

不同磷水平下接种AM真菌对采煤塌陷区土壤GRSP量及玉米生长的影响

韩阳, 郝鲜俊, 张又丹

(山西农业大学资源环境学院, 山西 太原 030801)

摘要:煤炭大量开采造成地面塌陷,使土壤结构破坏,肥力下降,阻碍作物正常生长和对养分的吸收。丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AM真菌)在恢复退化的农林生态系统中具有重要的生理功能,尤其促进对土壤磷的吸收。通过盆栽试验,研究4个施磷水平(0、25、50和100 mg/kg)下单接种摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, G.m)、双接种幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*, G.e)与摩西球囊霉对采煤塌陷区土壤球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)、玉米生长及地上部磷吸收的影响。结果表明,接种与磷水平及他们之间的交互作用对AM真菌丛枝丰度、株高、茎粗和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)量具有显著影响($P<0.05$);接种处理AM真菌丛枝丰度在0.29%~25.22%之间,同一磷水平双接种处理显著高于单接种处理($P<0.05$)。而且GRSP量与AM真菌丛枝丰度表现出显著的二次曲线相关。相同磷水平下,总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)量均呈双接种 \geq 单接种 $>$ 不接种,同一接种处理GRSP量随磷水平提高先升后降。虽然单接种和不接种处理在不同磷水平间对玉米生长的影响差异不显著,但是双接种处理显著提高了玉米株高、茎粗、地上部干质量及地上部吸磷量,表现为50、100 mg/kg磷水平显著高于0、25 mg/kg磷水平;相关性分析表明,AM真菌丛枝丰度与GRSP量、株高、茎粗、地上部磷量呈显著正相关。

关键词:磷水平; AM真菌; 采煤塌陷区; 球囊霉素相关土壤蛋白; 玉米

中图分类号: S154.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.08.004

韩阳,郝鲜俊,张又丹. 不同磷水平下接种AM真菌对采煤塌陷区土壤GRSP量及玉米生长的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(8):18-24.

0 引言

煤炭是我国重要的能源,95%的煤炭来自地下井工开采,过度开采形成大面积地下采空区,造成地面塌陷。山西是煤炭资源大省,目前已有至少8 000 km²地面采空塌陷^[1],地表塌陷不仅破坏土壤原有结构,还会引起水土流失、土地荒漠化,降低土壤生物活性,使土壤保水保肥能力降低,肥力下降,阻碍作物健康生长。旭日干^[2]通过对煤矿区土壤的研究发现,土壤微生物数量、丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AM真菌)种的丰度和孢子密度均呈现未受扰动区 $>$ 过渡区 $>$ 采煤塌陷区。近年来有许多针对矿区土壤复垦的研究^[3-5],其中微生物复垦技术,因成本低、复垦周期短、适用性强等优点被广泛采用。AM真菌是自然界中最常见的微生物,能和90%以上有花植物根系形成菌根共生体,AM真菌在采煤塌陷区的应用已取得一定效果。

AM真菌孢子密度、丛枝丰度、菌根侵染率可以反映菌根真菌与宿主植物的亲和程度^[6-8],在矿区复垦土壤上接种AM真菌可以改善土壤理化性状^[9],帮助植物吸收必需的营养元素^[10],促进植物生长^[11]。球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin-related soil protein, GRSP)是AM真菌分泌的一种含金属离子的糖蛋白,是土壤有机质及有机碳库的重要组成部分,能够改善土壤结构,促进土壤物质循环^[12]。李少朋等^[13]发现,接种AM真菌可以显著提高沙质退化矿区玉米根际土壤T-GRSP和EE-GRSP量,并提高玉米根系对土壤氮磷钾的吸收,促进玉米生长。土壤磷水平较低时会激发AM真菌生长,而含磷量较高时会显著抑制AM真菌侵染植物根

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41601327);山西省回国留学人员科研基金项目(2015-061)

作者简介:韩阳(1991-),男,硕士研究生,主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail: hanyanglife@163.com

