

# 接种丛枝菌根真菌和施用磷石膏对烤烟生长及砷累积的影响

张丽<sup>1</sup>, 岳献荣<sup>1</sup>, 谷林静<sup>1</sup>, 张传光<sup>1,2</sup>, 史静<sup>1</sup>, 张乃明<sup>1</sup>, 夏运生<sup>1\*</sup>

(1. 云南农业大学, 昆明 650201; 2. 云南省林业科学院, 昆明 650204)

**摘要:** 为了探讨丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对烤烟生长及磷石膏农用安全的影响,通过盆栽模拟试验研究了磷石膏(Phosphogypsum, PG)不同添加量[0、40 mg·g<sup>-1</sup>(PG0、PG40)]和接种两种 AMF[*Glomus mosseae*(GM)、*G. aggregatum*(GA)]对烤烟(KRK26)苗期生长及其磷(P)、硫(S)、砷(As)吸收的影响。试验结果表明: 无论是否接种 AMF, 磷石膏的添加均显著增加了 KRK26 地上部生物量及其植株 S 含量、吸收量及吸收效率; 除不接种处理(NM)的烤烟根系外, PG40 处理显著增加了 KRK26 植株 P 含量、吸收量及吸收效率, 并显著降低了 NM 处理的地上部 As 含量及吸收量, 进而增加了磷砷吸收比。相同 PG 添加水平下, 与不接种相比, 接种 GM 和 GA 均显著增加了 KRK26 植株的生物量。除 PG0 处理的烤烟根系外, 接种 GM 显著增加了 KRK26 植株 P、S 含量与吸收量及吸收效率, 以及植株 As 含量及吸收量, 并显著增加了 PG40 处理的植株磷砷吸收比; 接种 GA 也显著增加了 KRK26 植株 P、S 含量及吸收量, 并显著降低了 PG0 处理地上部 As 含量及吸收量。所有复合处理, 以添加磷石膏 40 mg·g<sup>-1</sup> 和接种 GA 处理对 KRK26 的生长促进效果较好, 对磷石膏施用造成的 As 污染有一定抵御作用。

**关键词:** 丛枝菌根真菌; 磷石膏; 烤烟; 磷; 硫; 砷

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)07-1294-10 doi:10.11654/jaes.2014.07.006

## Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphogypsum on Growth and Arsenic Accumulation of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)

ZHANG Li<sup>1</sup>, YUE Xian-rong<sup>1</sup>, GU Lin-jing<sup>1</sup>, ZHANG Chuan-guang<sup>1,2</sup>, SHI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Nai-ming<sup>1</sup>, XIA Yun-sheng<sup>1\*</sup>

(1. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, China)

**Abstract:** Phosphogypsum (PG), an industrial by-product, contains P, S As and other micronutrients. Its agricultural applications may cause soil and plant contamination. The objective of this study was to investigate the role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) growth and arsenic (As) accumulation under phosphogypsum (PG) treatments in a pot experiment. Two PG application levels (0 and 40 mg·g<sup>-1</sup>) and two AMF species, i.e. *Glomus mosseae* (GM) and *G. aggregatum* (GA), were used. Plant biomass and phosphorus (P), sulfur (S), and As uptake of tobacco (KRK26) were measured. Regardless of AMF inoculation, applying PG amendment significantly increased shoot biomass and tissue concentrations, total uptake and specific absorption rate of S in tobacco. Amendment of PG also significantly increased tissue concentrations, total uptake and specific absorption rate of P in tobacco, with an exception of roots in non-AMF (NM) treatment. However, PG amendment significantly decreased tissue concentrations and uptake of As in tobacco shoots with NM, and thus significantly increasing the absorption ratios of P to As. Under PG treatment, both GM and GA inoculations significantly increased plant biomass of tobacco, compared with the NM treatment. GM inoculation also significantly increased the tissue concentrations and total uptakes of P, S, and As, as well as the specific absorption rates of P and S, excepting roots in non-PG (PG0) treatment. In addition, GM inoculation significantly increased the ratios of P to As absorption in tobacco with the PG40 (40 mg PG·g<sup>-1</sup>) treatment. Similarly, GA inoculation significantly increased tissue concentrations and total uptake of P and S, but significantly decreased tissue concentrations and total absorption of As with the PG0 treatment. Combination of PG40 and GA inoculation had the most desirable effects on tobacco growth and could reduce the risk of As pollution caused by agricultural application of PG to some extent.

**Keywords:** arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); phosphogypsum (PG); tobacco; phosphorus; sulfur; arsenic

收稿日期: 2013-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161041); 云南省应用基础研究项目(2008CD132)

作者简介: 张丽(1989—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事农业环境保护方面的研究。E-mail: zhangyunli0202@126.com

\* 通信作者: 夏运生 E-mail: yshengxia@163.com

磷石膏(Phosphogypsum, PG)是湿法磷酸生产过程中产生的固体废弃物,其主要成分为二水硫酸钙,同时含有磷(P)、硫(S)和多种微量元素,以及少量砷等有害元素,每生产 1 t 磷酸能产生约 5 t 磷石膏<sup>[1]</sup>。随着我国高浓度磷复肥产量的快速增长,磷石膏产排量也呈逐年增加的趋势,磷石膏的大量产生与就地排放不仅占用土地资源,而且对土壤和水以及其他环境造成污染。据统计,2010 年我国磷石膏年产排量为 60 Mt<sup>[2]</sup>,但其综合利用率仅为 20%。据调查,我国磷石膏的产排主要集中在湖北、云南、贵州、山东、安徽等省,云南省位居第二,占全国年排放量的 24.62%<sup>[3]</sup>。磷石膏的大量排放对环境的危害日益严重,对磷石膏的利用问题亟待解决。近年来,磷石膏在农业上的利用呈现出较好的态势。有研究表明,磷石膏因含 S 量比较高而呈酸性,对改良盐碱地效果显著,并能提高土壤肥力<sup>[4-6]</sup>。另有研究表明,磷石膏中含有植物所需的多种营养元素(如 P、S),对促进玉米幼苗的生长及大蒜的增产效果显著<sup>[7-8]</sup>。然而,磷石膏含有一定量的砷(As)等重金属物质,对农作物的生长及农产品的安全问题存在一定潜在的威胁。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是普遍存在于自然界、能与大部分植物共生的一种活营养体真菌。研究表明,它能侵染植物根部并通过菌丝活化矿物质元素(P、S 等)或从土壤中将矿物质营养元素和水分输送到植物根内部供其生长所需,并能促进植物增产,改善烤烟品质<sup>[9-15]</sup>。另有研究表明,菌根真菌还可以提高尾矿污染区或重金属污染土壤上植物(如玉米、烤烟等)抗污染的能力<sup>[16-21]</sup>。

