

江 彬, 毕银丽, 申慧慧, 等. 氮营养与 AM 真菌协同对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2) : 327-332.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.02.014

## 氮营养与 AM 真菌协同对玉米生长及土壤肥力的影响

江 彬, 毕银丽, 申慧慧, 刘 浩

(中国矿业大学<北京>煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对东部草原煤矿区土壤贫瘠、生物种群单一以及植物抗逆性差等问题, 采用盆栽方法研究了施氮(0 mg/kg、100 mg/kg)与接种丛枝菌根(AM)真菌(0 g/kg、50 g/kg)协同对玉米生长状况、抗逆性和根际土壤化学性状的影响。结果表明, 单施氮、单接种 AM 真菌、联合施氮和接种 AM 真菌显著提高玉米干质量 23%~62%, 全株氮吸收量 77%~538%, 磷吸收量 39%~191%, 钾吸收量 42%~135%。其中, 施氮+接种 AM 真菌处理效果最好。同时, 3 个处理也显著提高叶片可溶性糖含量、降低相对电导率和脯氨酸含量, 增强了其抗逆性。其中施氮+接种 AM 真菌处理的可溶性糖含量最高, 相对电导率最低, 单施氮处理的脯氨酸含量最低。同一施氮水平下, 接种 AM 真菌显著降低土壤 pH 值, 却显著增加了土壤电导率、速效磷含量、速效钾含量、土壤总球囊霉素(T-GRSP)含量和易提取球囊霉素(EE-GRSP)含量。与单接 AM 真菌处理相比, 施氮+接种 AM 真菌处理能显著提高土壤电导率、速效钾含量和土壤易提取球囊霉素含量。综合来说, 氮肥与 AM 真菌协同处理有利于促进菌根效应的发挥, 促进玉米生长, 有效改善土壤肥力, 这为菌根肥料应用于东部矿区以进行微生物复垦和生态恢复提供了依据。

**关键词:** 氮营养; 丛枝菌根; 玉米; 抗逆特性; 土壤化学性质

**中图分类号:** S513.06 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)02-0327-06

## Synergetic effects of *Arbuscular mycorrhizal* fungus and nitrogen on maize growth and soil fertility

JIANG Bin, BI Yin-li, SHEN Hui-hui, LIU Hao

(State Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology <Beijing>, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor soil, single biological population and poor stress resistances of plants in the coal mining area of Eastern Prairie of China, pot experiments were carried out to investigate the effects of nitrogen fertilization (0 mg/kg, 100 mg/kg) and inoculation of *Arbuscular mycorrhizal* (AM) fungus (0 g/kg, 50 g/kg) on maize growth, nutritional conditions, plant stress resistances, and rhizospheric soil chemical properties. The results showed that the treatments of solo nitrogen fertilization, solo inoculation of AM fungus, combination of nitrogen and AM fungus could significantly increase dry weight and plant nitrogen, phosphorus, potassium concentration of maize, by 23%~62% and 77%~538%, 39%~191% and 42%~135%, respectively. The combination of nitrogen and AM fungus application exhibited

the best effect. Meanwhile, above three treatments significantly increased leaf soluble sugar concentration, reduced relative electrical conductivity and proline concentration, with the combination of nitrogen and AM fungus showing the best effect as well. Under the same nitrogen level, the inoculation of AM fungus reduced the soil pH but increased soil electrical conductivity, available phosphorus and available potassium, T-GRSP and EE-GRSP.

收稿日期: 2016-09-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501106); 国家自然科学基金项目(51574253)

作者简介: 江 彬(1991-), 男, 四川富顺人, 硕士研究生, 主要从事土地复垦与生态重建等研究工作。(E-mail) kdjiangbin@163.com

通讯作者: 毕银丽, (E-mail) ylb88@126.com

Compared with solo AM fungus application, combination of nitrogen fertilization and AM fungus increased soil conductivity, available potassium and EE-GRSP. Generally, combination of nitrogen fertilization and AM fungus inoculation could promote mycorrhizal effect and the growth of maize, and effectively improve the soil fertility.