通信作者:郝鲜俊(1976-),女,副教授,博士,主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail: haoxianjun660@126.com

系和根外孢子的萌发^[4]。前期试验表明,在采煤塌陷矿区土壤上,菌根侵染率与土壤磷水平呈显著正相关,但磷水平与AM真菌对采煤塌陷矿区土壤GRSP量及与作物生长关系的影响还少见报道。为此,以玉米为宿主植物,研究不同磷水平下接种AM真菌对土壤GRSP量及与玉米生长和吸磷量关系的影响,以期为提高矿区土壤GRSP量,改善土壤结构,促进作物健康生长及对磷的吸收提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015年4月25日在山西农业大学资源环境学院实验站日光温室大棚内进行。供试土壤采自山西省介休市连福镇金山坡煤矿塌陷区(112°06'17"—112°08'00"E,36°59'30"—37°01'00"N),为石灰性褐土,土壤pH值为8.44,有机质、全氮、全磷、全钾质量分数为17.89、0.1、0.06、1.04 g/kg,有效磷、速效钾质量分数为9.01、94.2 mg/kg。土壤自然风干后过2 mm筛,装入灭菌袋,121 °C下高压蒸汽灭菌2 h后备用。

供试AM真菌为幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*, G.e, 编号BGC NM03F)和摩西球囊霉(*Glomus moss-eae*, G.m, 编号BGC JX04B)由北京市农林科学院植物营养与资源研究所BGC菌种库提供。菌种预先经白三叶草(*Trifolium spp.*)盆栽繁殖3个月,采集含有AM真菌孢子、根外菌丝体和侵染根段的土样混合物作为接种剂,接种剂真菌孢子密度分别为63个/g(G.e)和35个/g(G.m)。供试宿主植物为玉米(*Zea mays* L.),品种为“长玉16”,选取大小一致,籽粒饱满的种子,在10% H₂O₂溶液中进行表面消毒15 min,用无菌水冲洗数次后,沥干水备用。

1.2 试验设计

试验以不接种处理为对照(CK),设单接种(G.m)、双接种(G.e+G.m)处理,每个处理设4个施磷水平,分别施入过磷酸钙0、25、50、100 mg/kg,共12个处理,每个处理重复3次。栽种玉米塑料盆规格为:19 cm(高)×25 cm(盆口直径)×15 cm(盆底直径),每盆装土6 kg,以尿素和硫酸钾作为底肥,肥料均一次性施入,试验期间不进行任何施肥处理,使N和K₂O量统一在150 mg/kg水平。接菌处理每盆施加接种剂30 g,为使土壤微生物区系保持一致,不接种处理每盆加入30 g灭菌菌剂及30 mL AM真菌菌种滤液。每盆播种玉米6粒,出苗7 d后,间苗,每盆留玉米4株,生长100 d后收获,试验期间控制温度为(25±3)°C,采用称质量-浇水法维持土壤含水率为田间持水率的70%。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 AM真菌丛枝丰度及玉米生长指标测定

玉米收割前,用卷尺和游标卡尺分别对株高和茎粗进行测量。收割后,用自来水清洗根系部分附着的泥土,将玉米地上部分和根系分开,根系带回实验室放在-20 °C的冰箱中保存备用,AM真菌丛枝丰度的测定采用Phillips和Hayman染色法^[5]。地上部分先在105 °C下杀青30 min,然后70 °C烘至恒质量,测定玉米地上部干质量。用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钒钼黄比色法测定植株全磷量。地上部磷吸收量为玉米地上部干质量与地上部含磷量的乘积。

1.3.2 土壤化学性质测定

土壤pH值采用1:1水溶液浸提,酸度计测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用HClO₄-H₂SO₄消煮法测定;土壤有效磷采用NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用NaOH熔融法测定;土壤速效钾采用火焰光度法测定。详细步骤参照鲍士旦的《土壤农化分析》^[6]。

