

接种丛枝菌根真菌对土壤水稳性团聚体特征的影响

彭思利, 申 鸿, 郭 涛*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 为了研究接种丛枝菌根真菌对土壤团聚体特征的影响, 采用盆栽试验, 以小麦 (*Triticum aestivum* L.) 为宿主植物, 在两个不同供磷水平条件下, 分别接种丛枝菌根真菌 *Glomus intraradices* 和 *Glomus mosseae*, 收获后分析土壤团聚体数量、分布和分形维数, 并运用通径分析对不同作用因子进行统计。结果看出, 与对照相比, 接种丛枝菌根真菌显著提高了土壤中有机质含量、球囊霉素相关土壤蛋白含量, 土壤水稳性大团聚体数量也显著增加。接种处理提高了土壤的平均重量直径、几何平均直径, 而且降低了土壤分形维数。通径分析表明, 在影响土壤水稳性大团聚体的众多因子中, 菌丝密度具有最大的作用, 且以直接作用为主; 有机质和球囊霉素相关土壤蛋白也表现出较大的作用。接种 *G. mosseae* 对改良土壤结构的作用优于接种 *G. intraradices*。

关键词: 菌丝; 球囊霉素相关土壤蛋白; 分形; 土壤团聚体; 通径分析

中图分类号: Q949.32; S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)03-0695-06

Influence of mycorrhizal inoculation on water stable aggregates traits

PENG Si-li, SHEN Hong, GUO Tao*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Aimed to investigate the influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on trait of aggregate, a pot experiment was carried with *Triticum aestivum* L. (wheat) as host plants and two different arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus intraradices* and *G. mosseae* were inoculated under two phosphorus supplied level. After harvest, soil were screened through sieves with different sizes and then the amounts of different size of aggregates were measured to obtain geometric mean diameter, mean weight diameter and fractal features of soils, path analysis was also used to checkup the indirect or direct factors. The results showed that mycorrhizal inoculation increased soil organ matter concentration, glomalin related soil protein (GRSP) concentration and the amount of water stable aggregate (WSA) significantly compared with the non-mycorrhizal treatments. Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of mycorrhizal soil were significantly higher than that of non-mycorrhizal soil while mycorrhizal inoculation decreased the value of fractal dimension (D) of mycorrhizal soil compared with the non-mycorrhizal soil. Our results indicated the important role of arbuscular mycorrhizal inoculation in improving quality of soil structure. The Path analysis results showed hyphae density had the highest index on WSA amount through direct effect mainly. The GRSP and organic matter had higher effects on WSA amount as well. For improving soil structure, the role of *G. mosseae* was better than that of *G. intraradices*.

Key words: hyphae; glomalin related soil protein; fractal features; soil aggregate; path analysis

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物等土壤成分参与, 在干湿冻融交替等自然物理过程作用下形成的不同尺度大小的多孔单元。良好的土壤团聚体结

构是土壤肥力的物质基础, 能够保证和协调土壤中的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤疏松熟化层。土壤团聚体的形成及稳定机制受

收稿日期: 2009-08-07 接受日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701085)资助。

作者简介: 彭思利(1986—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤微生物研究。

* 通讯作者 Tel: 023-68251249, E-mail: guotaosd@swu.edu.cn

到生物、物理、化学的作用及它们之间协同作用的影响,微生物既是土壤的重要组成部分,又是形成土壤团聚体最活跃的生物因素。在许多陆地生态系统中,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungus)作为一类重要的优势类群微生物能与陆地上 90% 以上的植物建立共生关系^[1]。由于丛枝菌根真菌与植物共生可以改善植物的磷营养,增强植物抵御干旱和盐渍的危害,提高植物在逆境中的生存能力,在生态系统中扮演着重要的角色,因而一直是研究的热点之一。丛枝菌根真菌侵染植物以后,一方面根外菌丝可以在土壤中形成庞大的菌丝网络^[2],通过网织、缠绕等物理作用形成大团聚体;另一方面 AMF 的菌丝还能分泌一类糖蛋白,球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin related soil protein, GRSP)^[3],具有土壤结构工程师的作用^[4]。丛枝菌根真菌的这些特点在土壤团聚体形成和稳定过程中的作用越来越受到重视^[5-6]。