**Key words:** nitrogen nutrition; arbuscular mycorrhizal fungus; maize; resistance properties; soil chemical properties

东部草原煤矿区气候干旱、酷寒、土层瘠薄、植被稀少,采煤扰动,严重破坏当地土壤结构和地表植被,引发植被死亡、土壤退化等环境问题,如何进行生态恢复已经成为该矿区亟须解决的问题。氮元素是植物体内蛋白质、核酸、磷脂和某些生长激素的重要组成部分之一,适量增加氮营养可以通过影响植物光合作用、抗氧化系统、内源激素和植物水分吸收利用状况,从而促进植物生长发育,提高作物产量和品质,同时施氮也会改变土壤生化性质,影响土壤肥力<sup>[1-8]</sup>。但是植物的氮吸收能力有限,如果施氮不当,不仅会造成氮素大量损失,还会抑制植物生长,导致作物减产,污染环境<sup>[9]</sup>。因此,如何合理施用氮肥,提高植物的氮吸收能力,降低氮素损失,促进植物生长,恢复土壤,不仅是农业可持续发展的关键,也对东部草原煤矿区进行生态恢复具有至关重要的作用。目前对采煤受损土地比较有效的治理是生物治理,即利用生物本身特性逐步改善土壤质量,促进植物吸收养分,提高植物抗逆性,恢复生态环境,实现矿区可持续发展。

丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhizal*, AM)真菌是陆地生态系统中,分布最广泛的一种有益土壤真菌,能与陆地上大部分有花植物形成菌根共生体<sup>[10]</sup>。有研究表明,AM真菌不但能增加植物生物量,促进植物对氮、磷、钾的吸收,还能改良根际土壤微生物环境,提高土壤肥力<sup>[11-14]</sup>,降低极端环境对植物造成的伤害,提高其抗旱性、抗寒性和耐盐碱性,降低病虫害对植物的破坏,提高其抗病性及酶活性<sup>[15-19]</sup>,而AM真菌产生的土壤相关蛋白是土壤的一个重要碳库,同时可以增强土壤团聚体的稳定性,改善土壤基质,提高土壤肥力<sup>[6,8]</sup>。同时,AM真菌对氮素的吸收是促进植物对氮吸收的一个重要途径,目前已有学者对施氮量与AM真菌的协同作用进行了研究。付淑清等<sup>[20]</sup>研究发现,不同施氮水平下接种AM真菌均显著提高了刺槐的生长量,降低了游离脯氨酸含量。赵青华等<sup>[21]</sup>试验结果表明,不同施氮水平下,接种AM真菌增加了茶树地上部干物质量、地下部干物质量和

总干物质量,增加茶叶氮、磷、钾和可溶性糖含量。贺学礼等<sup>[22]</sup>研究结果表明,不同施氮水平下接种AM真菌均可以提高黄芪生长量、叶片可溶糖含量、植株氮含量、植株磷含量。

东部草原煤矿区土壤贫瘠,采矿造成土层扰动,加剧了水土流失,尤其是氮素的损失,严重抑制了矿区植物生长和生态恢复。目前关于丛枝菌根对矿区生态修复的影响已取得一定进展,但是关于AM真菌与氮肥协同对矿区植物生长及土壤改良的研究鲜有报道。本文拟以矿区常见农作物玉米为宿主植物,以沙土为基质,模拟矿区干旱贫瘠状况,在温室盆栽条件下,研究AM真菌和氮协同对玉米生长、抗逆性、矿质养分调节及土壤化学性状的影响,以期为菌根作为生物肥料应用于东部干旱矿区,提高植物抗逆性,熟化矿区土壤,恢复矿区生态环境提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤为沙土,过1 mm筛,经121℃蒸汽灭菌1 h,取出放置7 d后待用。土壤基本理化性质为pH 7.44,有机碳0.34 g/kg,全氮0.05 g/kg,速效磷4.95 mg/kg,速效钾24.56 mg/kg,电导率(EC)840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,最大持水量为21.6%。

供试玉米种子由中国农业科学院中农种子公司提供,品种为品糯28。播种前用10%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 浸泡消毒15 min后用去离子水反复清洗数遍,在25℃黑暗培养箱中培养2 d,待播种。