1.3.3 球囊霉素相关土壤蛋白量测定

参照Janos等^[7]的方法提取总球囊霉素相关土壤蛋白(Total glomalin-related soil protein, T-GRSP)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(Easily extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP)。EE-GRSP提取:将1 g土样与8 mL柠檬酸钠浸提剂(20 mmol/L、pH 7.0)加入塑料离心管中,加盖、摇匀,放入高压灭菌锅,于121 °C下提取0.5 h后,在10 000 g下离心6 min,收集上清液,置于4 °C下保存。T-GRSP提取:将1 g土样与8 mL柠檬酸钠浸提剂(50 mmol/L、pH 8.0)加入塑料离心管中,加盖、摇匀,放入高压灭菌锅,于121 °C下提取1 h,在10 000 g下离心6 min,收集上清液;每个样品重复提取5次,直至离心管内上清液不再呈红棕色,将收集的上清液置于4 °C下保存。

GRSP量采用Brad-ford法测定。吸取0.5 mL上清液,加入5 mL考马斯亮蓝G-250染色剂,加盖、摇匀,

显色 10 min 后,于 595 nm 波长下比色。用牛血清蛋白作为标准液,绘制标准曲线,以 1 g 土样中蛋白质的毫克数表示 GRSP 量。

1.4 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2010 进行整理,并对 GRSP 量与 AM 真菌丛枝丰度进行回归分析及作图,用 SAS 9.4 进行双因素方差分析及 Pearson 相关性分析,采用 Duncan's 新复极差法进行平均数多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对 AM 真菌丛枝丰度及 GRSP 量的影响

由表 1 可知,接种、磷水平及二者间的交互作用对 AM 真菌丛枝丰度和 EE-GRSP 量均有显著影响($P < 0.05$),而 T-GRSP 量仅在接种处理间具有显著影响。

表 1 AM 真菌丛枝丰度及 GRSP 量方差分析

因素	丛枝丰度		总球囊霉素相关土壤蛋白		易提取球囊霉素相关土壤蛋白	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
接种	432.68	0.00*	68.08	0.00*	489.79	0.00*
磷水平	36.22	0.00*	2.93	0.05 ^{NS}	9.40	0.00*
接种×磷水平	38.23	0.00*	2.47	0.05 ^{NS}	4.55	0.00*

注 F 值表示 F 统计量, P 值表示截尾概率; * 表示当 $P < 0.05$ 时,影响显著; NS 表示当 $P > 0.05$ 时,影响不显著。下同。

2.1.1 AM 真菌丛枝丰度变化情况

不同处理 AM 真菌丛枝丰度如表 2 所示。不接种处理均未检测到玉米根系菌根侵染,丛枝丰度为 0。接种 AM 真菌后丛枝丰度处在 0.29%~25.22% 之间,且同一磷水平均呈双接种 > 单接种,且差异性显著 ($P < 0.05$)。单接种处理 AM 真菌丛枝丰度在 0 mg/kg 磷水平时最低,为 0.29%,且随磷水平提高呈先升后降的变化趋势,50 mg/kg 磷水平时达 8.78%,显著高于其他磷水平 ($P < 0.05$)。双接种处理 AM 真菌丛枝丰度在 25 mg/kg 磷水平时最高,与不施磷处理无显著差异,但较 50、100 mg/kg 磷水平分别提高 1.15 倍和 2.06 倍。

