

丛枝菌根真菌对3种水土保持草本植物生长和土壤团聚体的影响

葛佩琳¹,孔召玉²,夏金文³,刘洪光^{1,4*}

(1. 江西省水利科学院,江西 南昌 330029;2. 南昌大学生命科学学院,江西 南昌 330000;
3. 南昌工程学院水利与生态工程学院,江西 南昌 330099;4. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】筛选出红壤区最优水土保持草本植物与丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)组合,提升红壤侵蚀区坡面水土流失治理水平。【方法】选择优良水土保持植物白三叶(*Trifolium repens*)、百喜草(*Paspalum notatum*)和雀稗(*Paspalum thunbergii*)在温室进行盆栽试验,设接种摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)、根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)及不接种(对照)3种处理,测定3种植物的AMF侵染率、地上、地下生长指标及土壤团聚体情况。【结果】接种AMF可显著促进3种植物的地上部生长,对百喜草和白三叶的促生效果显著($P < 0.05$);接种AMF可显著增加白三叶根长、根体积、根系分叉和根冠比数等,促进其根系生长发育;白三叶对AMF根冠比的生长响应及菌根依赖度优于另外2种植物;接种AMF显著提高了白三叶土壤水稳性团聚体含量。【结论】白三叶具有较高菌根侵染率,能与AMF共生,获得更加发达的根系和良好的长势,有效促进植被-土壤相互作用,增强调控坡面侵蚀的能力。

关键词:AMF;植物根系;土壤团聚体;水土保持

中图分类号:S688.4;Q939.96 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)01-0058-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.01.007



南方红壤区涉及南方15个省区,总面积约218万 km^2 ,占全国土地总面积的22.7%^[1],是我国水土流失范围最广、严重程度仅次于黄土高原的地区^[2]。由于红壤酸、瘦、粘等弱点,加上红壤分布区域降水时空分

布不均匀和季节干旱等逆境条件时有发生,对红壤区的不合理开发利用,导致红壤地区植被资源遭受严重破坏,生态环境持续恶化^[3]。草本植物具有覆盖地表快、适应性强的特点,在红壤侵蚀严重地区种植优良的水土保持草本植物,可以快速覆盖地表,恢复侵蚀区植被,固定土壤,减少降水对土壤的侵蚀,有效控制水土流失^[4]。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一类在陆地生态系统中普遍存在的土壤微生物,能与80%以上的陆地植物形成互利共生体^[5-6]。AMF与植物根系建立共生关系后,能够以不同方式和途径影响宿主植物的生理代谢过程,对植物的生长发育和养分吸收产生重要作用。植物为AMF提供碳水化合物,AMF通过其庞大的菌丝网络为植物吸收根区外的水分和矿质营养,增强植物抗逆能力^[7]。AMF侵染植物根系后可形成发达的根外菌丝网络,

收稿日期:2023-01-07;**修回日期:**2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金(41807078、41967012);江西省自然科学基金(20192BAB214007);江西省“科技+水利”联合计划项目(2022KSG01008);江西省博士后择优资助项目(2020KY47);江西水利科技项目(202223TGKT03、202223TGKT04、202224ZDKT17)

作者简介:葛佩琳(1988-),女,河南上蔡县人,硕士,高级工程师,主要从事水土保持植物方面的研究。

E-mail:466404329@qq.com

*通信作者。

E-mail:hongguangliu0791@hotmail.com

促进团聚体形成。同时,菌丝网和菌根真菌分泌的球囊霉素相关土壤蛋白也能够促进土壤团聚体的形成,改善土壤的物理结构^[8]。AMF具有促进植物生长和养分吸收、改善土壤结构的作用,通过接种AMF促进水土保持草本植物生长及改良土壤,对推进水土保持生物措施的发展具有重要的理论价值和应用前景。

白三叶(*Trifolium repens*)、百喜草(*Paspalum notatum*)和雀稗(*Paspalum thunbergii*)是南方红壤区典型的水土保持草本植物,适应性强,分布范围广,具有良好的水土保持效应^[4]。且白三叶生长快、固氮能力强,被广泛用于边坡生态修复及矿区土壤改良,已有研究表明接种AMF会通过增强宿主植物养分吸收能力、积累更多的代谢产物或生长调节物质促进白三叶生长^[9-11]。百喜草和宽叶雀稗是禾本科植物,抗逆性强,针对百喜草和宽叶雀稗的研究主要集中在抗非生物胁迫、种子萌发、栽培及养分吸收等方面^[12-13],有关接种AMF对它们生长和养分吸收的研究则较少。目前,针对接种AMF对植物生长、养分吸收及土壤结构的影响研究较多,但不同的菌种、植物及土壤对AMF的接种效果不一。针对南方红壤区典型水土保持草本植物,AMF接种效果还未被充分研究,与AMF的互动尚未被充分应用于水土保持实践。因此,本研究选取典型的水土保持草本植物白三叶、百喜草和雀稗接种AMF(*Funneliformis mosseae*、*Rhizophagus intraradices*),南方侵蚀劣地红壤室内盆栽条件培养,研究AMF对植物生长、根系结构的影响,同时分析AMF与土壤团聚体组成及稳定性的关系,以筛选出最优草种-AMF组合,为应用植物-AMF技术提升南方红壤区侵蚀劣地植被恢复、稳定土壤结构提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验为盆栽温室试验,采用析因设计,包含植物和AMF 2个因素,其中植物含3个水平,分别为白三叶、百喜草和雀稗;AMF含3个水平,分别为FM(*F. mosseae*)、RI(*R. intraradices*)、不接种对照。每个处理设置5个重复,共 $3 \times 3 \times 5 = 45$ 盆,试验所用菌种从北京农林科学院丛枝菌根真菌种质资源库获得。试验所用土壤采自江西省乐安河流域废弃农田