试验供试菌种为摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*,其孢子密度为1 g菌剂38个孢子),由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所微生物室提供,经中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室通过玉米扩繁得到,侵染率为97%,接种剂为含有被侵染的玉米植株根系、孢子和菌丝的沙土混合物。

试验用盆规格为50 cm×32 cm×20 cm灰色塑料盆,洗净并用75%酒精消毒,风干待用。

## 1.2 试验设计与管理

试验设 4 个处理:不接菌且不施氮(CK)、单接 AM 真菌处理(Fm)、单施氮处理(N)、施氮且接种 AM 真菌处理(Fm+N)。每个处理 4 个重复,随机排列。试验在中国矿业大学(北京)日光温室中进行,于 2015 年 8 月 5 日开始布置,1 盆装土 45 kg,AM 真菌接种量为每 1 kg 灭菌沙土加入 50 g 菌剂充分混合,不接种处理加入与菌剂等质量的灭菌沙土。种植前向灭菌沙土中加入以  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{K}_4\text{SO}_2$  配置的营养液作为底肥,使供试土壤中磷、钾质量分数为 10 mg/kg、150 mg/kg,并按每 1 kg 土 100 mg N 的比例向灭菌沙土中加入  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶液进行施氮处理,浇水至土壤最大持水量,待水分平衡 1 d 之后播种,1 盆 8 颗。玉米出苗 7 d 后进行间苗,1 盆保持 4 株。采用称质量法浇水,7 d 1 次,保持土壤含水量为最大持水量的 70%。

玉米生长 60 d 收获,分别收获植株地上部、地下部,洗净,待用。取部分鲜根测定侵染率,剩下根系及地上部烘干测定干质量后粉碎,过 0.5 mm 筛,备用。收获前 1 d 采集不同处理玉米植株相同部位新鲜叶片,以测叶片相对含水量、相对电导率、脯氨酸含量、可溶性糖含量。

## 1.3 指标测定及方法

### 1.3.1 玉米生长指标测定

1.3.1.1 玉米植株地上部干质量、地下部干质量采用称质量法。

1.3.1.2 相对含水量 = (鲜质量 - 烘干质量) / (饱和吸水质量 - 烘干质量) × 100%。

1.3.1.3 抗逆性指标测定 相对电导率采用浸泡法测定,脯氨酸含量采用酸性茚三酮显色法测定,可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法测定。

1.3.1.4 植株全量元素测定 将植物叶片烘干粉碎,参照鲍士旦<sup>[23]</sup>方法,采用硫酸-过氧化氢消煮,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷和全钾含量利用德国斯派克生产的电感耦合等离子体发射光谱仪(Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, ICP-AES)测定。

1.3.2 土壤理化性质测定 土壤理化性质参照鲍士旦<sup>[23]</sup>方法测定,土壤 pH 值(水土比 2.5 : 1.0)和电导率(水土比 5.0 : 1.0)采用电位法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,速效磷采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提-钼锑抗比色法测

定,速效钾用碳酸铵浸提,采用 ICP-AES 测定<sup>[24]</sup>。

1.3.3 菌根相关指标测定 菌根侵染率测定采用 Phillips 和 Hayman 法<sup>[25]</sup>,菌丝密度的测定采用网格交叉法<sup>[26]</sup>,易提取球囊霉素(Easily extractable glomalin, EE-GRSP)和总球囊霉素(Total glomalin, T-GRSP)采用 Wright 等<sup>[27]</sup>的改进方法。

1.3.4 相关公式<sup>[28]</sup> 菌根侵染率 = 侵染根段数 / 观察总根段数 × 100%

菌根依赖性 = (接菌干质量 - 非接菌干质量) / 接菌干质量 × 100%

菌根贡献率 = (接菌含量 - 非接菌含量) / 接菌含量 × 100%

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮与接种 AM 真菌对玉米生长的影响

如表 1 显示,与 CK 相比,施氮和接种 AM 真菌处理均可促进玉米的生长,分别提高玉米地上干质量、地下干质量和总干质量 25% ~ 61%、11% ~ 67% 和 23% ~ 62%,差异显著。施氮处理下玉米地上干质量、地下干质量和总干质量均明显高于对照,而氮肥和 AM 真菌联合对玉米地上干质量、地下干质量和总干质量均促进效果最优,显著高于对照和其他处理。