表 2 不同磷水平各处理 AM 真菌丛枝丰度及 GRSP 量

磷水平/(mg·kg ⁻¹)	接种处理	丛枝丰度/%	总球囊霉素相关土壤蛋白/(mg·kg ⁻¹)	易提取球囊霉素相关土壤蛋白/(mg·kg ⁻¹)
0	CK	未检出	4.16±0.33e	1.16±0.07c
	G.m	0.29±0.09f	5.52±0.22b	1.56±0.05b
	G.e+G.m	21.28±2.75ab	5.94±0.02ab	1.80±0.02a
25	CK	未检出	4.67±0.22d	1.18±0.04c
	G.m	4.76±1.47e	5.57±0.45ab	1.79±0.05a
	G.e+G.m	25.22±1.69a	5.82±0.14ab	1.83±0.05a
50	CK	未检出	5.03±0.04cd	1.24±0.06c
	G.m	8.78±1.22cd	5.45±0.32bc	1.75±0.03a
	G.e+G.m	11.71±2.30c	6.00±0.02a	1.84±0.08a
100	CK	未检出	4.77±0.21d	1.20±0.07c
	G.m	0.41±0.19f	5.44±0.32bc	1.57±0.07b
	G.e+G.m	8.25±2.46d	5.60±0.06ab	1.81±0.05a

注 所有数据均为平均值±标准差,同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

2.1.2 GRSP 量变化情况

不同处理 GRSP 变化情况见表 2。相同磷水平接种 AM 真菌显著提高 T-GRSP 量,单接种较不接种处理提高幅度达 0.3%~32.69%,双接种较不接种处理提高幅度达 17.4%~42.79%,而接种处理间差异不显著(50 mg/kg 磷水平除外)。所有处理 T-GRSP 量均随磷水平提高先升后降,不接种和双接种处理在 50 mg/kg 磷水平时最大,单接种处理在 25 mg/kg 磷水平时最大。

与 T-GRSP 量变化一致,相同磷水平下,EE-GRSP 量也表现为接种处理显著高于不接种处理,单接种较不接种处理提高幅度达 30.83%~51.69%,双接种较不接种处理提高幅度达 33.7%~55.17%。随磷水平提高,双接种处理 EE-GRSP 量保持在 1.8~1.85 mg/g 之间,单接种处理呈先升后降趋势,在 50 mg/kg 磷水平最大,达 1.79 mg/g,与 25 mg/kg 磷水平间无显著差异,但显著高于 0、100 mg/kg 磷水平。不接种处理 EE-GRSP 量

随磷水平提高无显著变化。

2.1.3 AM真菌丛枝丰度与GRSP量的关系

球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)是AM真菌产生的一种专性糖蛋白,有研究发现,土壤中80%的GRSP产生于菌丝和泡囊中,当植株死亡后,菌丝和泡囊中的GRSP经菌丝释放进入土壤。图1表明,T-GRSP和EE-GRSP量与AM真菌丛枝丰度呈显著或极显著相关关系($R^2=0.5918$ 、 0.7712),且二者均随AM真菌丛枝丰度增加呈二次式先升后降趋势,分别在AM真菌丛枝丰度19.67%和19%达最大,为6.08、2.05 mg/kg。