鉴于磷石膏含有丰富的 P、S 等营养元素和一定量的重金属 As,以及 AMF 能够促进植物对外源养分的吸收和抵御 As 污染的能力,本试验通过接种丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae* (GM)、*G. aggregatum* (GA) 和添加磷石膏盆栽模拟试验,选用烤烟 KRK26 为宿主植物,研究了接种 GM、GA 与施用磷石膏对烤烟苗期生长和养分吸收以及 As 累积的影响,探索一条菌根真菌与废弃物资源化相结合的农用安全新途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自玉溪市江川县低硫缺磷土壤,供试磷石膏采自云南昆明市磷复肥企业(古城镇的昆阳磷肥厂)西汉营村子堆放处。土壤和磷石膏均风干后分别过 2 mm 和 1 mm 筛,两者均混匀后装小布袋中进

行高压蒸汽灭菌(121 ℃间歇灭菌共 2 h),放于牛皮纸上晾晒 2~3 d,然后收入密封塑料袋中,尽量避免微生物污染,其基本化学属性如表 1 所示。

表 1 供试土壤及磷石膏的化学属性

Table 1 Chemical characteristics of soil and phosphogypsum used in experiment

| 类别  | pH   | 有机质/<br>mg·g <sup>-1</sup> | 全磷/<br>mg·g <sup>-1</sup> | 速效磷/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 有效硫/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 全砷/<br>mg·kg <sup>-1</sup> |
|-----|------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 土壤  | 7.50 | 12.46                      | 0.58                      | 5.76                        | 34.65                       | 6.70                       |
| 磷石膏 | 4.67 | 4.46                       | 4.89                      | 25.52                       | 395.84                      | 18.57                      |

供试宿主烤烟品种为 KRK26,由云南农业大学烟草学院年夫照副教授提供。烤烟种子为无疤痕、质量较均一的包衣种子,采用漂浮育苗,育苗基质经高压灭菌,漂浮营养液用蒸馏水配制。在漂浮液中加入一定浓度苯菌灵,1 周后进行烟苗的移栽。供试 AMF 由北京市农林科学院植物营养与资源研究所王幼珊研究员提供,分别为 *G. mosseae* (BGC YN05、1511C0001BG-CAM0013) 和 *G. aggregatum* (BGC HEB07C),试验所需菌根菌剂用玉米和三叶草扩繁得到。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验处理及管理

试验设计 2 个磷石膏添加水平,添加量为 0、40 mg·g<sup>-1</sup> (分别用 PG0、PG40 表示)。每个磷石膏添加水平下分别设不接种(NM)、接种 *Glomus mosseae* (GM) 和 *G. aggregatum* (GA) 3 个处理,每个处理重复 4 次。

试验所用容器为 1.5 L 的塑料盆,塑料盆装土前内衬塑料袋。PG0 处理每盆装土 1 kg, PG40 处理下,按照 1 kg 土壤和 40 g 磷石膏的比例充分混合均匀,分别装入盆内,然后以溶液形式向土壤中加入基础肥料(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 4.5 mg·kg<sup>-1</sup>、Mn 0.92 mg·kg<sup>-1</sup>、Cu 0.54 mg·kg<sup>-1</sup>、Zn 1.24 mg·kg<sup>-1</sup>、Mo 0.06 mg·kg<sup>-1</sup>,分别以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O 的形式加入),混匀平衡 1 周。两个接种处理中,每盆分别加入 GM、GA 菌剂均为 40 g,未接种处理加入等量灭菌菌剂,分别与土壤混匀后装盆,浇水使土壤含水量达到 15%。育苗烤烟生长到 4 叶期后选择长势均一的烟苗进行移植。

盆栽试验于 2011 年 8—10 月在云南农业大学科研大棚内进行,室内分析在校内土壤与水环境实验室完成。试验大棚内昼夜气温分别为(32±3) ℃和(22±

2) °C,采用自然光照,烟苗生长期间根据土壤日常耗水量来补充蒸馏水。为保证烤烟生长期免受 N、K 等养分缺失的威胁,在烤烟生长到 30 d 时进行一次追肥(N 30 mg·kg<sup>-1</sup>、K 20 mg·kg<sup>-1</sup>),均以上述基础肥料的溶液化合物形式加入。

### 1.2.2 盆栽收获与分析测定

烤烟生长 8 周后将其地上部和根系分开收获,依次分别用自来水和蒸馏水冲洗干净,晾干,根样剪成 1 cm 根段。取部分根样用曲利苯蓝-方格交叉法测定烤烟根系、根长和菌根侵染率<sup>[22-23]</sup>;剩余根样经烘干(70 °C, 7 h)、称重、粉碎后放置待用。植株含 P 量及含 As 量的测定参见《土壤农化分析》<sup>[24]</sup>,植株含 S 量采用比浊法测定<sup>[25]</sup>,植株元素的吸收量根据单位植株干重所对应的植株元素含量来计算,植株元素的吸收效率(Specific absorption rate, SAR) 指标根据单位根系生物量(mg)所对应的植株元素吸收量(μg)来计算<sup>[26]</sup>。

### 1.2.3 试验数据的处理与分析

试验数据使用 Excel 2003 和 SPSS 11.5 统计软件对菌根接种情况和磷石膏的添加进行双因素方差分析,交互作用显著的情况下对所有处理进行 LSD 多重比较,检验菌根处理与磷石膏处理之间的差异显著性( $P<0.05$ )。交互作用不显著的情况下分别对菌根处理和磷石膏处理进行多重比较,检验各自处理间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种 AMF 与添加磷石膏对 KRK26 菌根侵染及植株生长的影响

由表 2 可知,经双因素方差分析,KRK26 根系生物量在菌根处理与磷石膏处理间有显著的交互作用,其菌根侵染率在菌根处理与磷石膏处理间有极显著

表 2 接种状况与磷石膏处理下 KRK26 植株生物量及菌根侵染率的方差分析

Table 2 ANOVA for biomass and AMF colonization of tobacco 'KRK26' plants after AMF inoculation and PG application

| 试验处理       | 生物量 |     | 菌根侵染率 | 根长  |
|------------|-----|-----|-------|-----|
|            | 地上部 | 根系  |       |     |
| 接种状况       | *** | *** | ***   | *** |
| 磷石膏处理      | *** | NS  | ***   | *** |
| 接种状况·磷石膏处理 | NS  | *   | ***   | NS  |

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示  $P<0.001$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.05$  水平显著;而 NS 表示不显著。后同。

Note:\*\*\*,  $P<0.001$ ; \*\*,  $P<0.01$ ; \*,  $P<0.05$ ; NS, not significant. The same as below.