目前,国内关于丛枝菌根真菌(AMF)侵染影响土壤团聚体的研究还比较少,特别是有关球囊霉素相关土壤蛋白的研究及对土壤水稳性团聚体的研究还处于起步阶段。为此,采用盆栽试验,利用小麦作为宿主植物,研究了丛枝菌根真菌对土壤结构特征的影响,并利用通径分析比较接种 AMF 后能引起土壤水稳性团聚体变化的不同因子的作用,有助于揭示接种 AMF 影响土壤结构的作用机制,为进一步阐述其在农业生产以及在生态系统中的作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验在西南大学资源环境学院植物营养光照培养室中进行。所用土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色土,其基本理化性状为: pH 7.1、有机质 10.79 g/kg、全氮 0.78 g/kg、全磷 0.82 g/kg、全钾 20.54 g/kg、碱解氮 28.34 mg/kg、有效磷 10.91 mg/kg、速效钾 53.2 mg/kg。供试 AM 菌种: *Glomus mosseae* (*G. mosseae* BEG167)、*Glomus intraradices* (*G. intraradices* BEG141),均来自中国农业大学资源与环境学院。菌种预先经三叶草、玉米盆栽繁殖,制成含有菌根真菌孢子、根外菌丝、感染的根段及根际土壤的接种剂。宿主植物小麦 *Triticum aestivum* L., 品种为绵阳 14 号。

试验设磷水平和接种两因素。施磷处理在氮、钾作为底肥的基础上,分别设: 不施磷处理(P0)和

加施 50 mg/kg 磷处理(KH_2PO_4 , P50), 每种磷处理条件下分别设 2 个接种不同菌根真菌的处理及 1 个不接种的对照,重复 5 次,共计 $2 \times 3 \times 5 = 30$ 盆。

土壤经 γ 射线灭菌处理,以避免蒸汽灭菌对土壤结构的破坏。试验用塑料盆容积约 2.5 L,每盆装土 3 kg。将接种剂与供试土壤按 10% 的比例混匀装入,对照处理则加入等量灭菌的菌种土和菌种滤液,以保持处理间除真菌外的其它微生物区系一致。播前施 N (NH_4NO_3) 100 mg/kg 和 K (K_2SO_4) 150 mg/kg 作基肥。小麦种子在 10% 的双氧水中浸泡 10 min 进行表面消毒,而后置于湿润的滤纸上用饱和磷酸钙溶液浸种催芽后播种,每盆 5 粒,并在土壤表面覆盖一层约 0.5 cm 细沙以减少水分的蒸发。出苗后,定苗为 2 株。采用定量浇水方式,土壤湿度约为田间持水量的 70%—80%。生长期间温度控制在 20—30℃ 之间,光照时间为每天 12 h,每天早晨 8:00—20:00 用生物镓灯补充光照。

植株生长 60 d 后收获,收获时将地下部和地上部分分开,用水将根洗净,剪成约 1 cm 长的根段,取 0.5 g 鲜根测菌根侵染率,剩余根系经烘干用于测定生物量。植株在 60—70℃ 下烘 72 h,称干重并测定植株中的磷(钒钼黄比色),菌根侵染率采用方格交叉法测定^[7]; 菌丝密度按照 Abbott 等人^[8]的方法进行。土壤水稳性团聚体含量用人工筛分法测量^[9]; GRSP 的测定用柠檬酸钠浸提,考马斯亮蓝比色法进行^[3]。

1.2 数据处理

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)都是基于不同粒径的团聚体的重量得到的,计算公式如下^[10]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

$$GMD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \right]$$

式中: x_i 是筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均重量直径; w_i 是任一粒径范围团聚体的重量占土壤样品干重的分数。求和是所有粒径范围的团聚体数量。

分形维数 D (fractal dimension, D) 的计算采用杨培岭等^[11]推导的公式计算:

$$\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D}$$

对上式两边取对数,即得:

$$\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right] = (3 - D)\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)$$

分别以 $\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right]$ 、 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)$ 为纵、横坐标作图, $3 - D$ 即为 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)$ 和 $\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right]$ 实验直线的斜率, 然后即可方便地求出土壤粒径分形维数 D 。

其中, $\bar{d}_i$ 为某级团聚体平均直径, $W(\delta < \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 $\bar{d}_i$ 的团聚体的重量, W_0 为团聚体总重量, $\bar{d}_{\max}$ 为团聚体的最大粒径。