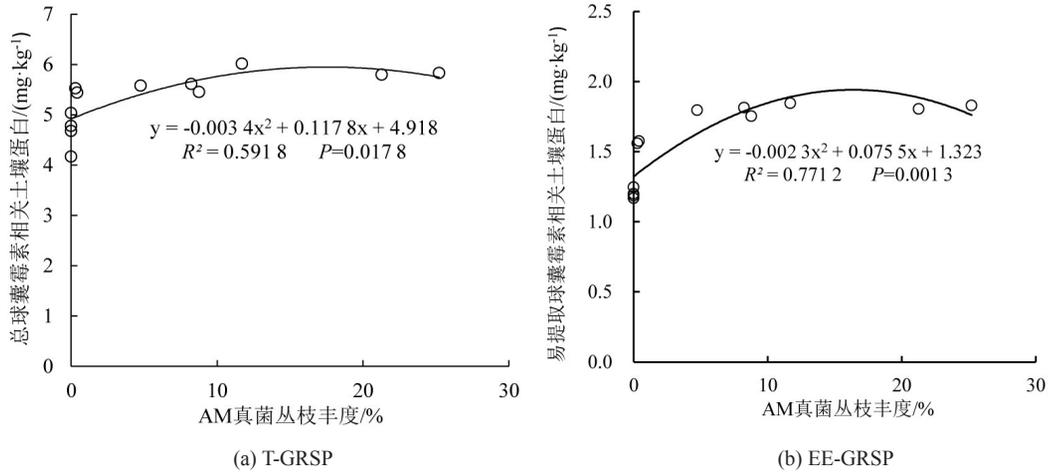


图1 玉米根系AM真菌丛枝丰度与土壤GRSP量的关系

2.2 不同处理对玉米生长及磷吸收的影响

表3方差分析表明,接种及磷水平对株高、茎粗、地上部干质量、地上部磷量及地上部吸磷量均有显著影响($P<0.05$),但二者的交互作用仅对茎粗有显著影响。

表3 玉米生长指标及吸磷量方差分析结果

因素	株高		茎粗		地上部干质量		地上部磷量		地上部吸磷量	
	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值
接种	136.68	0.00*	113.60	0.00*	69.71	0.00*	27.07	0.00*	56.19	0.00*
磷水平	14.14	0.00*	10.64	0.00*	12.29	0.00*	5.80	0.00*	10.29	0.00*
接种×磷水平	1.91	0.12 ^{NS}	3.60	0.01*	2.32	0.07 ^{NS}	1.37	0.27 ^{NS}	1.53	0.21 ^{NS}

2.2.1 玉米生长指标变化情况

表4为玉米生长指标变化情况。由表4可知,相同磷水平,双接种处理较不接种及单接种处理可以显著增加玉米株高,增加幅度分别达33.83%~46.23%和33.52%~52.94%;单接种与不接种之间差异不显著。不接种和单接种处理玉米株高随磷水平提高无显著变化,双接种处理在50、100 mg/kg磷水平时玉米株高显著增加,较0 mg/kg磷水平分别提高18.34%和22.46%,较25 mg/kg磷水平分别提高16.59%和20.64%。与玉米株高变化情况一致,相同磷水平,双接种处理较不接种及单接种处理显著增加玉米茎粗,增加幅度达48.68%~194.87%和39.51%~187.5%;单接种与不接种之间差异不显著。双接种处理玉米茎粗随磷水平提高无显著变化,不接种和单接种处理在50、100 mg/kg磷水平时较0 mg/kg磷水平显著提高玉米茎粗,与25 mg/kg磷水平之间无显著差异。同一磷水平下,单接种与不接种处理之间对玉米地上部干质量的变化无显著影响,而双接种处理较单接种及不接种显著增加地上部干质量,增加幅度达107.16%~140.85%和92.03%~173.51%。随磷水平提高,双接种处理玉米地上部干质量呈上升趋势,100 mg/kg磷水平比0、25、50 mg/kg磷水平分别提高98.64%、45%和22.88%;而不接种和单接种处理玉米地上部干质量随磷水平变化无显著差异。

2.2.2 玉米地上部磷量及吸磷量变化情况

不同处理玉米地上部磷量及吸磷量变化情况如表4所示。由表4可知,相同磷水平,接种AM真菌可以增加玉米地上部磷量,低磷水平(0、25 mg/kg)双接种处理增加效果更明显,较不接种增幅分别达86%和50.39%。高磷水平(50、100 mg/kg)单接种与不接种处理间差异不显著。相同接种处理,玉米地上部磷量均随磷水平提高呈上升趋势,但在供试磷水平下差异不显著。与地上部磷量变化趋势一致,相同接种处理玉米地上部吸磷量也随磷水平提高而增加,较不施磷分别提高65.22%~235.02%、19.73%~66.2%、39.74%~

110.03%，高磷水平双接种处理较低磷水平差异性显著。同一磷水平下，玉米地上部吸磷量表现为接种处理优于不接种处理，其中双接种较单接种及不接种处理达显著水平($P<0.05$)，而单接种与不接种间差异不显著。