的交互作用,而烤烟地上部生物量及根长在菌根处理与磷石膏处理间交互作用不显著,但地上部生物量和根长在菌根处理、磷石膏处理时差异均显著。

由表 3 可以看出,不接种处理的根系未发现菌根侵染,不过无论是否添加磷石膏,接种 GM 和 GA 的 KRK26 根系菌根侵染率均小于 23%。同一磷石膏添加水平下,接种 GA 的 KRK26 根系菌根侵染率均显著高于 GM 处理。对同一接种状况内进行多重比较显示,添加磷石膏后使 KRK26 根系菌根侵染率显著降低。

表 3 接种 AMF 与磷石膏处理下 KRK26 生长及菌根侵染状况  
Table 3 Growth and AMF colonization rates of tobacco after AMF inoculation and PG application

| 接种状况 | 磷石膏处理/<br>mg·g <sup>-1</sup> | 生物量/g·pot <sup>-1</sup> |        | 菌根侵染率/<br>% | 根长/<br>m·pot <sup>-1</sup> |
|------|------------------------------|-------------------------|--------|-------------|----------------------------|
|      |                              | 地上部                     | 根系     |             |                            |
| NM   | PG0                          | 4.16c                   | 2.72c  | 0e          | 30.2a                      |
|      | PG40                         | 4.26z                   | 2.74c  | 0e          | 37.7x                      |
| GM   | PG0                          | 4.35a                   | 2.83b  | 18.4c       | 26.0b                      |
|      | PG40                         | 4.39x                   | 2.91a  | 14.8d       | 31.7y                      |
| GA   | PG0                          | 4.30b                   | 2.90a  | 22.5a       | 29.5a                      |
|      | PG40                         | 4.34y                   | 2.87ab | 19.9b       | 36.0x                      |

注:不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著,若因素间没有显著交互作用则采用不同类型字母体系,下同。

Note: Different letters show significant differences at  $P<0.05$  level, and different letters system(x, y and z) indicate no significant interactions between AMF inoculation and PG addition. The same as below.

由表 3 可知,无论是否接种,磷石膏的添加使 KRK26 地上部生物量及根长均显著增加,并显著增加了 GM 处理的 KRK26 根系生物量。同一磷石膏添加水平下,PG0 处理时,KRK26 地上部生物量以接种 GM 最高,而烤烟根系生物量则在接种 GA 时显著高于其他处理;添加磷石膏处理后,KRK26 地上部生物量以 GM 处理最高。与不添加磷石膏且不接种对照相比,添加磷石膏且接种 GM 后,烤烟 KRK26 地上部生物量增幅可达 5.53%,根系生物量增幅则达 6.99%,且添加磷石膏并接种 GA 后,烤烟 KRK26 地上部及根系生物量增幅分别也可达 4.33%和 6.62%。另外,无论是否添加磷石膏,KRK26 根长均以接种 GM 最短。可见,磷石膏的添加一定程度上改善了烤烟的生长状况,且接种 GM 和 GA 对烤烟的生长均有一定的促进作用。

### 2.2 接种 AMF 与添加磷石膏对 KRK26 吸收磷、硫与植株中磷、硫含量的影响

由表 4 可知,经双因素方差分析,KRK26 地上部

表 4 接种状况与磷石膏处理对 KRK26 植株 P、S 含量及吸收量的方差分析

Table 4 ANOVA for P and S concentrations and uptake of tobacco 'KRK26' plants after AMF inoculation and PG application

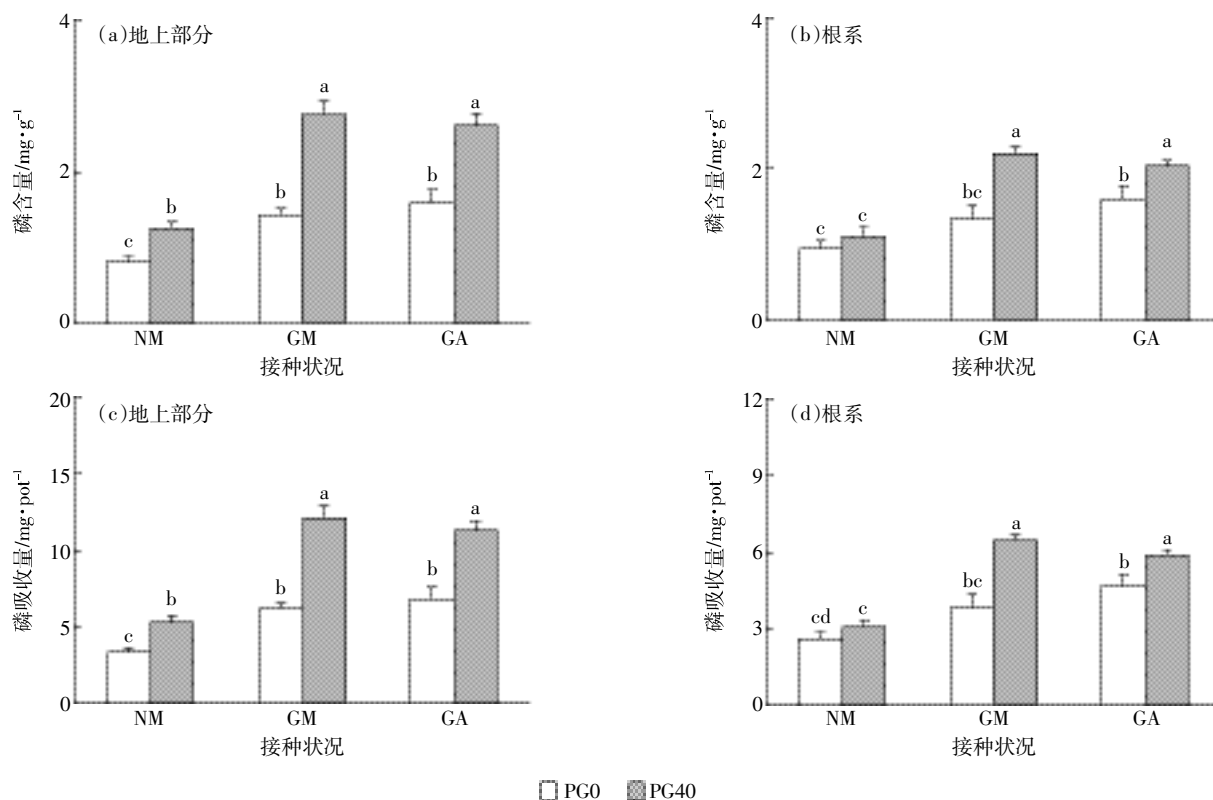
| 试验处理       | 地上部 |      |     |      | 根系  |      |     |      |
|------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
|            | 磷含量 | 磷吸收量 | 硫含量 | 硫吸收量 | 磷含量 | 磷吸收量 | 硫含量 | 硫吸收量 |
| 接种状况       | *** | ***  | *** | ***  | *** | ***  | *** | ***  |
| 磷石膏处理      | *** | ***  | *** | ***  | *** | ***  | *** | ***  |
| 接种状况·磷石膏处理 | *   | *    | **  | **   | *   | *    | *   | **   |