Fm 处理的菌根侵染率略高于 Fm+N 处理,差异不显著,而 Fm+N 处理的菌丝密度显著高于 Fm 处理,说明施氮有利于菌丝的生长发育(表 1)。同时,CK 的菌根侵染率和菌丝密度不为 0,可能是在玉米生长过程中造成了一定的菌根污染。玉米菌根依赖性在不施氮与施氮处理下分别为 18%、14%,说明在土壤缺氮条件下玉米生长更依赖于菌根(表 1)。

### 2.2 施氮与接种 AM 真菌对玉米养分含量的影响

与对照相比,施氮与接种 AM 真菌均可促进玉米对氮、磷、钾的吸收,分别提高植株全氮、全磷和全钾吸收量 77% ~ 538%、39% ~ 191% 和 42% ~ 135%,除 Fm 处理外,其他处理与对照均差异显著(表 2)。同一施氮条件下,接种株玉米养分吸收量显著高于非接种株,且 Fm+N 处理的玉米养分吸收量显著高于其他处理的。同时,N 处理的植株全氮吸收量、全钾吸收量显著高于 Fm 处理,而全磷吸收量却显著低于 Fm 处理(表 2)。

玉米养分吸收量在不施氮条件下的菌根贡献率远高于施氮处理下的菌根贡献率,说明在土壤缺氮条件下,AM 真菌更能促进植株对养分的吸收(表 2)。

表 1 不同处理对玉米生长的影响

Table 1 Effects of different treatments on maize growth

处理	干质量 (g)			菌根特性		
	地上部	地下部	总和	侵染率 (%)	菌丝密度 (m/g)	菌根依赖性 (%)
CK	19.08±0.57c	3.22±0.18c	22.30±0.75d	4.44±2.22b	0.15±0.15cb	-
Fm	23.78±0.58b	3.58±0b	27.36±0.58c	91.11±4.44a	0.55±0.14b	18
N	26.95±0.28b	3.83±0.11b	30.78±0.35b	0±0b	0±0c	-
Fm+N	30.76±1.61a	5.38±0.12a	36.14±1.49a	88.89±5.88a	1.37±0.12a	14

表中数据为 4 个重复均值加减标准差,同列数据不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。CK: 不接种且不施氮处理; Fm: 单接种 AM 真菌处理; N: 单施氮处理; Fm+N: 施氮且接种 AM 真菌处理; -: 没有菌根依赖性。

表 2 不同处理对植株养分吸收量的影响

Table 2 Effects of different treatments on maize plant nutrient absorption

处理	全氮		全磷		全钾	
	吸收量 (g, 1 盆)	菌根贡献率 (%)	吸收量 (g, 1 盆)	菌根贡献率 (%)	吸收量 (g, 1 盆)	菌根贡献率 (%)
CK	0.13±0.01c	-	23.00±0.24d	-	0.62±0.03d	-
Fm	0.23±0.01c	41	51.00±2.50b	55	0.88±0.04c	29
N	0.64±0.01b	-	32.00±2.00c	-	1.29±0.04b	-
Fm+N	0.83±0.07a	23	67.00±1.75a	52	1.46±0.03a	12

表中数据为 4 个重复均值加减标准差,同列数据不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。CK、Fm、N、Fm+N 见表 1 注。 -: 没有菌根贡献率。

### 2.3 施氮与接种 AM 真菌对玉米抗逆性的影响

不同处理下玉米的抗逆性指标见表 3, 与 CK 相比, 施氮处理和接种 AM 真菌处理分别降低叶片相对电导率和叶片脯氨酸含量 18%~41% 和 11%~66%, 提高叶片可溶性糖含量 16%~37%, 差异显著。同一施氮条件下, 接种 AM 真菌显著降低叶片相对电导率, 且 Fm+N 处理的叶片相对电导率显著低于其他处理, 而 N 处理的叶片相对电导率高于 Fm 处理, 但差异不显著。施氮处理的叶片脯氨酸含量显著低于不施氮处理, N 处理的叶片脯氨酸含量最低。施氮处理的叶片可溶性糖含量明显高于不施氮处理的。同一施氮条件下, 接种 AM 真菌提高叶片可溶性糖含量, 但差异不显著, Fm+N 处理的叶片可溶性糖含量最高。

