

周晓月, 袁 洁, 石 琨, 等. 丛枝菌根真菌对甘薯生物量、根系形态及钾素吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 939-948.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.010

# 丛枝菌根真菌对甘薯生物量、根系形态及钾素吸收的影响

周晓月<sup>1,2</sup>, 袁 洁<sup>2</sup>, 石 琨<sup>1,2</sup>, 汪吉东<sup>2</sup>, 朱国鹏<sup>1</sup>, 周其良<sup>1</sup>, 丁爱芳<sup>3</sup>

(1. 海南大学园艺学院, 海南 海口 570228; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 3. 江苏临溪农业发展有限公司, 江苏 常州 213000)

**摘要:** 为探究接种丛枝菌根真菌对甘薯钾吸收的影响, 以徐薯 28 为供试植物材料, 以摩西斗管囊霉和幼套近明球囊霉为供试丛枝菌根真菌, 设置施钾和不施钾 2 个处理, 以不接种丛枝菌根菌根为对照, 利用盆栽试验分析甘薯生物量、根系形态、钾和磷的吸收、根际土壤速效钾和有效磷含量。结果表明, 2 种丛枝菌根真菌均能够与甘薯建立共生关系, 且施钾对丛枝菌根真菌的定殖率没有显著影响。在施钾条件下, 接种丛枝菌根真菌(尤其是幼套近明球囊霉)能够协调甘薯地上部分和根部生长, 降低干物质向叶片和叶柄的分配, 有利于干物质向根部的分配, 通过优化甘薯根系形态促进甘薯根系干物质的积累, 并且促进根部钾的积累。因此, 在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是幼套近明球囊霉)是优化甘薯苗期根系形态、促进根系生长的有效手段, 有利于后期甘薯根系的生长及膨大, 发挥甘薯的增产潜能。

**关键词:** 甘薯; 丛枝菌根真菌; 根系形态; 钾素吸收

**中图分类号:** S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-0939-10

## Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on biomass, root morphology and potassium uptake of sweet potato

ZHOU Xiao-yue<sup>1,2</sup>, YUAN Jie<sup>2</sup>, SHI Kun<sup>1,2</sup>, WANG Ji-dong<sup>2</sup>, ZHU Guo-peng<sup>1</sup>, ZHOU Qi-liang<sup>1</sup>, DING Ai-fang<sup>3</sup>

(1. College of Horticulture, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific observing and Experimental Station for Farmland Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Linxi Agricultural Development Limited Company, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** To investigate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on potassium absorption of sweet potato, sweet potato Xu28 was used as the experimental plant material, and *Funneliformis mosseae* and *Claroideoglomus etunicatum* were used as the experimental arbuscular mycorrhizal fungi. Two treatments of potassium application and no potassium application

收稿日期: 2022-04-05

基金项目: 财政部农业农村部国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-10-B10-2021、CARS-10-B08-2021); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(21)-1009]; 常州市科技支撑计划项目 (CE20202032)

作者简介: 周晓月 (1997-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事植物生长和养分吸收研究。 (E-mail) 1428261945@qq.com

通讯作者: 汪吉东, (E-mail) jdwang66@163.com; 周其良, (E-mail) 1521259531@qq.com

were set up in the experiment. The treatments without inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi were used as the control. The biomass, root morphology, potassium and phosphorus absorption, and the contents of available potassium and available phosphorus in rhizosphere soil were analyzed by pot experiment. The results showed that the two arbuscular mycorrhizal fungi could establish symbiotic relationship with sweet potato, and potassium application had no significant effect on the colonization rate of arbuscular mycorrhizal fungi. Under the condition of potassium appli-

cation, inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (especially *C. etunicatum*) could coordinate the growth of aboveground parts and roots of sweet potato, reduce the distribution of dry matter to leaves and petioles, and facilitate the distribution of dry matter to roots. By optimizing the root morphology of sweet potato, the dry matter accumulation and potassium accumulation in root were promoted. Therefore, inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (especially *C. etunicatum*) under the condition of potassium application is an effective means to optimize the root morphology and promote the root growth of sweet potato at seedling stage, which is beneficial to the growth and expansion of roots at later stage, and has the potential to improve the yield of sweet potato.

**Key words:** sweet potato; arbuscular mycorrhizal fungi; root morphology; potassium uptake

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 广泛种植于世界上 120 多个国家和地区,位列中国第四大粮食作物,是重要的食品、饲料和工业原料来源<sup>[1]</sup>。甘薯属于块根作物,移栽 30 d 后(块根形成期)根系分化基本完成,甘薯根系的生长发育影响最终甘薯的产量<sup>[2]</sup>。作为典型的“喜钾”作物,钾在甘薯的整个生育期中起到十分重要的作用,尤其是在块根形成期,钾能提高甘薯薯块中干物质的积累,对提高甘薯产量的效果明显<sup>[3-4]</sup>。钾在土壤中扩散率较低,且全世界范围内的大多数农田都存在一定的钾营养亏缺情况,所以钾营养通常是作物产量和品质提升的制约因素<sup>[5-6]</sup>。

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是内生真菌的一种,广泛分布于农田土壤中,能与陆地上 80%~90% 的被子植物形成共生关系。丛枝菌根真菌可以增强宿主植物对养分如磷、氮、钾和硫酸盐等的吸收,改善养分亏缺条件下植株的生长发育,促进植物生长<sup>[7-8]</sup>。目前,关于丛枝菌根真菌促进宿主植物对磷和氮营养吸收的报道较多<sup>[9-11]</sup>,机制较为明确。关于丛枝菌根真菌对植物钾营养吸收的影响研究较少。已有研究表明,丛枝菌根真菌能够促进烟草<sup>[12]</sup>、番茄<sup>[3]</sup>、枸杞<sup>[13]</sup>、小麦<sup>[14]</sup>等植物对钾的吸收或者积累。一项基于 419 个独立试验的 meta 分析结果表明,接种丛枝菌根真菌后植物钾含量显著增加 18.5%<sup>[14]</sup>。此外,王园园等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,施钾和接种丛枝菌根真菌均能够促进枸杞根系生长和钾积累,并且存在协同作用。目前,关于丛枝菌根真菌对甘薯生长的影响研究已经取得一定进展,已有研究表明甘薯具有较强的菌根依赖性<sup>[15]</sup>,能够与多株丛枝菌根真菌建立共生关系。接种混合的丛枝菌根真菌菌剂 Symbivit 能够有效促进甘薯幼苗的生长和养分吸收,显著提高甘薯产量<sup>[16]</sup>。接种丛枝菌根真菌地衣球囊霉 (*Rhizophagus irregularis*) 能够显著提高甘薯根平均直径、根体积、根生物量<sup>[17]</sup>。然