和根系 P、S 含量及吸收量在菌根处理与磷石膏处理间均有显著的交互作用。

由图 1 看出,无论接种与否,除 NM 处理的烤烟根系外,添加磷石膏均使 KRK26 地上部和根系 P 含量及吸收量显著增加。对同一磷石膏添加水平内进行多重分析显示,与 NM 处理相比,PG0 处理时,接种 GM 和 GA 均显著增加了 KRK26 地上部 P 含量及吸收量,而其根系 P 含量及吸收量则以接种 GA 处理最高;添加磷石膏处理后,接种 GM 和 GA 均显著增加了 KRK26 地上部和根系 P 含量及吸收量。可见,无论是否添加磷石膏,接种 GA 均使烤烟 KRK26 地上部和根系 P 含量及吸收量显著增加,而 PG0 处理下的

KRK26 接种 GM 后的根系 P 含量没有显著增加,因此,接种 GA 菌根真菌与 PG40 组合处理促进 KRK26 对 P 素的吸收效果较好。

由图 2 可以看出,无论接种与否,添加磷石膏均使 KRK26 地上部和根系 S 含量及吸收量显著增加。同一磷石膏添加水平下比较分析可知,与不接种相比,PG0 处理时,接种 GM 和 GA 均显著增加了 KRK26 地上部和根系 S 含量及吸收量;PG40 处理时,接种 GM 的 KRK26 地上部和根系 S 含量及吸收量均显著增加,接种 GA 也显著增加了 KRK26 地上部 S 含量及吸收量,而对其根系吸收的影响则没有达到显著水平,且其根系 S 含量及吸收量以接种 GM 处



图中不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。下同

Different letters above columns indicate significant differences at  $P<0.05$  level. The same below

图 1 接种 AMF 与磷石膏处理下 KRK26 植株 P 含量及 P 吸收量

Figure 1 Concentrations and uptake of P in tobacco plants after AMF inoculation and PG application

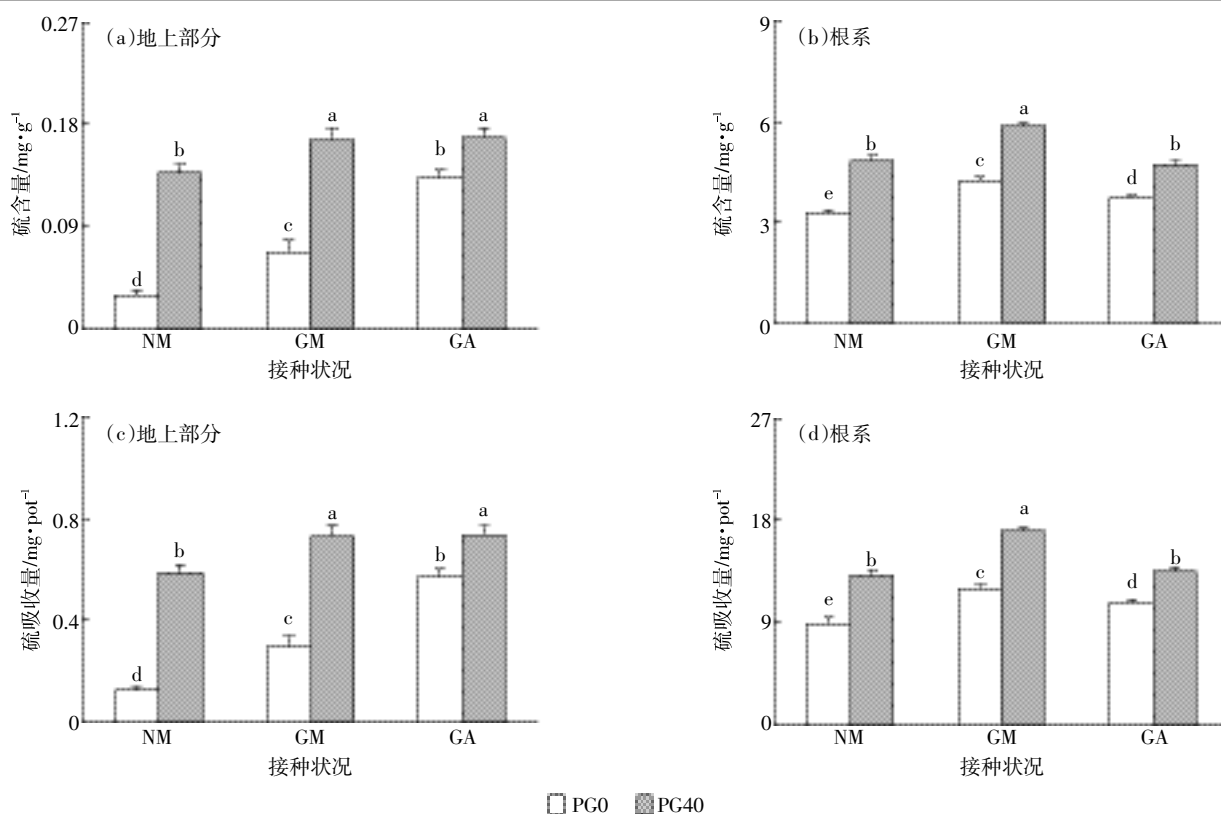


图2 接种 AMF 与磷石膏处理下 KRK26 植株 S 含量及 S 吸收量

Figure 2 Concentrations and uptake of S in tobacco plants after AMF inoculation and PG application

理最高。可见,接种 GM 与 PG40 组合处理对烤烟 S 吸收的促进作用较好。

### 2.3 接种 AMF 与添加磷石膏对 KRK26 砷累积的影响

由表 5 可知,经双因素方差分析,KRK26 地上部和根系 As 含量及吸收量在菌根处理与磷石膏处理间均有显著的交互作用。

由图 3 可以看出,磷石膏的添加显著增加了 NM 处理和 GM 处理的 KRK26 根系 As 含量及吸收量,却显著降低了 NM 处理的 KRK26 地上部和 GA 处理的 KRK26 根系 As 含量及吸收量。同一磷石膏添加水平下,与不接种相比,PG0 处理时,GM 处理的地上部 As 含量及吸收量和 GA 处理的根系 As 含量及吸收量均