同一施氮条件下, 接种 AM 真菌显著降低叶片相对含水量, 施氮处理的叶片相对含水量明显高于不施氮处理, 说明施氮有利于提高叶片相对含水量, 而接种 AM 真菌在一定程度上抑制了叶片相对含水量的提高 (表 3)。

### 2.4 施氮与接种 AM 真菌对土壤基本理化性质的影响

由表 4 可知, 施氮处理下的土壤 pH 值、电导率高于不施氮处理的。同一施氮条件下, 接种 AM 真

菌降低土壤 pH 值, 提高土壤电导率, 且差异显著。

表 3 不同处理对玉米叶片抗逆性的影响

Table 3 Effects of different treatments on maize stress resistances

处理	相对电导率 (%)	相对含水量 (%)	脯氨酸含量 (mg/kg)	可溶性糖含量 (g/kg)
CK	13.84±0.48a	76.00±0.35b	850.00±2.31a	0.38±0 b
Fm	10.37±0.32b	65.00±2.09c	753.00±10.40b	0.44±0.04ba
N	11.28±0.25b	84.00±0.01a	289.00±17.32d	0.51±0.06a
Fm+N	8.23±0.61c	77.00±0.61b	558.00±1.73c	0.52±0.04a

表中数据为 4 个重复均值加减标准差, 同列数据不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。CK、Fm、N、Fm+N 见表 1 注。

施氮处理与接种 AM 真菌处理的土壤全氮含量高于 CK 的, 而 Fm+N 处理略低于 Fm 和 N 处理, 但各处理差异均不显著 (表 4)。同一施氮条件下, 接种 AM 真菌的处理显著提高土壤速效磷和速效钾含量, 且分别在 Fm 处理和 Fm+N 处理下含量最高, N 处理的含量最低 (表 4)。

### 2.5 施氮与接种 AM 真菌对菌根效应的影响

不同处理的土壤有机质含量、EE-GRSP 含量、T-GRSP 含量见表 5, 接种 AM 真菌处理的土壤有机质含量高于非接种处理, Fm+N 处理的土壤有机质含量最高, 各处理的土壤有机质含量差异均不显著。同一施氮条件下, 接种 AM 真菌处理的土壤 EE-

GRSP 含量、T-GRSP 含量显著高于非接种处理,且 Fm+N 处理最高,而 N 处理的土壤 EE-GRSP 含量、

T-GRSP 含量略低于 CK 处理,差异不显著。

表 4 不同处理对土壤基本化学性质的影响

Table 4 Effects of different treatments on soil chemical properties

处理	pH 值	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	全氮含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	速效磷含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	速效钾含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )
CK	7.20 $\pm$ 0.01b	628.00 $\pm$ 3.00d	39.00 $\pm$ 2.67a	9.68 $\pm$ 0.26bc	218.00 $\pm$ 3.38c
Fm	7.14 $\pm$ 0c	796.00 $\pm$ 1.20c	56.00 $\pm$ 8.08a	13.83 $\pm$ 0.27a	255.00 $\pm$ 0.27b
N	7.26 $\pm$ 0a	916.00 $\pm$ 6.11b	56.00 $\pm$ 8.08a	8.40 $\pm$ 1.26c	199.00 $\pm$ 1.68d
Fm+N	7.22 $\pm$ 0.01b	938.00 $\pm$ 3.18a	51.00 $\pm$ 4.67a	12.14 $\pm$ 0.60ba	284.00 $\pm$ 5.05a

表中数据为 4 个重复均值加减标准差,同列数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。CK、Fm、N、Fm+N 见表 1 注。

表 5 不同处理对菌根效应的影响

Table 5 Effects of different treatments on mycorrhizal effects

处理	有机质含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ )	易提取球囊霉素 含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	总提取球囊霉素 含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )
CK	0.34 $\pm$ 0.02a	9.08 $\pm$ 0.45c	64.00 $\pm$ 3.05b
Fm	0.35 $\pm$ 0.01a	15.47 $\pm$ 0.32b	115.00 $\pm$ 6.56a
N	0.34 $\pm$ 0.01a	9.02 $\pm$ 0.53c	64.00 $\pm$ 4.10b
Fm+N	0.36 $\pm$ 0.08a	18.80 $\pm$ 0.52a	140.00 $\pm$ 15.76a