而,目前关于丛枝菌根真菌对甘薯根系形态及钾素吸收影响的研究较少。

本研究以甘薯徐薯 28 为宿主植物,在室温盆栽条件下,研究接种丛枝菌根真菌和施钾对甘薯苗期根系侵染率、植株根系形态、植株(根、茎、叶柄、叶片)生物量、植株各器官磷和钾含量、甘薯根际土壤有效磷和速效钾含量的影响,探究接种丛枝菌根真菌对甘薯植株钾和磷吸收、积累和分配的影响,为更科学地将丛枝菌根真菌应用于甘薯栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验设计

供试土壤为潮土,土壤基本理化性质为土壤全磷 0.44 g/kg,全钾 7.23 g/kg,速效钾 53.00 mg/kg,有效磷 12.15 mg/kg, pH 7.13。

供试甘薯苗由江苏省农业科学院国家甘薯产业体系中心提供,甘薯品种为徐薯 28。接种的丛枝菌根真菌为摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*, Fm) 和幼套近明球囊霉 (*Claroideoglomus etunicatum*, Ce), 购买自北京市农林科学院。供试肥料为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)、硫酸钾(含  $K_2O$  56%)。

本试验为盆栽试验,于 2021 年 7 月至 8 月份在江苏省农业科学院农业资源与环境研究所大棚进行。试验设置 8 个处理:不接种 Fm 不施钾、不接种 Fm 施钾、接种 Fm 不施钾、接种 Fm 施钾、不接种 Ce 不施钾、不接种 Ce 施钾、接种 Ce 不施钾、接种 Ce 施钾。每个处理 3 次重复,随机排列。每盆装土 7 kg,施钾处理以尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)、硫酸钾(含  $K_2O$  56%) 配置的混合肥料为基肥,与土壤充分混匀后装盆,并于盆土 1/2 处均匀铺洒 70 g 菌剂作为接种处理,不施钾处理以尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%) 配置的混合肥料

为基肥,与土壤充分混匀后装盆,于盆土 1/2 处均匀铺洒 70 g 灭菌菌剂为不接种处理。

试验于甘薯苗期(插苗 30 d 后)采集样品,分别采集甘薯根际土壤、植株地下部及地上部(茎、叶片、叶柄),取新鲜根测定根系侵染率,以分析甘薯的生长、养分吸收及分配状况。

## 1.2 测试指标及方法

### 1.2.1 丛枝菌根真菌侵染率测定 丛枝菌根真菌

$$\text{侵染率} = \frac{\sum (0 \times \text{根段数} + 10\% \times \text{根段数} + 20\% \times \text{根段数} + \dots + 100\% \times \text{根段数})}{\text{观察总根段数}}$$

1.2.2 生物量测定 将植物样品按照根、茎、叶片、叶柄 4 个部分分开,在使用电子天平分别测定其鲜质量后,于 105 ℃ 杀青 1 h,并于 75 ℃ 烘干至恒质量,最后分别称取各部分干质量。

1.2.3 植株养分测定 将称量后的样品用粉碎机进行粉碎,采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮,具体方法参照鲍士旦的《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>。测定各养分含量。用紫外分光光度计测定植株各部位全磷含量,用火焰光度计测定植株各部位全钾含量。并计算植株各部位钾积累量<sup>[20]</sup>,计算公式:植株钾积累量=植株干物质积累量×植株钾含量。

1.2.4 土壤养分测定 参考鲍士旦<sup>[19]</sup>方法测定。速效钾采用乙酸铵浸提,火焰光度计测定。有效磷采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提,钼锑抗比色法测定。全磷、全钾采用四酸消解法消解,消解后用紫外分光光度计测定。

1.2.5 根系形态观测及指标测定 使用爱普森根系扫描仪(EPSON Flatbed Scanner EPSON Perfection V800/V850 1.9 V3.93 3.9.3.1)对植株根系进行扫描,观察根系形态,并分析其总根长、根表面积、根体积、根尖数等指标。

## 1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2021 软件计算数据,采用 SPSS 20.0 (IBM, Chicago, IL, USA) 软件进行统计分析。利用独立样本  $t$  检验(Student's  $t$ -test)对两组数据进行统计分析, $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  分别表示存在显著差异和极显著差异,分别用 \* 和 \*\* 表示。利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和双因素方差分析(two-way ANOVA)对 2 组以上数据进行统计分析,采用 Turkey's 检验进行差异显著性分析( $P < 0.05$ )。利用 Origin 2021 进行皮尔森相关性分析,并以热图形式表示。利用 Origin 2021 和 Photoshop CS6 进行图像处理。

根系侵染率测定采用王幼珊等的方法<sup>[18]</sup>,在进行侵染率测定时,根系染色采用醋酸染色法,染色后随机选取形态相似的根段,将其放置于载玻片上,每个载玻片上放 15 个根段,每个样品观测 30 条根段,然后使用电子显微镜进行侵染率观测。根据每条根段的菌根结构的多少,按侵染 0%、10%、20%、30%、……、100% 的比例计算每条根段的侵染率,侵染率计算公式:

## 2 结果与分析

### 2.1 接种丛枝菌根真菌对甘薯根系侵染率的影响

如表 1 所示,丛枝菌根真菌 Fm 和 Ce 均能够在甘薯中定殖,在缺钾或施钾条件下,Fm 或 Ce 在甘薯根系中的定殖率没有显著差异。接种不同丛枝菌根真菌处理、钾处理以及接种不同丛枝菌根真菌处理和钾处理交互作用均不影响 Fm 和 Ce 对甘薯根系的侵染。