显著增加,而接种 GA 显著降低了烤烟地上部 As 含量及吸收量;PG40 处理时,接种 GM 显著增加了 KRK26 地上部 As 含量及吸收量和根系 As 吸收量,而接种 GA 则显著降低了烤烟根系 As 含量及吸收量。虽然 PG40 处理下接种 GA 没有显著降低烤烟 KRK26 地上部的 As 含量及吸收量,但显著降低了其根系 As 含量及吸收量,并一定程度上降低了其地上部砷含量及吸收量。另外,根系 As 含量及吸收量约是地上部 As 含量及吸收量的 10 倍多,可见接种 GA 菌根真菌在一定程度上抵御了 As 对烤烟地上部的毒害。

### 2.4 接种 AMF 与添加磷石膏对 KRK26 磷砷吸收比的影响

由表 6 可知,经双因素方差分析,KRK26 根系磷砷吸收比在菌根处理与磷石膏添加处理间有显著的交互作用,而地上部磷砷吸收比在菌根处理与磷石膏添加处理间交互作用不显著,但地上部磷砷吸收比在菌根处理、磷石膏添加处理时的差异均显著。

由图 4 可知,无论接种与否,添加磷石膏均使 KRK26 地上部磷砷吸收比显著增加,并使接种 GA 的 KRK26 根系磷砷吸收比也显著增加。相同磷石膏添加水平下的多重比较分析可知,不添加磷石膏处理

表 5 接种状况与磷石膏处理对 KRK26 植株 As 含量及吸收量的方差分析

Table 5 ANOVA for As concentrations and uptake of tobacco 'KRK26' plants after AMF inoculation and PG application

| 试验处理       | 地上部 |      | 根系  |      |
|------------|-----|------|-----|------|
|            | 砷含量 | 砷吸收量 | 砷含量 | 砷吸收量 |
| 接种状况       | *** | ***  | **  | ***  |
| 磷石膏处理      | NS  | NS   | *   | *    |
| 接种状况·磷石膏处理 | **  | **   | *** | ***  |

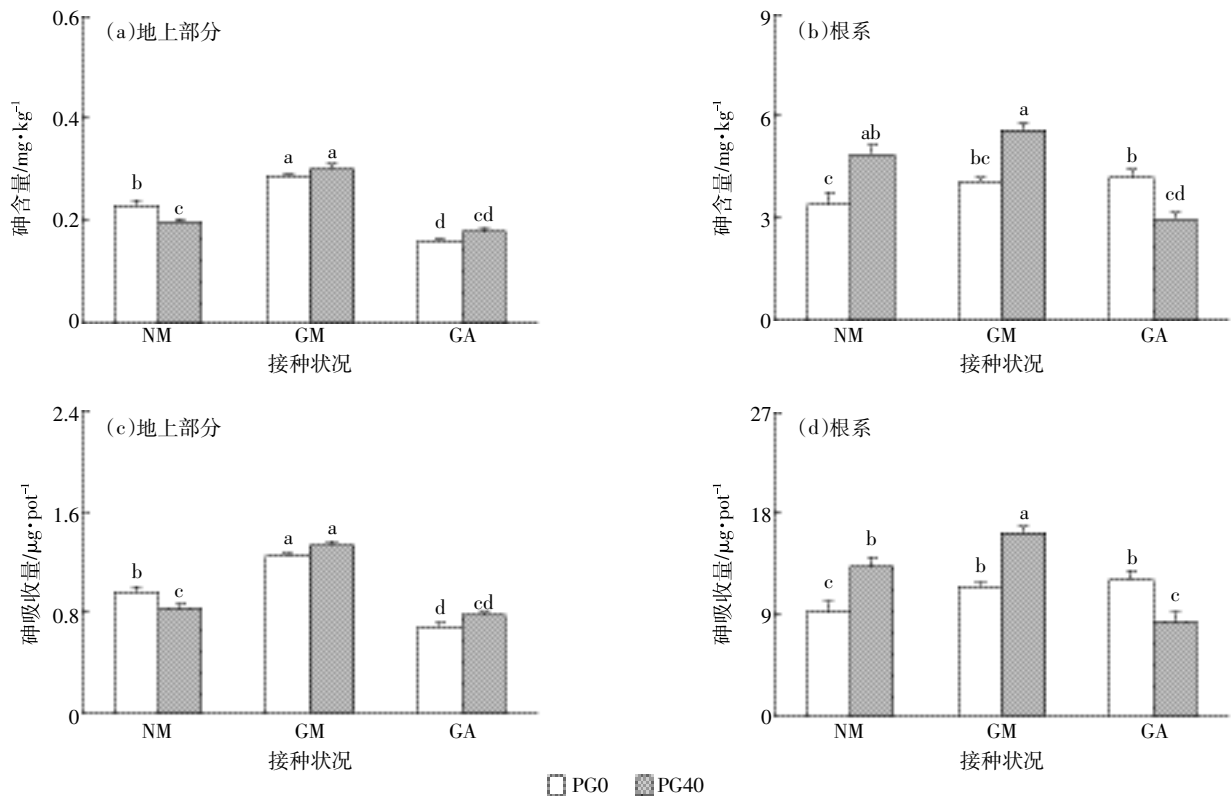


图 3 接种 AMF 与磷石膏处理下 KRK26 植株 As 含量及 As 吸收量

Figure 3 Concentrations and uptake of As in tobacco plants after AMF inoculation and PG application

表 6 接种状况与磷石膏处理对 KRK26 植株磷砷吸收比的方差分析

Table 6 ANOVA for ratios of P to As uptake in tobacco 'KRK26' plants after AMF inoculation and PG application

| 试验处理       | 地上部磷砷吸收比 | 根系磷砷吸收比 |
|------------|----------|---------|
| 接种状况       | ***      | ***     |
| 磷石膏处理      | ***      | *       |
| 接种状况·磷石膏处理 | NS       | **      |

时, KRK26 地上部磷砷吸收比以接种 GA 时最高, 且与 NM 和 GM 处理差异显著; 添加磷石膏处理后, KRK26 地上部和根系磷砷吸收比均以 GA 处理时最高, 且与 NM 和 GM 处理差异显著。与不添加磷石膏且不接种对照相比, 添加磷石膏并接种 GA 处理后, KRK26 地上部的磷砷吸收比增加了约 4 倍, 根系磷砷吸收比也增加了 2 倍左右。由此可见, 接种 GA 菌根真菌与 PG40 组合均不同程度增加了烤烟地上部