表中数据为 4 个重复均值加减标准差,同列数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。CK、Fm、N、Fm+N 见表 1 注。

### 3 讨论

东部草原矿区以沙土为主,采矿造成土壤养分流失,给矿区农业带来巨大损失。因此,通过一定技术手段缓解矿区土壤贫瘠对玉米生长造成的影响,兼顾农业发展与环境效益非常重要。本试验结果表明,AM 真菌与氮协同有利于促进玉米生长,提高玉米生物量。同一施氮条件下,接种 AM 真菌显著提高玉米生物量和植株氮、磷、钾的吸收量,而 AM 真菌与施氮联合处理显著高于其他处理,说明接种 AM 真菌能促进植物对养分的吸收,促进植物生长发育,与付淑清<sup>[19]</sup>、赵青华等<sup>[21]</sup>、贺学礼等<sup>[22]</sup>的研究结果一致,这可能是因为 AM 真菌侵染玉米根系形成菌根共同体,并在土壤中形成菌丝网,而菌丝可以伸展到根际以外,有效吸收根系不能吸收的矿质元素,扩大玉米对矿质养分、水分的吸收范围,从而促进玉米的生长发育<sup>[29]</sup>。同时,不施氮条件下玉米干质量的菌根依赖性和植株氮、磷、钾吸收量的菌根贡献率远高于施氮条件,说明在土壤养分缺失的情况下,AM 真菌更能发挥其菌根效应,促进植物生长,这对缓解矿区因干旱缺水、土壤养分贫瘠造成植

物长势差,作物产量低等问题,提高植物对矿区土壤氮素利用率,有效地减少氮素流失,减轻矿区化肥污染具有至关重要的作用。

AM 真菌能减轻逆境(干旱、贫瘠、盐碱、洪涝等)对植物生长造成的损害,提高其抗逆性<sup>[30]</sup>。本试验结果表明,施氮与接种 AM 真菌均显著降低脯氨酸含量,显著提高叶片可溶性糖含量,说明接种 AM 真菌和施氮改善了植物生长条件,减少环境胁迫对玉米造成的影响,与付淑清<sup>[20]</sup>、赵青华等<sup>[21]</sup>、贺学礼等<sup>[22]</sup>研究结果一致,这可能是因为植物为了抵御环境胁迫消耗大量调节物质(如脯氨酸和可溶性糖)来促进自身生长,减少逆境对植物的伤害,从而提高植物抗逆性<sup>[31]</sup>,有利于解决神东矿区因气候干旱、自然环境恶劣造成的植物成活率低等问题,对当地农业及生态环境具有重要意义。

土壤中过量氮素的存在既会影响氮肥增产效用的发挥、增加氮素的损失,又易引起环境污染<sup>[32]</sup>。因此,确定适宜的施氮量和提高氮肥利用率是农业生态系统,特别是矿区生态系统急需解决的问题。本试验发现,施氮使土壤 pH 值和电导率有所增加,可能是氮素在沙土中被吸附能力差,根际氮营养奢侈吸收所导致的。但是,接种 AM 真菌后,土壤 pH 值显著下降。同时,施氮和 AM 真菌处理均可提高根际土壤 T-GRSP 含量、全氮含量,提高土壤肥力。其中,氮肥与 AM 真菌联合处理的效果最佳,一方面是因为 AM 真菌有利于挖掘土壤潜在磷营养,吸收利用土壤中的无机氮、简单的氨基酸和部分有机态氮<sup>[33]</sup>。同时,根外菌丝扩大营养吸收面积,改良根际土壤微生物环境,培肥土壤。另一方面是因为 AM 真菌促进了植物地下部、地上部生长,提高了植株矿质元素吸收量,而植物的生长发育反过来会影

响根际土壤发育,熟化土壤,从而提高土壤的肥力。因此,AM真菌与氮肥协同处理适合在东部草原煤矿区推广应用,既能减少化肥施用量,提高氮肥效率,减少环境污染,又能熟化土壤,促进植物生长,增加粮食产量,为菌根肥料的研发和东部草原煤矿区微生物复垦提供新的途径。