表 1 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯根系侵染率的影响

Table 1 Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on sweet potato root infection rate at seedling stage

处理	侵染率 (%)
接种 Fm 不施钾	33.45±2.84a
接种 Fm 施钾	35.32±9.33a
接种 Ce 不施钾	30.78±1.44a
接种 Ce 施钾	33.11±5.13a

Fm:摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*);Ce:幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*)。同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),相同小写字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.2 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期生物量的影响

如表 2 所示,钾显著影响甘薯苗期叶片干质量、叶柄干质量、茎干质量、地上部总干质量、根干质量和全株总干质量。Fm、Ce 以及钾和 Fm 交互作用、钾和 Ce 交互作用均不影响甘薯苗期叶片干质量、叶柄干质量、茎干质量、地上部总干质量和全株总干质量。并且,不论是在缺钾还是施钾条件下,接种 Fm 或者 Ce 对甘薯苗期叶片干质量、叶柄干质量、茎干重、地上部总干质量和全株总干质量没有显著影响。钾、Ce 以及钾和 Ce 交互作用显著影响甘薯苗期根干质量,并且在施钾条件下,接种 Ce 显著增加甘薯苗期根干质量 47.6%。因此,施钾能够显著

促进甘薯苗期各个器官生物量积累,在施钾条件下接种 Ce 能够显著提高甘薯苗期根干质量。

如图 1 所示,钾显著影响甘薯苗期干物质向叶柄分配,Fm 以及钾和 Ce 交互作用显著影响甘薯苗期干物质向根部的分配。在施钾条件下,接种 Fm 降低了干物质向叶片的分配,接种 Ce 降低了干物质向叶片和叶柄的分配,接种 Fm 和 Ce 均有利于干

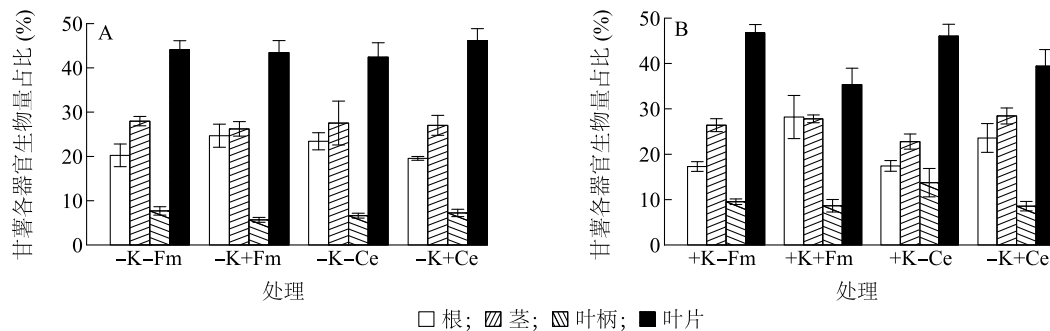
物质向根部分配。因此,施钾能够促进甘薯各个器官生物量的积累(表 2)。在施钾条件下,接种丛枝菌根真菌 Fm 或 Ce 能够协调甘薯地上和根部生长,降低干物质向叶片和叶柄的分配,有利于干物质向根部的分配(图 1)。此外,在施钾条件下,接种 Ce 显著增加根部干物质的积累,对于甘薯根部干物质积累具有更好的促进效果。

表 2 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官生物量的影响

Table 2 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the biomass of different organs of sweet potato at seedling stage

项目	叶片干质量 (g)	叶柄干质量 (g)	茎干质量 (g)	地上部分干质量 (g)	根干质量 (g)	全株干质量 (g)
-K-Fm	1.33±0.31a	0.24±0.07b	0.82±0.13a	2.39±0.50a	0.60±0.11a	2.99±0.58ab
-K+Fm	1.21±0.21a	0.16±0.02b	0.77±0.21a	2.14±0.43a	0.73±0.20a	2.87±0.62b
-K-Ce	1.56±0.08a	0.24±0.02b	1.02±0.20a	2.82±0.13a	0.86±0.06a	3.68±0.09ab
-K+Ce	1.84±0.23a	0.28±0.02b	1.06±0.05a	3.19±0.21a	0.78±0.06a	3.96±0.27ab
+K-Fm	2.31±0.41a	0.48±0.1ab	1.30±0.22a	4.09±0.71a	0.84±0.12a	4.93±0.82ab
+K+Fm	1.61±0.02a	0.39±0.03ab	1.30±0.16a	3.30±0.11a	1.36±0.37a	4.66±0.47ab
+K-Ce	2.24±0.26a	0.66±0.14a	1.10±0.12a	4.00±0.34a	0.84±0.04b	4.84±0.35ab
+K+Ce	2.13±0.32a	0.47±0.1ab	1.54±0.21a	4.14±0.54a	1.24±0.08a	5.38±0.52a
K	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01
Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ce	NS	NS	NS	NS	<0.05	NS
K×Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Ce	NS	NS	NS	NS	<0.01	NS

-K:不施钾;+K:施钾;-Fm:不接种摩西斗管囊霉;+Fm:接种摩西斗管囊霉;-Ce:不接种幼套近明球囊霉;+Ce:接种幼套近明球囊霉。同等钾水平下-Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。



-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。

图 1 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官生物量占比的影响

Fig.1 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on proportion of biomass in different organs of sweet potato at seedling stage

### 2.3 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期根系形态的影响

如表 3 所示,钾、Fm、Ce 以及钾和 Fm 交互作用、钾和 Ce 交互作用均不影响甘薯苗期总根长,钾处理显著影响甘薯苗期根表面积和根体积,Ce 显著影响甘薯苗期根表面积、根平均直径和根体积,钾和