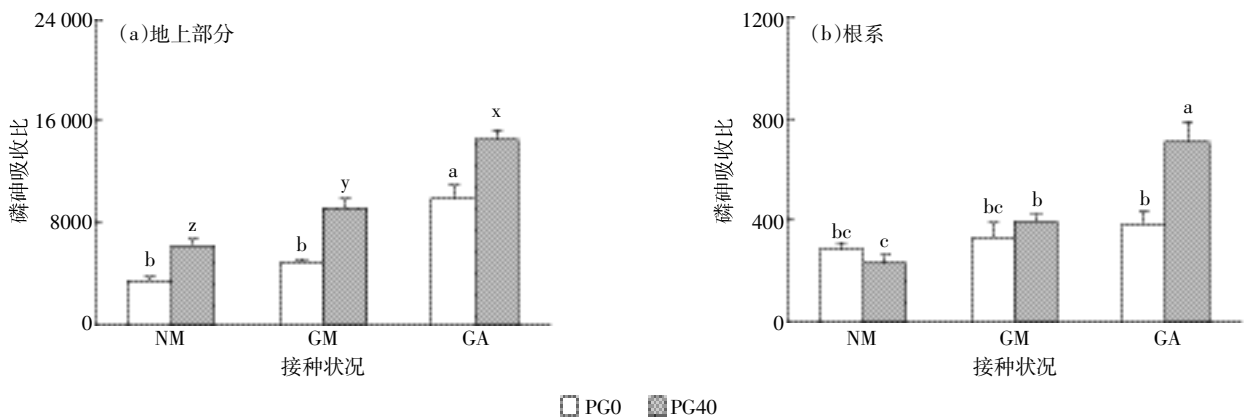


图 4 接种 AMF 与磷石膏处理下对 KRK26 植株磷砷吸收比的影响

Figure 4 Ratios of P to As uptake in tobacco plants after AMF inoculation and PG application

和根系的磷砷吸收比,促进了烤烟对 P 的吸收,而在一定程度上抑制了 As 在植株体内的累积。

## 2.5 接种 AMF 与添加磷石膏对 KRK26 根系磷、硫、砷吸收效率的影响

由表 7 可知,经双因素方差分析,KRK26 根系 P、S、As 吸收效率在菌根接种与磷石膏处理间均有显著的交互作用。

表 7 接种状况与磷石膏处理对 KRK26 根系 P、S、As 吸收效率的方差分析

Table 7 ANOVA for specific absorption rates(SAR) of P, S and As in 'KRK26' roots after AMF inoculation and PG application

| 试验处理       | 磷吸收效率 | 硫吸收效率 | 砷吸收效率 |
|------------|-------|-------|-------|
| 接种状况       | ***   | ***   | NS    |
| 磷石膏处理      | ***   | ***   | *     |
| 接种状况·磷石膏处理 | *     | *     | *     |

由表 8 看出,添加磷石膏可使 NM 处理的 KRK26 根系 S、As 吸收效率和 GM 处理的根系 P、S、As 吸收效率均显著增加,并使 GA 处理的根系 P、S 吸收效率也显著高于 NM 处理。同一磷石膏添加水平下,与不接种相比,PG0 处理时,接种 GM 和 GA 均显著增加了 KRK26 根系 P、S 吸收效率;PG40 处理时,接种 GM 显著增加了 KRK26 根系 P、S 吸收效率,且接种 GA 也显著增加了 KRK26 根系 P 吸收效率。与不添加磷石膏且不接种对照相比,添加磷石膏且接种 GM 处理后,烤烟 KRK26 根系 P、S 吸收效率分别增加了 1.9 倍和 0.8 倍,不过其根系 As 吸收效率增幅也达 50% 左右,且添加磷石膏并接种 GA 处理后, KRK26 根系 P、S 吸收效率也分别增加了约 1.7 倍和 0.5 倍,但其根系砷吸收效率却降低了约 25%。可见,与对照相比,接种 GM、GA 与磷石膏处理组合均促进了烤烟 KRK26 对 P、S 养分的吸收,但对 As 的抵抗

表 8 接种 AMF 与磷石膏处理下对烤烟根系元素吸收效率的影响( $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ )

Table 8 Specific absorption rates(SAR,  $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ ) of elements in tobacco roots affected by AMF inoculation and PG application

| 接种状况 | 磷石膏处理/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | P      | S     | As      |
|------|--------------------------------------|--------|-------|---------|
| NM   | PG0                                  | 2.19cd | 3.33e | 0.004bc |
|      | PG40                                 | 3.04c  | 5.04b | 0.005ab |
| GM   | PG0                                  | 3.52bc | 4.34c | 0.005b  |
|      | PG40                                 | 6.36a  | 6.12a | 0.006a  |
| GA   | PG0                                  | 3.94b  | 3.93d | 0.004b  |
|      | PG40                                 | 5.98a  | 4.97b | 0.003b  |

能力则以接种 GA 与磷石膏处理组合较好。

## 3 讨论

### 3.1 接种 AMF 或添加磷石膏对云南烤烟生长及磷、硫吸收的影响

据中国科学院南京土壤研究所调查报告,我国土壤有效硫含量平均为  $34.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,目前缺硫土壤达 660 万  $\text{hm}^2$ ,云南土壤平均有效硫含量为  $36.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,略高于全国平均水平,但分布极不均匀,其中缺硫(有效硫含量 $<12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )样品达 33.4%,约有 1/3 的土壤缺硫<sup>[27]</sup>。本实验采用土壤的有效硫水平与全国平均水平接近,但稍低于云南土壤硫平均水平,同时结合《土壤农化分析》中采用  $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$  浸提-钼锑抗比色法测定的土壤速效磷含量分级参考值,土壤速效磷含量低于  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  为低供磷水平,因此本研究供试土壤可以认为是低硫缺磷土壤。云南省的磷石膏产量排位居全国第二,大量磷石膏的露天堆放对土地、水及环境等造成了严重危害,因此磷石膏的堆存问题亟待解决。磷石膏的施用能够改善缺乏 P、S 等贫瘠土壤的营养状况,改善作物的生长,但同时也可能造成 As 污染的风险。张宇亭等<sup>[28]</sup>研究发现,外界供硫水平的提高和接种 AMF 显著促进了洋葱对 P、S 等养分的吸收,以及洋葱的生长及品质的提高。白来汉等<sup>[7]</sup>研究也表明,在低硫缺磷土壤上施用磷石膏,增加了玉米对 P、S 等养分的吸收,改善了玉米植株的生长。供试磷石膏速效磷含量约是土壤的 4 倍,有效硫含量约是土壤的 11 倍,磷石膏的添加增加了土壤中 P、S 等营养元素的供应,显著增加了 GM 和 GA 处理的 KRK26 根系 P 吸收效率从而显著增加了烤烟植株 P 含量及吸收量,且无论接种与否,磷石膏的施用显著增加了 KRK26 根系 S 吸收效率以及植株 S 含量和吸收量。