采用 Excel 和 SAS (Version 8.02; SAS Institute, Cary, NC) 对数据进行二因素方差分析和通径分析。

2 结果与分析

2.1 接种不同菌根真菌对小麦生长状况的影响

表 1 表明, 不接种处理小麦根系没有菌根真菌的侵染, 接种处理均有菌根真菌侵染, 侵染率在 18%~44%。提高供磷水平时, 接种两种菌根真菌

的根系侵染率都显著降低。与不接种的对照相比, 接种菌根真菌 *G. mosseae* 显著降低小麦植株地上部干重, 在两供磷水平 (P0 和 P50) 条件下植株地上部干重分别减少了 17% 和 12%, 这是丛枝菌根真菌构建自身的结构消耗了宿主植物小麦部分的光合产物。

P0 处理时, 接种两种丛枝菌根真菌都显著的提高了小麦地上部含磷量和吸磷总量。说明接种菌根真菌可显著促进小麦对土壤磷的吸收, 从而改善植株体内磷营养状况, 但未表现出促生效应; 而提高供磷水平 (P50) 后, 接种菌根真菌反而降低了宿主植物地上部的磷含量和吸磷量。由于土壤中有效磷含量的升高就能满足小麦生长对磷需求, 同时植物吸收同化的一些有机化合物也需从地上部运向地下部用于构建菌根结构, 其中必然含有一些有机磷化合物, 以净输出的方式进入到菌根结构中, 从而造成宿主植株磷含量的下降。

表 1 不同磷水平下接种丛枝菌根真菌对小麦生物量及磷含量和吸磷量的影响

Table 1 Mean biomass, P content and uptake of non-mycorrhizal and mycorrhizal wheat under different P supply levels

处理 Treatment		侵染率 Infection rate (%)	干物重 Biomass (g/pot, DW)		磷含量 P content (%)		吸磷量 P uptake (mg/pot)	
			地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root
P0	– M	0 b	5.32 a	0.47 a	0.25 b	0.20 b	13.19 b	0.95 b
	<i>G. i</i>	44.0 a	5.20 a	0.39 a	0.36 a	0.24 b	18.81 a	0.90 b
	<i>G. m</i>	37.0 a	4.54 b	0.46 a	0.38 a	0.35 a	17.38 a	1.60 a
	平均 Avg.	27.0 A	5.02 B	0.44 A	0.33 B	0.26 B	16.46 B	1.15 B
P50	– M	0 c	5.65 a	0.55 a	0.60 a	0.30 b	33.39 a	1.65 a
	<i>G. i</i>	18.0 b	5.44 ab	0.39 a	0.44 b	0.38 ab	23.98 b	1.47 a
	<i>G. m</i>	29.0 a	5.03 b	0.43 a	0.47 b	0.46 a	23.64 b	1.99 a
	平均 Avg	15.7 B	5.37 A	0.45 A	0.50 A	0.38 A	27.0 A	1.70 A

注 (Note): 同一供磷水平的数值后的不同小写字母表示接菌处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示供磷水平平均数间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column within each P level are significant at 5% level and by different capital letters are significant between P0 and P50 at 5% level. - M—未接种 No inoculation.

2.2 接种对土壤水稳性团聚体结构特征的影响

表 2 显示, 土壤有机质未受到磷处理的显著作用, 而受到接种处理的显著影响; 特别是在不供磷处理时, 接种 *G. intraradices*、*G. mosseae* 的土壤有机质分别比不接种对照提高 13% 和 29%。

土壤中 GRSP 总体上随着供磷水平的增加而显著降低。无论 P0 还是 P50 处理, 接种丛枝菌根真菌都显著增加了土壤中的球囊霉素含量, 增加幅度在 30% 左右。

根外菌丝的缠绕、网织作用是促进土壤团聚结构形成的主要因素^[1]。不同磷供给水平处理显著的影响了根外菌丝的生长, 供磷水平由 0 提高到 50 mg/kg 时, *G. intraradices*、*G. mosseae* 的菌丝密度分别减少了 13% 和 12%。另外, 不同菌根真菌的菌丝密度也表现出明显差异, *G. intraradices* 的菌丝量明显低于 *G. mosseae* 的菌丝量。

供磷水平处理对各级不同粒径的土壤水稳性作用。接种菌根真菌后, 不同粒径团聚体结构差异不显著, 而受到接种处理的土壤水稳性团聚体数量有

显著增加的趋势,特别是接种 *G. mosseae* 处理,在不同供磷水平条件下,不同粒径的土壤水稳性团聚体数量都显著增加,接种 *G. intraradices* 也显著增加了粒径大于 1~0.5 mm 土壤水稳性团聚体数量。