Ce 交互作用显著影响甘薯苗期根体积。并且,在缺钾条件下,接种 Fm 或者 Ce 对甘薯苗期总根长、根表面积、根平均直径和根体积均没有显著影响。在施钾条件下,接种 Fm 显著增加甘薯苗期总根长(提高 22.33%),对根表面积、根平均直径、根体积均没有显著影响;接种 Ce 对甘薯总根长没有显著影响,



显著增加甘薯苗期根表面积(提高 40.4%)、根平均直径(提高 13.00%)、根体积(提高 59.30%)。表明在施钾条件下丛枝菌根真菌能够优化甘薯根系形态,但是 Fm 和 Ce 对甘薯苗期根系形态的优化方式

存在差异。因此,施钾和接种 Ce 均能够优化甘薯根系形态;在施钾条件下,接种 Ce 能够显著提高甘薯苗期根表面积、根平均直径、根体积,更有利于甘薯根系的生长。

表 3 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯根系形态的影响

Table 3 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on root morphology of sweet potato at seedling stage

项目	总根长 (cm)	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根平均直径 (mm)	根体积 (cm <sup>3</sup> )
-K-Fm	1 180.74±193.25a	221.35±42.35a	0.59±0.02a	3.31±0.72b
-K+Fm	1 284.51±300.16a	239.26±56.58a	0.59±0.02a	3.55±0.86ab
-K-Ce	1 653.62±135.52a	299.84±17.26a	0.58±0.03a	4.34±0.29a
-K+Ce	1 657.04±130.89a	311.48±30.87a	0.60±0.02a	4.67±0.58a
+K-Fm	1 550.73±91.17b	288.89±15.29a	0.59±0.01a	4.29±0.23a
+K+Fm	1 896.94±34.42a	370.87±27.91a	0.62±0.04a	5.81±0.79a
+K-Ce	1 423.95±128.53a	262.14±18.33b	0.59±0.01b	3.84±0.19b
+K+Ce	1 762.70±100.08a	368.07±22.40a	0.66±0.02a	6.12±0.44a
K	NS	<0.05	NS	<0.05
Fm	NS	NS	NS	NS
Ce	NS	<0.05	<0.05	<0.05
K×Fm	NS	NS	NS	NS
K×Ce	NS	NS	NS	<0.05

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.4 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期钾和磷吸收与分配的影响

2.4.1 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期钾吸收与分配的影响 如表 4 所示,施钾显著影响甘薯叶柄、茎、地上部分、根部、全株钾含量,对叶片钾含量没有显著影响,钾、Ce 以及钾和 Ce 交互作用显著影响甘

薯叶柄钾含量,钾和 Fm 交互作用显著影响甘薯叶片钾含量。在施钾条件下,接种 Ce 显著降低甘薯叶柄钾含量;除此之外,接种 Fm 或 Ce 对甘薯各器官及全株钾含量没有显著影响。因此,施钾显著促进甘薯苗期各个器官(除了叶片)钾含量,在施钾条件下接种 Ce 显著降低甘薯叶柄钾含量。

表 4 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官钾含量的影响

Table 4 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on potassium content in different organs of sweet potato at seedling stage

项目	叶片钾含量 (g/kg)	叶柄钾含量 (g/kg)	茎钾含量 (g/kg)	地上部分钾含量 (g/kg)	根钾含量 (g/kg)	全株钾含量 (g/kg)
-K-Fm	43.46±2.76a	60.41±4.78b	26.48±5.02ab	39.07±2.82ab	15.24±2.50bc	34.26±2.79ab
-K+Fm	37.71±4.35a	49.81±4.70b	21.16±1.56b	32.96±3.74ab	12.05±2.23c	27.90±3.40b
-K-Ce	51.15±10.36a	48.11±1.40b	27.35±9.49ab	42.34±10.63ab	12.96±1.26c	35.26±7.90ab
-K+Ce	32.06±1.82a	51.44±7.54b	19.60±1.88b	29.34±1.24b	12.44±2.45c	26.06±0.98b
+K-Fm	45.28±3.68a	87.90±2.97b	48.59±4.70a	51.29±3.3ab	20.08±2.02abc	45.91±2.69ab
+K+Fm	57.47±3.23a	88.00±20.27b	46.55±5.18a	56.63±3.64ab	24.85±2.61a	48.14±2.91ab
+K-Ce	41.86±14.58a	132.04±3.85a	47.62±2.83a	58.63±10.44a	23.48±0.42ab	52.44±8.36a
+K+Ce	51.13±1.54a	87.23±3.46b	38.37±2.61ab	50.10±0.60ab	23.17±0.28a	43.77±1.29ab
K	NS	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ce	NS	<0.05	NS	NS	NS	NS
K×Fm	<0.05	NS	NS	NS	NS	NS
K×Ce	NS	<0.01	NS	NS	NS	NS

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母差异显著 ( $P<0.05$ )。

如表 5 所示,钾显著影响甘薯叶片、叶柄、茎、地上部分、根部、全株钾的积累量,钾和 Ce 交互作用显著影响甘薯根钾积累量。在施钾条件下,接种 Ce 显著降低甘薯叶柄钾积累量,显著增加根钾积累量。因此,施钾显著促进甘薯苗期各个器官钾的积累,在

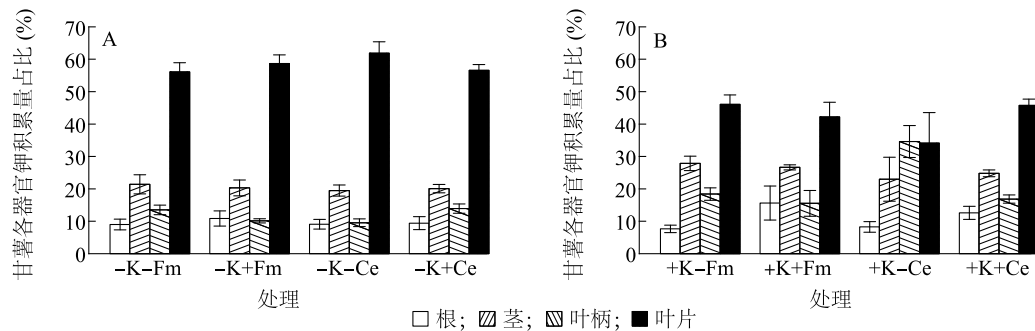
施钾条件下接种 Ce 显著降低甘薯叶柄钾积累量,并且显著增加根部钾积累量,协调钾的利用。如图 2 所示,钾显著影响甘薯苗期钾向叶片、叶柄、茎的分配。在施钾条件下,接种 Ce 显著降低钾向叶柄的分配,增加钾向根部的分配。