表4 不同磷水平各处理对玉米生长情况及磷吸收量

磷水平/(mg·kg ⁻¹)	接种处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部干质量/g	地上部磷量/(g·kg ⁻¹)	地上部吸磷量/mg
0	CK	70.90±5.38d	0.39±0.045e	11.67±3.06d	1.00±0.19e	12.02±5.43e
	G.m	72.33±3.95d	0.40±0.047de	12.67±3.79d	1.70±0.18bc	21.01±3.95de
	G.e+G.m	97.83±3.20b	1.15±0.12a	24.33±1.53c	1.86±0.40ab	45.55±12.80bc
25	CK	74.20±4.32cd	0.56±0.09cde	15.67±4.16cd	1.27±0.07de	19.86±5.39de
	G.m	74.37±6.93cd	0.55±0.06cde	16.33±0.58cd	1.75±0.20abc	28.72±4.08cde
	G.e+G.m	99.30±8.30b	1.20±0.139a	33.33±7.64b	1.91±0.19ab	63.65±15.36b
50	CK	79.17±6.40cd	0.64±0.07bcd	16.33±2.08cd	1.45±0.21cd	23.99±6.31cde
	G.m	80.63±4.68cd	0.70±0.08bc	16.67±2.08cd	1.78±0.08abc	29.71±5.18cde
	G.e+G.m	115.77±4.62a	1.07±0.03a	39.33±9.29b	2.12±0.21a	84.69±28.29a
100	CK	84.00±5.63c	0.76±0.06bc	23.33±3.51c	1.72±0.24abc	40.27±8.67cd
	G.m	78.33±6.11cd	0.81±0.06b	17.67±3.06cd	2.01±0.13ab	35.8±8.54cd
	G.e+G.m	119.80±2.55a	1.13±0.21a	48.33±7.64a	1.98±0.22ab	95.67±17.72a

2.3 相关性分析

Pearson相关性分析(表5)表明,AM真菌丛枝丰度与株高、茎粗、地上部干质量、地上部含磷量及地上部吸磷量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.59、0.72、0.51、0.43、和0.52。T-GRSP与EE-GRSP量呈极显著正相关,相关系数为0.861,且二者与株高、茎粗、地上部干质量、地上部含磷量及地上部吸磷量均显著正相关,相关系数分别为0.55、0.58、0.48、0.76、0.58和0.59、0.61、0.49、0.70、0.58。株高、茎粗、地上部干质量、地上部含磷量及地上部吸磷量5个指标两两间均呈极显著正相关。

表5 Pearson相关性分析

参数	丛枝丰度	总球囊霉素	易提取球囊霉素	株高	茎粗	地上部干质量	地上部含磷量	地上部吸磷量
丛枝丰度	1.00							
总球囊霉素	0.62**	1.00						
易提取球囊霉素	0.70**	0.86**	1.00					
株高	0.59**	0.55**	0.59**	1.00				
茎粗	0.72**	0.58**	0.61**	0.81**	1.00			
地上部干质量	0.51**	0.48**	0.49**	0.88**	0.74**	1.00		
地上部含磷量	0.43**	0.76**	0.70**	0.51**	0.65**	0.56**	1.00	
地上部吸磷量	0.52**	0.58**	0.58**	0.86**	0.76**	0.97**	0.71**	1.00

注 $n=36$,**和*分别表示0.01和0.05水平显著相关(双尾检验)。

3 结论与讨论

本文研究结果表明,AM真菌能与玉米根系建立共生关系,且与磷水平的互作对根系AM真菌丛枝丰度具有显著影响。同一磷水平下,AM真菌丛枝丰度以双接种处理显著,说明混合接种更有利于对玉米根系的侵染,该结果与刘文科等^[18]的研究结果一致。另外,双接种处理AM真菌丛枝丰度随磷水平提高呈下降趋势,表明土壤含磷量过高会抑制菌根真菌对植物根系的侵染,影响根系丛枝丰度,这与陈梅梅等^[19]的研究结果一致。土壤GRSP量受多因素影响,主要包括AM真菌群落组成、大气CO₂摩尔浓度、土壤质地、宿主类型等^[20],本试验中,T-GRSP和EE-GRSP量均呈双接种≥单接种>不接种,表明接种AM真菌显著增加土壤中GRSP量,与Bedini等^[21]研究结果一致,说明AM真菌是导致土壤GRSP量增加的主要原因。贺学礼等^[22]发现,GRSP量与AM真菌不同定殖结构的丰富度密切相关,回归分析发现,AM真菌丛枝丰度与T-GRSP、EE-GRSP量间二次相关显著。随施磷水平提高,GRSP量先升后降,可能是由于磷水平过高或过低,抑制AM真菌生态功能的发挥,从而减少GRSP的分泌量。