钟敏等<sup>[11]</sup>研究表明,接种 AMF 显著促进了白三叶草植株的生长及其对 P 素的吸收。黄初女等<sup>[29]</sup>研究也发现,接种 AMF 能够促进玉米从土壤中吸收养分,尤其对土壤 P 的吸收作用更大。另有研究表明,菌根真菌能够增加春兰对 P、S 等营养元素的吸收,促进春兰的生长<sup>[30]</sup>。本实验结果中,无论是否添加磷石膏,接种 GM 均显著增加了烤烟 KRK26 根系 P、S 吸收效率,且 GA 菌根真菌也显著增加了其根系 P 吸收效率,进而促进了烤烟植株对 P、S 的吸收,并不同程度增加了 KRK26 植株生物量,一定程度上改善了烤烟植株的生长。同时,磷石膏的施用也较大幅度地改善

了烤烟植株的生长。可见,磷石膏的添加和接种 AMF 均改善了土壤的 P、S 养分状况,对 KRK26 植株 P、S 的吸收发挥了较大作用,也对改善云南省低硫缺磷土壤养分状况有重大意义。

### 3.2 接种 AMF 或添加磷石膏对烤烟砷累积的影响

P 和 As 是吸附于土壤上具有相似特性的两种相互竞争的元素,通常认为 P 和 As 是通过相同的运输系统进行元素的传递,它们之间在宿主植物体内的拮抗作用显著<sup>[31]</sup>。在 As 胁迫下,AM 真菌可以调节 P 的吸收,当 P 素累积到一定程度时,系统就会自动下调 As 向宿主植物的转移<sup>[31]</sup>。研究表明,接种 AMF 可以提高低磷土壤上玉米的抗 As 能力<sup>[20]</sup>。且接种 AMF 增加了植株对磷酸盐的吸收,降低了植株对砷酸盐的吸收,进而增加了植株的磷砷吸收比<sup>[32]</sup>。另有研究表明,AMF 能够与大多数植物根系产生共生关系而生成菌丝,通过大量菌丝的延伸从土壤中运输更多的磷酸盐,增加了稻谷植株对 P 的吸收量,却降低了植株对砷酸盐的吸收,并显著增加了稻谷的生物量<sup>[33]</sup>。本试验中,无论是否添加磷石膏,在低硫缺磷土壤上接种 GM 和 GA 真菌,均显著提高了 KRK26 根系 P 吸收效率而显著增加了地上部 P 含量及吸收量;不添加磷石膏时,接种 GA 菌根真菌显著增加了烤烟根系 As 吸收量及吸收效率,却显著降低了烤烟地上部 As 含量及吸收量,降低了 As 对烤烟地上部的毒害,改善了烤烟植株的生长。另外,磷石膏的添加相当于向低硫缺磷土壤中施入了大量的磷素,为植物的生长提供了大量的营养元素。本实验中,磷石膏的添加显著增加了烤烟 KRK26 地上部磷砷吸收比,且接种 GA 菌根真菌也显著增加了烤烟地上部磷砷吸收比,增加了烤烟植株对 P 的吸收而降低了对 As 的吸收。这一试验结论与上述结论基本一致,阐述了 P、As 吸收的原理机制。

有研究表明,接种 AMF 能够促进玉米、小葱等对 P、S 等养分的吸收,一定程度上能够抵御 As 累积污染的风险,且接种 DS、GM 菌根真菌分别对玉米、小葱的促生效果最佳<sup>[7,34]</sup>。不同 AM 真菌产生的菌根效应因菌种不同而异,接种优良的 AMF 对宿主植物的促生效果可能会更好<sup>[35]</sup>。本试验中,接种 GA 和 GM 菌根真菌均不同程度促进了烤烟 KRK26 植株对 P 等养分的吸收,且接种 GA 菌根真菌的 KRK26 地上部 As 含量均低于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远远低于 GB4810—1994 粮食安全卫生标准中 As 含量的限量值  $0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[36]</sup>。相比较而言,接种 GA 菌根真菌比 GM 菌根真菌对

KRK26 的促生和抗逆境能力更强,不同菌种对不同宿主植物的促生效果不同,这可能是由于不同菌根真菌与不同宿主植物之间的亲和程度不同的缘故<sup>[35]</sup>。

## 4 结论

(1)无论接种与否,添加磷石膏均不同程度促进了 KRK26 植株对 P、S 的吸收,并在一定程度上改善了烤烟植株的生长。

(2)同一磷石膏添加水平下,接种 GA 菌根真菌能够促进 KRK26 植株对 P 的吸收,并在一定程度上降低 As 对烤烟地上部的毒害。GM 处理对烤烟的促生作用不如 GA 菌根真菌作用明显。

(3)PG40-GA 组合对烤烟植株生长及 P、S 吸收的促进作用较好,并在一定程度上降低了磷石膏施用带来的 As 累积危害。

### 参考文献:

- [1] 李 飞. 磷石膏综合利用现状及“十二五”发展建议[J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(6): 69-72.  
LI Fei. Phosphogypsum comprehensive utilization and development suggestion in the 12th Five-year Plan[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2012, 27(6): 69-72.
- [2] 叶学东. “十二五”磷石膏综合利用任重道远[J]. 磷肥与复肥, 2012, 27(1): 7-10.  
YE Xue-dong. The heavy responsibilities in comprehensive utilization of phosphogypsum in the 12th Five-year Plan[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2012, 27(1): 7-10.
- [3] 廖若博, 徐晓燕, 纪罗军, 等. 我国磷石膏资源化应用的现状及前景[J]. 硫酸工业, 2012(3): 1-7.  
LIAO Ruo-bo, XU Xiao-yan, JI Luo-jun, et al. Present status and prospects direction of phosphogypsum resource applications in China[J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2012(3): 1-7.
- [4] 王晓岑, 李淑芹, 许景钢. 农业应用磷石膏前景展望[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 287-294.  
WANG Xiao-cen, LI Shu-qin, XU Jing-gang. Prospects for application of phosphogypsum in agriculture[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2010, 26(4): 287-294.
- [5] 张丽辉, 孔 东, 张艺强. 磷石膏在碱性土壤改良中的应用及效果[J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22(2): 97-100.  
ZHANG Li-hui, KONG Dong, ZHANG Yi-qiang. The application and effect of ardealite in improving the alkali soil[J]. *Journal of Inner Mongolia Agriculture University*, 2001, 22(2): 97-100.
- [6] 官娅莉, 陈静曦, 李洪飞. 磷石膏对盐碱土的改良研究[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 2(1): 57-59.  
GUAN Ya-li, CHEN Jing-xi, LI Hong-fei. The study on saline and alkaline soil amelioration with phosphorus gypsum[J]. *Inner Mongolia Environmental Science*, 2008, 2(1): 57-59.