表 5 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官钾积累量的影响

Table 5 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on potassium accumulation in different organs of sweet potato at seedling stage

项目	叶片钾积累量 (mg)	叶柄钾积累量 (mg)	茎钾积累量 (mg)	地上部分钾积累量 (mg)	根钾积累量 (mg)	全株钾积累量 (mg)
-K-Fm	56.27±9.28a	13.72±3.14b	20.75±1.76b	90.75±12.69cd	8.64±1.13b	99.38±12.34d
-K+Fm	44.21±4.24a	7.61±0.70b	15.63±3.13b	67.45±7.37d	8.70±2.72b	76.15±9.87d
-K-Ce	81.24±20.87a	11.75±1.09b	24.18±2.45b	117.17±24.06bcd	11.26±1.71ab	128.43±25.18bcd
-K+Ce	58.32±4.09a	14.57±2.38b	20.82±2.39b	93.71±8.19bcd	9.94±2.80b	103.65±9.83bcd
+K-Fm	102.59±13.65a	41.77±8.73b	60.92±3.89a	205.28±23.79abc	16.77±2.46ab	222.05±24.69abc
+K+Fm	92.72±5.31a	34.62±9.36b	59.01±2.05a	186.35±6.94abc	35.71±13.39a	222.06±11.42abc
+K-Ce	95.64±35.66a	88.15±21.56a	52.55±6.05a	236.33±46.88a	19.64±0.82b	255.97±47.42a
+K+Ce	108.16±13.23a	40.54±7.36b	59.10±8.91a	207.80±28.23ab	28.75±1.92a	236.55±27.86ab
K	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ce	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Ce	NS	NS	NS	NS	<0.05	NS

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。



-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。

图 2 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官钾积累量的影响

Fig.2 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on potassium accumulation in different organs of sweet potato at seedling stage

因此,施钾促进甘薯钾的吸收和积累。在施钾条件下,接种 Ce 降低钾向叶柄的分配,降低甘薯叶柄钾的积累,增加根部钾的积累。

2.4.2 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期磷吸收与分配的影响 如表 6 所示,钾对甘薯各器官磷含量没有显著影响,Fm 显著影响甘薯地上部分和全株磷含量,钾和 Fm 交互显著影响甘薯苗期叶片、地上部分和根部磷含量,钾和 Ce 交互显著影响茎磷含量。在缺钾条

件下,接种 Fm 显著降低甘薯苗期叶片、茎、地上部分、根部磷含量,接种 Ce 显著增加甘薯苗期茎磷含量。在施钾条件下,接种 Fm 显著增加甘薯苗期根部磷含量,接种 Ce 对甘薯苗期各器官磷含量没有显著影响。因此,钾不影响甘薯苗期磷含量,Fm 和 Ce 对甘薯苗期磷吸收的影响存在差异,缺钾条件下 Fm 限制甘薯各器官磷的含量,施钾条件下提高根部磷的含量,Ce 在缺钾条件下显著提高甘薯茎磷的含量。

表 6 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官磷含量的影响

Table 6 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on phosphorus content in different organs of sweet potato at seedling stage

项目	叶片磷含量 (g/kg)	叶柄磷含量 (g/kg)	茎磷含量 (g/kg)	地上部分磷含量 (g/kg)	根磷含量 (g/kg)	全株磷含量 (g/kg)
-K-Fm	5.83±0.58a	6.38±0.61a	3.79±0.41a	5.16±0.52a	2.64±0.13a	4.67±0.48a
-K+Fm	3.63±0.17b	4.66±0.65a	2.49±0.17b	3.32±0.06b	2.19±0.02b	3.04±0.05a
-K-Ce	4.50±0.63a	4.86±0.39a	3.23±0.25b	4.06±0.44a	2.97±0.15a	3.81±0.38a
-K+Ce	5.31±0.77a	5.49±0.56a	4.26±0.26a	4.94±0.54a	3.12±0.20a	4.58±0.47a
+K-Fm	5.08±0.38a	5.35±0.51a	4.14±0.35a	4.82±0.29a	2.82±0.11b	4.47±0.24a
+K+Fm	5.44±0.51a	5.66±0.29a	3.66±0.54a	4.76±0.48a	3.25±0.02a	4.38±0.40a
+K-Ce	5.04±0.24a	4.69±0.87a	4.03±0.08a	4.74±0.25a	2.23±0.94a	4.32±0.32a
+K+Ce	4.87±0.16a	5.45±0.38a	3.14±0.64a	4.28±0.26a	2.99±0.25a	4.00±0.20a
K	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Fm	NS	NS	NS	<0.05	NS	<0.05
Ce	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Fm	<0.05	NS	NS	<0.05	<0.01	NS
K×Ce	NS	NS	<0.05	NS	NS	NS

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

如表 7 所示,钾显著影响甘薯叶片、叶柄、茎、地上部分、根部、全株磷积累量,Fm 显著影响甘薯根磷积累量。无论是缺钾还是施钾,接种 Fm 和 Ce 对甘薯各器官磷积累量没有显著影响。因此,施钾能够显著促进甘薯苗期各个器官磷的积累,但是接种丛枝菌根真菌不影响甘薯苗期各个器官磷积累。如图 3 所示,钾显著影响甘薯苗期磷向叶片的分配,Fm