不同供磷水平处理对土壤的 MWD、GMD 和分形维数均无显著作用(表 3)。土壤中不加磷时,接种 *G. mosseae* 和 *G. intraradices* 的土壤的 MWD 和

GMD 均显著高于相应的不接种丛枝菌根真菌的土壤。供磷 50 mg/kg 时,表现出了相同的变化规律。而接种 *G. mosseae* 处理的土壤的 MWD 和 GMD 都显著高于其它接种处理的土壤。与不接种菌根真菌的土壤相比,接种 *G. mosseae* 显著降低了土壤分形维数。

表 2 接种丛枝菌根真菌对土壤不同粒径水稳性团聚体的影响

Table 2 Mean organic matter content, GRSP concentration, hyphal density and soil water stable aggregate of non-mycorrhizal and mycorrhizal soil under different P supplied levels

处理 Treatment	有机质 OM (g/kg)	GRSP (g/kg)	菌丝密度 Hyphal density (m/g)	土壤水稳性团聚体(%) Soil water stable aggregate				
				> 3 mm	3 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm
P0 - M	10.07 b	2.44 b	0 c	1.51 b	3.5 c	1.85 b	4.38 b	8.03 b
<i>G. i</i>	11.34 a	3.21 a	3.65 b	2.28 a	5.86 b	2.97 a	5.10 b	8.95 ab
<i>G. m</i>	13.04 a	3.21 a	9.25 a	2.70 a	7.22 a	3.33 a	7.42 a	10.81 a
平均 Avg.	11.46 A	2.95 A	4.30 A	2.16 A	5.53 A	2.69 A	5.63 A	9.60 A
P50 - M	10.52 b	2.22 b	0 c	1.57 c	4.06 c	2.04 b	4.56 b	8.75 b
<i>G. i</i>	11.98 ab	2.95 a	3.22 b	2.44 b	5.04 b	2.78 a	4.91 b	8.94 b
<i>G. m</i>	13.24 a	2.88 a	8.20 a	3.28 a	6.17 a	2.80 a	7.03 a	10.64 a
平均 Avg.	11.89 A	2.68 B	3.81 B	2.43 A	5.09 A	2.54 A	5.5 A	9.44 A

注(Note): 同一供磷水平上的不同小写字母表示接菌处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示供磷水平平均数间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column within each P level are significant at 5% level and by different capital letters are significant between P0 and P50 at 5% level. GRSP—球囊霉素相关土壤蛋白 Glomalin related soil protein.

表 3 接种丛枝菌根真菌对土壤结构特征的影响

Table 3 Effect of AMF inoculation on traits of soil structure

处理 Treatment	平均重量直径 MWD	几何平均直径 GMD	分形维数 D
P0 - M	0.33 c	0.18 c	2.94 a
<i>G. i</i>	0.45 b	0.21 b	2.92 a
<i>G. m</i>	0.52 a	0.24 a	2.82 b
平均 Avg.	0.43 A	0.21 A	2.87 A
P50 - M	0.36 c	0.19 c	2.93 a
<i>G. i</i>	0.43 b	0.20 b	2.92 a
<i>G. m</i>	0.51 a	0.23 a	2.90 b
平均 Avg.	0.43 A	0.21 A	2.92 A

注(Note): 同一供磷水平上的不同小写字母表示接菌处理间差异达 5% 显著水平; 不同大写字母表示供磷水平平均数间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column within each P levels are significant at 5% level and by different capital letters are significant between P0 and P50 at 5% level. MWD—Mean weight diameter; GMD—Geometric mean diameter.

对可能影响土壤团聚体平均重量直径的 5 个因素进行了通径分析, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 分别表示地上部干重、根系干重、有机质、GRSP 和菌丝密度。结果(表 4)表明, 植株的生物量包括地上部的干重和根系干重对土壤水稳性团聚体总量的直接通径系数较小, 分别为 0.09 和 0.12, 但总的通径系数都为负值, 说明二者对土壤水稳性团聚体的作用较小。

菌丝密度对土壤水稳性大团聚体总量的总的通径系数最高(0.93), 而且此因子对大团聚体的直接作用系数也最高(0.96), 说明菌丝密度在这些影响土壤水稳性大团聚体的影响因素中具有最重要的作用, 而且这种影响是直接作用。土壤有机质和 GRSP 对土壤水稳性大团聚体总的通径系数虽然较高(0.76、0.57), 但二者直接通径系数较低(0.03、0.05), 主要通过对菌丝密度影响, 进而作用于土壤结构, 说明在本试验条件下, 有机质和 GRSP 主要通过间接作用影响土壤水稳性大团聚体。