- [7] 白来汉, 张仕颖, 张乃明, 等. 不同磷石膏添加量与接种菌根对玉米生长及磷、砷、硫吸收的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2485–2492.  
BAI Lai-han, ZHANG Shi-ying, ZHANG Nai-ming, et al. Effect of different phosphogypsum addition levels and mycorrhizal inoculation on growth and phosphorus, sulfur and arsenic uptake by maize plant (*Zea mays*) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2485–2492.
- [8] 满昌伟, 华秀芝. 磷石膏对大蒜的增产效果和效益分析[J]. 土壤肥料, 2005(6): 40–46.  
MAN Chang-wei, HUA Xiu-zhi. Analyling of phosphogypsum increased yield of garlic and benefits[J]. *Soil & Fertilizer*, 2005(6): 40–46.
- [9] 李晓林, 冯 固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2011: 1–2.  
LI Xiao-lin, FENG Gu. Arbuscular mycorrhizal ecological physiology [M]. Beijing: Sino-Culture Press, 2011: 1–2.
- [10] 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 Yu-ting, ZHU Min, XIAN Yan xiang wa, et al. Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and in-organic phosphate forms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7091–7101.
- [11] 钟 敏, 黄益宗, 伍 文, 等. 丛枝菌根真菌群落对白三叶草植株生物量磷吸收和土壤磷酸单酯酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1770–1776.  
ZHONG Min, HUANG Yi-zong, WU Wen, et al. Effect of AMF community on the biomass of *White Clover*, uptake of phosphorus and soil phosphomonoesterase activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1770–1776.
- [12] Baird J M, Walley F L, Shirliffe S J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi colonization and phosphorus nutrition in organic field pea and lentil [J]. *Mycorrhiza*, 2010, 20: 541–549.
- [13] Li X, Wu Z Q, Li W D, et al. Growth promoting effect of a transgenic *Bacillus mucilaginosus* on tobacco planting[J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2007, 74(5): 1120–1125.
- [14] Yang H W, Li F, Chen K, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on growth during the field period and quality of Flue-cured tobacco [J]. *Crop Research*, 2012, 26(6): 668–670.
- [15] 王茂胜, 姚 娟, 郭亚利, 等. 丛枝菌根真菌对烤烟生长及其品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(12): 131–135.  
WANG Mao-sheng, YAO Juan, GUO Ya-li, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on growth and quality of Flue-cured tobacco [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(12): 131–135.
- [16] 郭 伟, 赵仁鑫, 赵文静, 等. 丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1915–1920.  
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and rare earth elements uptake of soybean grown in rare earth mine tailings[J]. *Environmental Sciences*, 2013, 34(5): 1915–1920.
- [17] 陈则友, 曹学章, 彭安萍, 等. AM 真菌和水分条件对稀土尾矿堆中植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2101–2107.  
CHEN Ze-you, CAO Xue-zhang, PENG An-ping, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and water conditions on plant growth in rare earth tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2101–2107.
- [18] 沈生元, 肖艳平, 尹 睿, 等. AM 真菌与蚯蚓对玉米修复砷污染农田土壤的影响[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(3): 523–530.  
SHEN Sheng-yuan, XIAO Yan-ping, YIN Rui, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and earthworms on phytoremediation of As-contaminated soils with maize[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 27(3): 523–530.
- [19] Cozzolino V, Pigna M, Meo D V, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth of *Lactuca sativa* L. and arsenic and phosphorus availability in an arsenic polluted soil under non-sterile conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45: 262–268.
- [20] Xia Y S, Chen B D, Christie P, et al. Arsenic uptake by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in an arsenic-contaminated soil with added phosphorus[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(10): 1245–1251.
- [21] Hua J F, Lin X G, Yin R, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on arsenic accumulation by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(9): 1214–1220.
- [22] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55: 158–161.
- [23] Giovannetti M, Mosse B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots[J]. *New Phytologist*, 1980, 84: 489–500.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2007, 268–270; 389–391.  
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 268–270, 389–391.
- [25] 杨广杏. 植物含硫量的测定方法研究[J]. 环境与开发, 1992, 7(2): 52–54, 63.  
YANG Guang-xing. Research of plant sulphur determination method [J]. *Environment and Development*, 1992, 7(2): 52–54, 63.
- [26] Azcon R, Ambrosano E, Charest C. Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorus and nitrogen concentration[J]. *Plants Science*, 2003, 165(5): 1137–1145.
- [27] 郑小莲. 从云南省磷硫资源状况看磷石膏的综合利用[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(4): 107–110.  
ZHENG Xiao-lian. Analyling comprehensive utilization of phosphogypsum based on status of phosphate resource and sulphur resource of Yunnan[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2000, 25(4): 107–110.
- [28] 张宇亭, 罗 珍, 郭 涛. 供硫和丛枝菌根真菌对洋葱生长和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1283–1287.  
ZHANG Yu-ting, LUO Zhen, GUO Tao. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and fertilization in growth and quality of onion [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1283–1287.

- [29] 黄初女, 王光达, 王 亮, 等. 不同 AM 菌对瘠薄土有效磷及玉米地上部植株磷含量的影响[J]. 延边大学农学学报, 2012, 34(4): 314–318.
- HUANG Chu-nü, WANG Guang-da, WANG Liang, et al. Influences of different AM fungi on available phosphate in barren soil and phosphate in upland plant of Maize[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2012, 34(4): 314–318.
- [30] 金 辉, 伍建榕, 陈 曦, 等. 菌根真菌对春兰生长和矿质元素吸收的影响[J]. 北方园艺, 2006(6): 90–92.
- JIN Hui, WU Jian-rong, CHEN Xi, et al. Effect of mycorrhizal fungi on chunlan growth and mineral elements absorption[J]. *Northern Gardening*, 2006(6): 90–92.
- [31] Jankong P, Visoottiviseth P. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on plants growing on arsenic contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(7): 1092–1097.
- [32] Ahmed F R S, Alexander I J, Mwinyihija M, et al. Effect of superphosphate and arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on phosphorus and arsenic uptake in Lentil (*Lens culinaris* L.)[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2011, 221(1–4): 169–182.
- [33] Chen B D, Xiao X Y, Zhu Y G, et al. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn[J]. *The Science of the Total Environment*, 2007, 379(2–3): 226–234.
- [34] 谷林静, 白来汉, 张乃明, 等. 菌根技术对磷石膏农用的强化效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 152–159.
- GU Lin-jing, BAI Lai-han, ZHANG Nai-ming, et al. Strengthening effect of mycorrhizal technology on application of phosphogypsum in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 152–159.
- [35] 江 龙, 黄建国, 袁 玲. 不同丛枝菌根真菌对烟苗生长营养状况和生理活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(12): 53–57.
- JIANG Long, HUANG Jian-guo, YUAN Ling. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungus on growth, nutrition and physiological activity of tobacco seedlings[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(12): 53–57.
- [36] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 我国主要蔬菜和粮油作物的砷含量与砷富集能力比较[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 291–296.
- XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Comparison of arsenic content and arsenic accumulation ability of China's major vegetable and grain and oil crops[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 291–296.