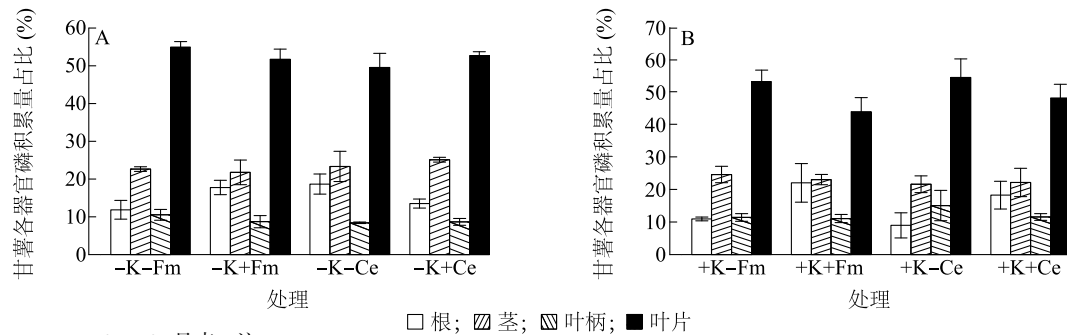
显著影响磷向根部的分配。但是,无论是缺钾还是施钾条件下,接种 Fm 和 Ce 均不显著影响甘薯各器官磷的积累量。因此,施钾促进甘薯苗期各器官磷的积累,且有利于磷向叶片的分配。接种 Fm 均有利于磷向甘薯苗期根部的分配,显著促进施钾条件下根部磷的积累。

表 7 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官磷积累量的影响

Table 7 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on phosphorus accumulation in different organs of sweet potato at seedling stage

项目	叶片磷积累量 (mg)	叶柄磷积累量 (mg)	茎磷积累量 (mg)	地上部分磷积累量 (mg)	根磷积累量 (mg)	全株磷积累量 (mg)
-K-Fm	7.67±1.77ab	1.56±0.57a	3.13±0.64a	12.36±2.98ab	1.58±0.31a	13.94±3.17ab
-K+Fm	4.39±0.69b	0.70±0.02a	1.98±0.67a	7.06±1.34b	1.59±0.42a	8.65±1.75b
-K-Ce	7.02±1.04ab	1.18±0.14a	3.29±0.70a	11.49±1.54ab	2.55±0.20a	14.04±1.43ab
-K+Ce	9.46±0.61ab	1.58±0.30a	4.54±0.48a	15.58±1.39ab	2.42±0.19a	18.00±1.46ab
+K-Fm	11.46±1.32a	2.52±0.56a	5.31±0.81a	19.29±2.28a	2.35±0.25a	21.64±2.5a
+K+Fm	8.79±0.89ab	2.22±0.25a	4.60±0.26a	15.61±1.17ab	4.42±1.21a	20.03±0.24a
+K-Ce	11.21±1.01a	3.14±1.02a	4.45±0.47a	18.81±0.56a	1.88±0.82a	20.69±0.33a
+K+Ce	10.34±1.48a	2.57±0.54a	5.04±1.52a	17.95±3.14a	3.75±0.52a	21.69±2.99a
K	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01
Fm	<0.05	NS	NS	NS	NS	NS
Ce	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Fm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K×Ce	NS	NS	NS	NS	NS	NS

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。



-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。

图 3 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯各器官磷积累量占比的影响

Fig.3 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on proportion of phosphorus accumulation in different organs of sweet potato at seedling stage

## 2.5 接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期根际土壤速效钾、有效磷含量的影响

如表 8 所示,钾显著影响甘薯苗期根际土壤速效钾含量,对有效磷含量没有显著影响。钾、Fm、Ce 以及钾和 Fm 交互作用、钾和 Ce 交互作用均不显著影响甘薯根际土壤速效钾和有效磷含量。并且,不管是缺钾还是施钾条件下,接种 Fm 或者 Ce 对甘薯苗期根际土壤速效钾和有效磷含量均没有显著影响。因此,施钾提高甘薯根际土壤速效钾含量,对根际土壤有效磷含量没有影响。

表 8 接种丛枝菌根真菌对苗期甘薯根际土壤速效钾、有效磷含量的影响

Table 8 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on contents of available potassium and available phosphorus in rhizosphere soil of sweet potato at seedling stage

项目	速效钾含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
-K-Fm	50.00±6.81cd	50.47±4.00a
-K+Fm	47.00±4.51cd	52.26±0.73a
-K-Ce	44.33±2.60d	46.67±2.99a
-K+Ce	54.67±9.17bcd	47.49±1.83a
+K-Fm	82.67±6.49ab	46.00±2.76a
-K+Fm	76.33±5.04abc	48.24±1.39a
-K-Ce	98.33±3.48a	45.26±0.92a
-K+Ce	86.33±7.97a	50.40±2.47a
K	<0.01	NS
Fm	NS	NS
Ce	NS	NS
K×Fm	NS	NS
K×Ce	NS	NS

-K、+K、-Fm、+Fm、-Ce、+Ce 见表 2 注。同等钾水平下 -Fm 与 +Fm 以及 -Ce 与 +Ce 之间不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.6 甘薯苗期根系丛枝菌根真菌定殖率、植株生物量、根系形态指标、磷和钾吸收的相关性

进一步分析甘薯苗期根系丛枝菌根真菌侵染率、甘薯生物量、根系形态指标、磷和钾含量及积累量的相关性。如表 9 所示,甘薯苗期根干质量与总根长、根表面积、根平均直径、根体积显著正相关。施钾能够促进甘薯苗期根系干质量(表 2),显著增加根表面积和根体积(表 3),因此施钾通过优化甘薯根系形态促进根系干物质积累。在施钾条件下接种 Ce 能够显著提高甘薯苗期根干质量(表 2),显著增加根表面积、根平均直径、根体积(表 2),因此,在施钾条件下接种 Ce 通过增加根表面积、根平均直径、根体积来促进根系干物质积累。地上部干质量和全株干质量均与根际土壤速效钾含量显著正相关,与根际土壤有效磷含量显著负相关(表 9),而施钾显著增加根际土速效钾含量,对有效磷含量没有显著影响(表 8),接种丛枝菌根真菌对根际土壤速效钾和有效磷含量均没有显著影响(表 8),表明施钾通过增加根际土壤速效钾含量从而促进甘薯干物质积累。施钾显著增加甘薯苗期根际土速效钾含量(表 8),促进钾的吸收和积累(表 4、表 5),而根际土速效钾含量与全株钾含量和钾积累量显著正相关(表 9),表明施钾通过增加根际土壤速效钾含量从而促进甘薯对钾的吸收和积累。