表 4 影响土壤水稳性团聚体总量因素的通径分析

Table 4 Path analysis of the factors on water-stable aggregates

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	地上部干重 Shoot dry weight (X_1)	根系干重 Root dry weight (X_2)	土壤有机质含量 Organic matter concentration (X_3)	GRSP 含量 GRSP concentration (X_4)	菌丝密度 Hyphal density (X_5)	总和 Sum
大团聚体	X_1	0.09*	0.06	-0.03	-0.01	-0.62	-0.51
总量	X_2	0.04	0.12*	-0.02	-0.01	-0.22	-0.08
Water stable	X_3	-0.05	-0.04	0.05*	0.02	0.78	0.76
aggregate	X_4	-0.05	-0.07	0.03	0.03*	0.63	0.57
amount	X_5	-0.06	-0.03	0.04	0.02	0.96*	0.93

* 为直接通径系数 Direct path coefficients

3 讨论

平均重量直径 (MWD) 是各级团聚体的综合指标,其值随着大粒级团聚体含量的增加而增大;其值越大,说明团聚体稳定性较好。几何平均直径 (GMD) 是对团聚体在主要粒级分布的描述,其值越大,团聚体含量在大粒级上的分布越多,孔隙度则越好^[12]。在本试验条件下,与接种处理的土壤相比,接种丛枝菌根真菌显著增加了土壤的 MWD 和 GMD,说明接种处理显著的增加了土壤水稳性大团聚体数量,土壤结构特征进一步提升。而土壤团粒结构粒径分布的分形维数 (D) 反映了土壤水稳性团聚体及土壤水稳性大团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,接种处理也相应的减小了土壤分形维数,而即团粒结构粒径分布的分形维数愈小,则土壤的结构与稳定性愈好^[13]。本研究在其它试验条件一致的情况下,丛枝菌根真菌侵染宿主植物,建立共生体系后产生的一系列影响是引起上述土壤结构特点变化的原因。

菌根共生体建立以后,形成大量的菌根菌丝(表 2),由于丛枝菌根真菌不能合成碳水化合物,不断地吸引着植物的光合产物流入土壤^[14]。试验结果表明,接种 AMF 显著增加了土壤中的有机质含量(表 2)。Zhu 和 Miller^[15]估算出外延菌丝对土壤中有机碳输入的贡献达 54—900 kg/hm²。据估计全球每年有 50 亿吨的碳被菌根真菌所消耗^[16],大大增加了土壤中有有机物质的输入。而丛枝菌根真菌影响土壤结构的机制是建立在进入土壤中的碳通量及有机质等和碳有关的代谢基础上的。土壤有机质含量对土壤水稳性大团聚体总量的作用的通径系数较高就是这个原因(表 4)。而在土壤中增加的有机质中,GRSP 是一类重要的物质,据统计,GRSP 约占土

壤有机碳的 5%^[17]。

通径分析(path analysis)就是把自变量与因变量之间的相关分解为该自变量对依变量的直接影响和通过其它相关的自变量对依变量的间接影响的分析过程,自变量对因变量的直接影响程度用通径系数来度量。Jastrow 等^[18]首次利用通径分析分析了根系、菌丝、微生物量碳、土壤有机碳等诸多因子在影响团聚体稳定性中的作用,并说明了在丛枝菌根对土壤团聚体形成分析中的可行性。通径分析结果表明,菌丝密度对土壤中的土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)的稳定有积极作用,这种作用不仅表现在对土壤水稳性大团聚体的总的影响系数最高,而且直接作用系数也最高(0.96),说明菌丝对土壤团聚体平均特征有强烈的直接效应。Rilig 等^[1]发现,菌根菌丝直接参与土壤团聚体的形成和稳定过程是丛枝菌根真菌影响土壤结构的一个重要方面。Jastrow 等^[18]认为,在影响团聚体稳定性的诸多因子中,菌丝具有最重要的直接作用。菌丝将土壤彼此机械的缠绕在一起而形成团聚体^[1],随着菌丝长度的增加,土壤团聚程度也相应增强,这也是接种 *G. mosseae* 的土壤 >0.25 mm 的土壤水稳性团聚体结构数量高于接种 *G. intraradices* 的菌根室一个重要原因。冯固等^[5]的研究也同样发现外延菌丝对土壤中 5—2 mm 土壤水稳性大团聚体的形成起着决定性的作用。另外,由于不同真菌的菌丝直径、壁厚、分支模式和分隔都有所差异,即使同一菌种,不同的生态型的菌种外延菌丝的形态差异也很大^[19]。