#### 参考文献:

- [1] 杨延兵,秦岭,陈二影,等. 追施氮肥对济谷16叶片叶绿素含量、农艺性状及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(12): 63-66.
- [2] 吴巍,赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 75-78.
- [3] 高璐阳,房增国. 不同施氮水平对甘薯生长前期根系生物学特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 122-125.
- [4] 周晓兵,张元明,王莎莎,等. 模拟氮沉降和干旱对准噶尔盆地两种一年生荒漠植物生长和光合生理的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(12): 1394-1403.
- [5] 安霞,董月,吴建燕,等. 氮肥形态对甘薯产量和养分吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1049-1054.
- [6] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 559-565.
- [7] 张艳梅,杨丽涛,李翔,等. 不同氮水平对三个甘蔗品种氮代谢关键酶活性及相关活性物质含量的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(5): 766-771.
- [8] 陈林,张佳宝,赵炳梓,等. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 675-683.
- [9] 陈宝明. 施氮对植物生长、硝态氮累积及土壤硝态氮残留的影响[J]. 生态环境学报, 2006, 15(3): 630-632.
- [10] 李少朋,毕银丽,陈岫圳,等. 外源钙与丛枝菌根真菌协同对玉米生长的影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 109-116.
- [11] 徐洪文,卢妍,朱先灿. 丛枝菌根对玉米叶片SPAD值及光合作用光响应特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 119-121.
- [12] 毕银丽,陈书琳,孔维平,等. 接种微生物对大豆生长及其根际土壤的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(1): 121-126.
- [13] 王振楠,杨美玲,刘鸯,等. 丛枝菌根真菌对红花花生及根际土壤微环境的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 904-909.
- [14] 王瑾,毕银丽,邓穆彪,等. 丛枝菌根对采煤沉陷区紫穗槐生长及土壤改良的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(11): 26-32.
- [15] 陈婕,谢靖,唐明. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对紫穗槐生长和抗旱性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 142-148.
- [16] 张林平,齐国辉,郭强. 枝菌根真菌对君迁子幼苗生长及抗寒性的影响[J]. 河北果树, 2003(1): 6-8.
- [17] 冯固,张福锁. 丛枝菌根真菌对棉花耐盐性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 21-24.
- [18] 汪茜,龙艳艳,李冬萍,等. 5种染色剂对生姜根系丛枝菌根(AM)真菌的染色效果比较[J]. 南方农业学报, 2015, 46(8): 1425-1429.
- [19] 王倡宪,李晓林,宋福强,等. 两种丛枝菌根真菌对黄瓜苗期枯萎病的防效及根系抗病相关酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 53-57.
- [20] 付淑清,屈庆秋,唐明,等. 施氮和接种AM真菌对刺槐生长及营养代谢的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(1): 95-100.
- [21] 赵青华,孙立涛,王玉,等. 丛枝菌根真菌和施氮量对茶树生长、矿质元素吸收与茶叶品质的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(2): 164-170.
- [22] 贺学礼,刘媿,赵丽莉. 接种丛枝菌根对不同施氮水平下黄芩生理特性和营养成分的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2118-2122.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 田晓娅. 快速测定土壤中速效P、K的ICP—AES分析方法研究[J]. 光谱实验室, 1997, 14(4): 40-43.
- [25] 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(1): 158-168.
- [26] ABBOTT L K, ROBSON A D, DE BOER G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus Fasciculatum* [J]. New Phytologist, 1984, 97(3): 437-446.
- [27] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [28] 贺学礼,高露,赵丽莉. 水分胁迫下丛枝菌根AM真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1029-1037.
- [29] 李元敬,刘智蕾,何兴元,等. 丛枝菌根共生体的氮代谢运输及其生态作用[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 861-868.
- [30] 孙吉庆,刘润进,李敏. 丛枝菌根真菌提高植物抗逆性的效应及其机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2012, 48(9): 845-852.
- [31] 郭辉娟,贺学礼. 水分胁迫下AM真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5933-5940.
- [32] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [33] 邓胤,申鸿,郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5627-5635.

(责任编辑:王妮)