磷是植物体生长代谢过程不可缺少的营养元素之一,参与组成植物体内许多重要化合物。采煤塌陷区土壤有效磷量不能满足作物生长的需要,而接种AM真菌可以通过其分泌物、菌丝体等媒介提高土壤有效磷

量,增加植物根系从土壤中获取磷素的能力,促进作物生长。宋成军等^[23]发现,接种AM真菌可以缓解小马鞍羊蹄甲对低磷环境的限制,并促进幼苗生长。任天爱等^[24]研究表明,接种AM真菌后紫花苜蓿株高、分枝数明显增加,且植株各部位磷浓度显著高于对照。本试验通过对玉米生长指标的分析发现,接种AM真菌可以增加玉米株高、茎粗、地上部干质量、地上部含磷量及磷吸收量,以双接种处理增加效果显著,这与黄华成等^[25]的研究一致。土壤磷添加水平是制约AM真菌生态功能发挥的主要因子之一。磷水平对玉米生长指标具有显著主效应,且随磷水平提高呈上升趋势,这与前人对过高的土壤磷水平会抑制植株生长的研究^[26]不一致,可能是由于采煤塌陷土壤长时间废弃,土壤肥力不足,含磷量匮乏,且与大田相比,盆栽生长空间狭小,环境单一,玉米根系只能从有限的范围内获取所需营养元素,从而在100 mg/kg土壤磷水平下也会有效促进玉米的生长。相关性分析结果显示各指标间均呈极显著正相关,表明AM真菌通过对玉米根系的侵染,在促进土壤中GRSP量增加及玉米生长中具有重要作用。

试验分析了4个不同磷水平下单接种(G.m)及双接种(G.e+G.m)AM真菌对土壤GRSP量、玉米生长及磷吸收的影响,对改善采煤塌陷区土壤肥力水平,促进玉米生长及磷吸收具有重要的理论意义,但将AM真菌修复技术应用在矿区原位土壤环境中还比较困难。同时AM真菌与磷水平互作对矿区土壤有效磷及玉米生长的作用机理还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄岑丽. 潞安矿区煤炭开采对地质环境影响的研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2013.
- [2] 旭日干. 煤矿区AM真菌多样性与土壤微生物数量特征的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2011.
- [3] 李娜, 乔志伟, 洪坚平, 等. 磷细菌在复垦土壤上生长规律及对磷解析特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 964-972.
- [4] 李建华, 郜春花, 卢朝东, 等. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤白三叶草生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 280-284.
- [5] SRIVASTAVA N K, RAM L C, MASTO R E. Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: A sustainable ecological approach[J]. Ecological Engineering, 2014, 71(71): 479-489.
- [6] 岳英男, 杨春雪. 松嫩盐碱草地土壤理化特性与丛枝菌根真菌侵染的相关性[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1 437-1 444.
- [7] 王淼焱, 徐倩, 刘润进. 长期定位施肥土壤中AM真菌对寄主植物的侵染状况[J]. 菌物学报, 2006, 25(1): 131-137.
- [8] 郭忠勇, 田长彦, 胡明芳, 等. 不同形态磷肥对棉花生长和AM真菌接种效应的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 196-200.
- [9] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 等. 干旱胁迫下AM真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4 181-4 188.
- [10] LI A R, GUAN K Y, REBECCA S D, et al. Direct and indirect influences of arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus uptake by two root hemiparasitic *Pedicularis* species: do the fungal partners matter at low colonization levels? [J]. Annals of Botany, 2013, 112(6): 1 089-1 098.
- [11] 曹翠玲, 杨建红, 范淑君, 等. 不同磷水平下摩西球囊霉对小麦幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 82-86.
- [12] 王建, 周紫燕, 凌婉婷, 等. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- [13] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 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.
- [14] HAO X J, HONG J P, ZHANG T Q, et al. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculation and Phosphorus(P) Addition on Maize P Utilization and Growth in Reclaimed Soil of a Mining Area[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(18): 2 413-2 428.
- [15] 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(55): 158-161.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1981: 30-109.
- [17] JANOS D P, GARAMSZEGI S, BELTRAN B. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728-739.
- [18] 刘文科, 冯固, 李晓林. AM真菌接种对甘薯产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 106-108.
- [19] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 等. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1 980-1 986.
- [20] 谢小林, 顾振红, 朱红惠, 等. 球囊霉素相关土壤蛋白与根系形态的相关性研究[J]. 菌物学报, 2013, 32(6): 993-1 003.
- [21] BEDINI S, PELLEGRINO E, AVIO L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1 491-1 496.
- [22] 贺学礼, 陈程, 何博. 北方两省农牧交错带沙棘根围AM真菌与球囊霉素空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1 653-1 661.
- [23] 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等. AM真菌和磷对小马鞍羊蹄甲幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6 121-6 128.
- [24] 任天爱, 鲁为华, 杨洁晶, 等. 不同磷水平下AM真菌对紫花苜蓿生长和磷利用的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(6): 72-78.
- [25] 黄华成, 唐光大, 罗晓莹, 等. 3种球囊霉属真菌对盆栽木薯生长影响[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(4): 43-47.
- [26] 臧成凤, 樊卫国, 潘学军, 等. 供磷水平对铁核桃实生苗生长、形态特征及叶片营养元素含量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 319-330.