GRSP 较其他土壤热水提取碳水化合物黏附土壤颗粒的能力强 3—10 倍^[3]。这种很强的粘性能够把小的土壤颗粒粘成直径 <0.25 mm 的微团聚体(microaggregate),最后形成大聚合体进而形成一个较小的含有泥土、淤泥、沙石及矿物质和有机质等成分

的土壤单位。因此,GRSP 增进土壤团聚体的形成和稳定而见诸于相关报道^[4]。本研究看出,接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae* 均能显著增加土壤中 GRSP 含量;通径分析结果显示 GRSP 对土壤水稳性大团聚体有较高的作用系数 0.57,说明 GRSP 对土壤结构特征的直接促进作用。同时,结果还表明,菌根 GRSP 的分泌还受到宿主植株磷营养水平的显著影响,与不施磷相比,供磷 50 mg/kg 能显著降低土壤中 GRSP 含量,这与 Treseder & Katie^[17]的结果一致。原因在于提高供磷水平后,宿主植株磷营养水平提高,植物与丛枝菌根真菌的物质交换变弱,此时,AMF 从宿主植物获得的碳水化合物减少,菌丝量减少(表 2),因而分泌的 GRSP 也必会降低。

在本研究中,接种丛枝菌根真菌能够提高土壤的平均重量直径和几何平均直径,同时降低土壤的分形维数,增加土壤水稳性团聚体含量。反映了丛枝菌根真菌能够改良土壤结构的作用,主要是通过丛枝菌根真菌菌丝的网织作用,且通过直接作用影响土壤水稳性团聚体。同时,试验所用的两种菌种对土壤结构特征的作用表现出差异性,菌种 *G. mosseae* 改良土壤结构的作用优于 *G. intraradices*。因此,在将从枝菌根真菌用于土壤质量的改善、生态环境的修复时,有必要筛选较有效的菌种,以期获得更高的效益。

参考文献:

- [1] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 1997. 1-20.
- [2] 宋勇春,李晓林,冯固,等. 菌根际及菌丝酸性磷酸酶活性的简易测定[J]. 科学通报,2000,50 (1): 187-191.
Song Y C, Li X L, Feng G *et al.* A simple demonstration of acid phosphatase activity in the mycorrhizal-sphere and hyphal-sphere [J]. Chin. Sci. Bull., 2000.
- [3] 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 Soil, 1998, 198: 97-107.
- [4] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem process [J]. Ecol. Lett., 2004, 7: 740-754.
- [5] 冯固,张玉凤,李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(4): 99-102.
Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil [J]. J. Soil Water Conserv., 2001, 15(4): 99-102.
- [6] Bronick C J, Lai R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005, 124: 3-22.
- [7] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in root [J]. New Phytol., 1980, 84: 489-500.
- [8] Abbott L K, Robson A D, DeBoer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum* [J]. New Phytol., 1984, 97: 437-446.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 514.
Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences. Analysis of soil physics and chemistry character [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978. 514.
- [10] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics [M]. Beijing: High Education Press, 2006.
- [11] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20): 1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Use the weight-size distribution to characterize the soil fractal features [J]. Chin. Sci. Bull., 1993, 38(20): 1896-1899.
- [12] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution [A]. Jacob H D and Clarke T (ed.). Methods of soil analysis, part 4-Physical methods[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Sci. Soc. Am., Inc. 2002. 317-328.
- [13] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报,1999,36(2): 162-167.
Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. Acta Pedol. Sin., 1999, 36(2): 162-167.
- [14] Jakobsen I, Rosendahl L. Carbon flow into soil and external hyphal from roots of mycorrhizal cucumber plants [J]. New Phytol., 1990, 115: 77-83.
- [15] Zhu Y G, Miller R M. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems [J]. Trends Plant Sci., 2003, 8: 407-409.
- [16] Bagol B, Pfeffer P E, Yair S H. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas [J]. Plant Physiol., 2000, 124: 949-957.
- [17] Treseder K K, Turner K M. Glomalin in ecosystems [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2007, 71: 1257-1266.
- [18] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregates stabilization in restored prairie [J]. Soil Biol. Biochem., 1998, 30: 905-916.
- [19] Hart M M, Reader R J. The role of the external mycelium in early colonization for three arbuscular mycorrhizal fungal species with different colonization strategies [J]. Pedobiology, 2005, 49: 269-279.