中国农科院植保所《植物保护》编辑部, 邮编 100193; 电话: 010-62819059(兼传真); E-mail: zwbh1963@263.net; 网址: <http://www.plantprotection.ac.cn>