## 3 讨论

丛枝菌根真菌能够与 80% 的陆生植物形成共生关系,增强宿主植物对养分如磷、氮、钾和硫酸盐等的吸收,改善养分亏缺条件下植株的生长发育,促进植物生长<sup>[7-8]</sup>。Chandrasekaran 等研究结果显示,



表9 甘薯苗期生物量、根系形态指标、磷、钾吸收相关性分析

Table 9 Correlation analysis of biomass, root morphological indexes, P and K absorption of sweet potato at seedling stage

项目	侵染率	根干质量	地上部分干质量	全株干质量	总根长	根表面积	根平均直径	根体积	根际土壤有效钾	根际土壤速效磷	全株钾含量	全株钾积累量	全株磷含量	全株磷积累量
侵染率		0.34	-0.05	0.06	0.27	0.40 *	0.52 **	0.49 *	-0.05	0.25	-0.17	-0.05	-0.21	-0.02
根干质量	0.34		0.46 *	0.68 **	0.65 **	0.69 **	0.44 *	0.68 **	0.27	-0.20	0.21	0.52 **	-0.28	0.43 *
地上部分干质量	-0.05	0.46 *		0.96 **	0.36	0.39	0.33	0.39	0.50 *	-0.44 *	0.37	0.80 **	0.13	0.90 **
全株干质量	0.06	0.68 **	0.96 **		0.49 *	0.53 **	0.40	0.53 **	0.49 *	-0.42 *	0.37	0.82 **	0.02	0.87 **
总根长	0.27	0.65 **	0.36	0.49 *		0.95 **	0.31 *	0.85 **	0.26	-0.13	0.18	0.36	0.01	0.43 *
根表面积	0.40 *	0.69 **	0.39	0.53 **	0.95 **		0.59 **	0.97 **	0.32	-0.11	0.16	0.39	-0.05	0.44 *
根平均直径	0.52 **	0.44 *	0.33	0.40	0.31	0.59 **		0.75 **	0.31	0	0.03	0.28	-0.24	0.25
根体积	0.49 *	0.68 **	0.39	0.53 **	0.85 **	0.97 **	0.75 **		0.35	-0.09	0.15	0.39	-0.09	0.42 *
根际土壤有效钾	-0.05	0.27	0.50 *	0.49 *	0.26	0.32	0.31	0.35		-0.03	0.68 **	0.72 **	0.24	0.53 **
根际土壤速效磷	0.25	-0.20	-0.44 *	-0.42 *	-0.13	-0.11	0	-0.09	-0.13		-0.11	-0.29	-0.11	-0.42 *
全株钾含量	-0.17	0.21	0.37	0.37	0.18	0.16	0.03	0.15	0.68 **	-0.11		0.83 **	0.26	0.45 *
全株钾积累量	-0.05	0.52 **	0.80 **	0.82 **	0.36	0.39	0.28	0.39	0.72 **	-0.29	0.83 **		0.14	0.78 **
全株磷含量	-0.21	-0.28	0.13	0.02	0.01	-0.05	-0.24	-0.09	0.24	-0.11	0.26	0.14		0.49 *
全株磷积累量	-0.02	0.43 *	0.90 **	0.87 **	0.43 *	0.44 *	0.25	0.42 *	0.53 **	-0.42 *	0.45 *	0.78 **	0.49 *	

表中数值代表相关系数,\* 和\*\* 分别表示相关性达显著( $P<0.05$ )和极显著水平( $P<0.01$ )。

接种 AMF 改变了根系形态,增加了根表面积、根体积<sup>[14]</sup>。甘薯对菌根的依赖性较强,能够与多株丛枝菌根真菌建立共生关系。已有研究结果表明,接种丛枝菌根真菌地衣球囊霉(*Rhizophagus irregularis*)能够显著提高甘薯根平均直径、根体积、根生物量<sup>[17]</sup>。甘薯是典型的块根作物,甘薯根系发育分为2个阶段:根系的生长和分化、块根的膨大和产量形成。苗期发根量、生物量以及生理状况等直接影响收获期的产量<sup>[21]</sup>,甘薯苗期根系总长度、根表面积、根尖数量等指标决定了甘薯的养分和水分吸收效率,根平均直径和根体积则反映根系分化状况<sup>[22]</sup>。本研究结果表明,在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)能够协调甘薯地上部分和根部生长,降低干物质向叶片和叶柄的分配,有利于干物质向根部的分配,表明在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)更有利于促进甘薯根系生长。并且,在施钾条件下接种Ce显著增加根部干物质的积累,显著提高甘薯苗期根体积、根平均直径和根表面积,而增加的根干质量主要源于根体积、根平均直径和根表面积的增加,表明在施钾条件下接种Ce通过优化甘薯根系形态从而促进甘薯根系干物质的积累。因此,在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)是优化甘薯苗期根系形态、促进根系生长的有效手段。

根系是植物吸取水分和养分的重要器官。丛枝

菌根真菌对宿主植物的促生效应可能通过改变根系形态实现碳的合理分配和从土壤中获得更多的水分和养分等资源<sup>[23-26]</sup>。丛枝菌根真菌可以通过增加根区某些营养物的有效性从而促进根系的生长<sup>[27-29]</sup>。甘薯是一种典型的喜钾作物,钾是影响甘薯根系生长、根系生理以及最终产量的关键因素。本研究结果表明,施钾显著增加甘薯苗期根际土壤速效钾含量,促进钾的吸收和积累,而根际土壤速效钾含量与全株钾含量和钾积累量显著正相关,表明施钾通过增加根际土壤速效钾含量从而促进甘薯对钾的吸收和积累。此外,在施钾条件下接种Ce对甘薯苗期全株钾积累量没有显著影响,但是降低叶柄钾的积累以及钾向叶柄的分配,有利于根部钾的积累,表明在施钾条件下接种Ce可以促进甘薯根系钾的积累。施钾和接种丛枝菌根真菌均能够促进枸杞根系生长和钾积累,并且存在协同作用<sup>[13]</sup>。与此不同的是,施钾促进甘薯钾的吸收和积累,在施钾条件下接种Ce可以促进根部钾的积累,而根部钾的积累有利于后期甘薯根系的生长及膨大。