The Impact of AM Fungi and Phosphorus on Glomalin-related Soil Protein and Growth of Maize in a Coal-mining Induced Subsided Area

HAN Yang, HAO Xianjun, ZHANG Youdan

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Coal mining could result in land subsidence, leading to a deterioration in soil structures and decrease in soil fertility, hindering nutrient uptake and crop growth. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) has special physiological functions in rehabilitating degraded agroforestry ecosystems and increasing crop growth, especially phosphorus (P) uptake. This paper presents the results of a greenhouse experiment in attempts to study the changes in glomalin-related soil protein (GRSP), maize growth and P uptake in a coal-mining induced subsided area under four P application rates (0, 25, 50 and 100 mg/kg) with the soil inoculated either by *Glomus mosseae* (single inoculation) or by *Glomus etunicatum* and *Glomus mosseae* (double inoculation). The results showed AMF inoculation, P addition and the interaction between AMF and P had a significant impact on AMF abundance, plant height and stem diameter, as well as the easy-to-extract glomalin-related soil protein (EE-GRSP) content ($P < 0.05$). The AMF abundance was between 0.29% and 25.22%, with the abundance under double inoculation significantly higher than that under single inoculation ($P < 0.05$) at the same P level. The relationship between AM abundance and GRSP content was found to be quadratic, and at the same P level the total glomalin-related soil protein (T-GRSP) and EE-GRSP were in the order of double inoculated \geq single inoculated $>$ non-inoculated. With the increase in P, the GRSP content increased first and then decreased with the AMF inoculation. Compared with non-inoculation, plant height, stem diameter, dry-weight of the shoot, as well as the P uptake remained almost unchanged under the single inoculation, while increased significantly under the double inoculation at the same P level. Also, under the four treatments with double inoculation, the plant height and P uptake at P additions of 50 and 100 mg/kg were significantly higher than that at the additions of 0 and 25 mg/kg. The AM abundance correlated positively with GRSP content, plant height, stem diameter and shoot P content.

Key words: phosphorus level; arbuscular mycorrhizal fungi; coal mining subsidence area; glomalin-related soil protein; maize growth

责任编辑:白芳芳