普遍认为,丛枝菌根真菌对植物生长的促进作用很大程度上归因于促进植物吸收更多的磷<sup>[14]</sup>。在本研究中,接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)显著优化甘薯苗期根系形态,而甘薯苗期总根长、根表面积和根体积与甘薯全株磷积累量显著正相关,但是接种丛枝菌根真菌并不影响甘薯苗期各个器官磷积

累,表明接种丛枝菌根真菌优化的根系形态并没有进一步促进甘薯苗期磷的吸收和积累。在本研究中,施钾和接种丛枝菌根真菌对甘薯苗期根际土壤有效磷含量并没有显著影响,这可能是磷吸收和积累没有增加的原因。本研究只探讨了丛枝菌根真菌对甘薯苗期生物量、根系形态以及磷、钾吸收和积累的影响,关于甘薯整个生育期的响应有待进一步研究。

综上所述,在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)能够协调甘薯地上部分和根部生长,降低干物质向叶片和叶柄的分配,有利于干物质向根部分配,通过优化甘薯根系形态促进甘薯根系干物质的积累,并且促进根部钾的积累。因此,在施钾条件下接种丛枝菌根真菌(尤其是Ce)是优化甘薯苗期根系形态、促进根系生长的有效手段,有利于后期甘薯根系的生长及膨大,具有提高甘薯产量的潜能。该研究为更科学地将丛枝菌根真菌应用于甘薯栽培提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 王欣,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 483-492.
- [2] 宁运旺,马洪波,张辉,等. 氮、磷、钾对甘薯生长前期根系形态和植株内源激素含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1326-1332.
- [3] LIU J J, LIU J L, LIU J H, et al. The potassium transporter SLHAK10 is involved in mycorrhizal potassium uptake[J]. Plant Physiology, 2019, 180(1): 465-479.
- [4] 武维华. 植物响应低钾胁迫及钾营养高效的分子调控网络机制研究[J]. 中国基础科学, 2007(2): 18.
- [5] 宁运旺,曹炳阁,朱绿丹,等. 施钾水平对甘薯干物质积累与分配和钾效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(2): 320-325.
- [6] 齐鹤鹏,安霞,刘源,等. 施钾量对甘薯产量及钾素吸收利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 84-89.
- [7] 李大荣,杨文港,向嘉. 丛枝菌根对植物营养元素吸收及生长影响的研究进展[J]. 南方农业, 2018, 12(27): 143-145.
- [8] 黄艳飞,吴庆丽,万群,等. 丛枝菌根真菌的研究进展[J]. 现代农业, 2019(12): 9-12.
- [9] 张学林,李晓立,何堂庆,等. 丛枝菌根真菌对玉米籽粒产量和氮素吸收的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(8): 1603-1615.
- [10] 刘婷婷,刘智蕾,宋佳媚,等. 不同温度与供氮水平下丛枝菌根真菌对水稻养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 885-890.
- [11] 彭琪,何红花,张兴昌. 低磷环境下接种丛枝菌根真菌促进紫花苜蓿生长和磷素吸收的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 293-300.
- [12] 赵方贵,王玮,车永梅,等. AM真菌提高烟草钾含量机制的初步研究[J]. 植物生理学报, 2014, 50(7): 1002-1008.
- [13] 王园园. 丛枝菌根真菌和钾调控宁夏枸杞耐盐及钾吸收机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- [14] CHANDRASEKARAN M. A meta-analytical approach on arbuscular mycorrhizal fungi inoculation efficiency on plant growth and nutrient uptake[J]. Agriculture, 2020, 10: 370.
- [15] 盖京苹,冯固,李晓林. 接种丛枝菌根真菌对甘薯生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 116-118.
- [16] ALHADIAH N, PAP Z, LADANYI M, et al. Mycorrhizal inoculation effect on sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) seedlings[J]. Agronomy, 2021, 11(10): 2019.
- [17] 李欢,杜志勇,刘庆,等. 蚯蚓菌根互作对土壤酶活、甘薯根系生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 209-215.
- [18] 王幼珊,张淑彬,张美庆. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源[M]. 北京:中国农业出版社, 2012.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [20] 汪吉东,王火焰,许仙菊,等. 低钾胁迫下不同钾效率甘薯的钾吸收利用规律研究[J]. 土壤, 2016, 48(1): 42-47.
- [21] 王庆美,张立明,王振林. 甘薯内源激素变化与块根形成膨大的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2414-2420.
- [22] WANG G, FAHEY T J, XUE S, et al. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, west China[J]. Oecologia, 2013, 171: 583-590.
- [23] 郭哈铃,刘世俊,徐静,等. 丛枝菌根真菌对双子叶植物生长和根系特征的影响:整合分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1855-1864.
- [24] 姜磊,李焕勇,张芹,等. AM真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长与生理代谢的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 152-160.
- [25] 陈琪,程浩,李琴,等. 丛枝菌根真菌促进南美蟛蜞菊在低磷环境下的生长[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 103-107.
- [26] 崔令军,刘瑜霞,林健,等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对槲栎根系生长和激素的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 119-124.
- [27] MARSCHNER H. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2012: 369-388.
- [28] PONS S, FOURNIER S, CHERVIN C, et al. Phytohormone production by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*[J]. PLoS One, 2020, 15(10): 0240886.
- [29] PILIAROVÁ M, ONDREIČKOVÁ K, HUDCOVICOVÁ M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-their life and function in ecosystem[J]. Agriculture (Pol'nohospodárstvo), 2019, 65(1): 3-15.

(责任编辑:张震林)