(28°92'N, 117°48'E),土壤pH值4.65,土壤有机碳8.21 g/kg、全氮1.15 g/kg、全磷0.57 g/kg,装盆前未对土壤进行灭菌处理。每盆装土850 g,分别接种对应菌剂10 g,对照接种10 g灭活菌剂和10 mL菌剂过滤液(10 μm)。

于2020年9月13日播种,将菌剂均匀铺在土壤表层,覆盖1 cm厚土壤,种子消毒(75%酒精2 min,蒸馏水冲洗)后播种,每盆播种20粒种子,待温室内生长(28 °C/22 °C,光照16 h/黑暗8 h,相对湿度65%~75%)14 d后间苗至15株。于2021年1月9日收获,试验执行期为118 d。收获时,分别测定植株AMF侵染率、地上指标(草茎长度、分蘖数、叶片数、生物量)、地下指标(根体积、长度、直径、表面积、根尖数、根分叉数、根系干重),并分析土壤团聚体情况。

1.2 AMF侵染率测定

将从土壤中收集的根段小心清洗干净,采用Phillips and Hayman (1970)的方法^[14]将根段染色,步骤如下:将清洗过的根段置于10% KOH溶液中,在90 °C水浴中加热15 min至根段透明,于碱性H₂O₂中软化20 min,于1% HCl中酸化,润洗4次后置于台盼蓝溶液中(0.05%),常温下染色2 h;然后将染好色的根置于乳酸甘油中,在室温下脱色。第2天,将脱好色的根样制片,在显微镜下观察丛枝、泡囊、孢子和菌丝等结构,用十字交叉法统计AMF真菌侵染率^[15]。

$$\text{侵染率}(\%) = (\text{交叉点上菌根数} / \text{总交叉点数}) \times 100\%$$

1.3 地上、地下生长指标分析

1.3.1 地上生长指标分析 对每株植物分别测定其草茎长度、分蘖数、叶片数。将植株地上部分装入信封放入烘箱,在80 °C下烘干36 h至恒重,称量地上部分生物量。

1.3.2 地下生长指标分析 将植物根系洗净、平展于根盘内,通过扫描仪(Epson)获得根系照片,利用WinRhizo软件分析获得根系体积(V)、长度(L)、直径(D)、表面积、根尖数、根分叉数^[16]。之后将根系用吸水纸擦干,置于80 °C下烘干36 h至恒重,称量根系干重。通过以下公式计算根系特征指标:

$$\text{比根长(SRL)}, \text{SRL}(\text{m/g}) = L/W$$

$$\text{根质量密度比(RMD)}, \text{RMD}(\text{g/cm}^3) = W/V$$

$$\text{根长密度(RLD)} \text{RLD}(\text{cm/cm}^3) = L/V。$$

1.4 根冠比和菌根依赖度计算

通过以下公式计算根冠比和菌根依赖度:

根冠比=根系干重/地上部分生物量

菌根依赖度=(接 AMF 植株生物量-对照生物量)/对照生物量×100%。

1.5 土壤团聚体稳定性分析

1.5.1 平均重量直径和几何平均直径 土壤团聚体稳定性测定用湿筛法,将土样放置于水桶中的套筛(孔径依次为2、1、0.5、0.25 mm)顶部,2 min后开动马达,使套筛在水中以上下移动距离为4 cm,震荡速度为30次/min的频率震动0.5 h^[17]。然后使套筛离开水面,待水稍干后,用洗瓶冲洗留在筛上的团聚体,洗入已知质量的烧杯中,烘干称质量,精确至0.01 g,每个处理重复3次。

团聚体水稳定性用平均质量直径(Mean Weight Diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)表示,计算公式如下:

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

$$GMD = \exp \sum_{i=1}^n w_i \log x_i$$

表1 3种植物的AMF侵染率

Table 1 AMF colonization rate of three plant species

处理	白三叶	百喜草	雀稗
对照	14.69±24.98 ^c	17.34±15.17 ^b	5.99±1.63 ^c
FM	47.56±27.58 ^a	16.58±12.99 ^b	38.20±24.93 ^b
RI	33.26±21.32 ^b	36.51±23.60 ^a	52.68±32.77 ^a
F	11.16	10.00	29.93
P	<0.0001	<0.001	<0.001

注:FM和RI分别代表接种 *Funnelformis mosseae* 和 *Rhizophagus intraradices*。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。数据=均值±标准误。

2.2 AMF对植物地上部分生长的影响

2.2.1 AMF对植物茎长的影响 与对照相比,接种FM和RI显著提高了白三叶($F_{2,12}=4.93, P=0.027$)和百喜草($F_{2,12}=4.232, P=0.041$)茎长;接种FM显著提高了雀稗的茎长,比对照增加31%,接种RI虽未显著提高雀稗的茎长,但仍有增加的趋势(比对照增加21%)(图2)。

2.2.2 接种AMF对3种植物分蘖数和叶片数的影响 与对照相比,接种AMF显著提高了白三叶的分蘖数($P<0.05$),接种FM和RI的白三叶分蘖数分别

比对照增加24%和31%,但是对雀稗和百喜草的分蘖数无显著影响。由于白三叶每个分枝都有3片叶,因此未在考虑范围内。接种AMF对雀稗和百喜草的平均分蘖叶片数无显著影响(图3)。

1.5.2 水稳性团聚体含量(Water Stable Aggregates) 土壤团聚体经干筛、湿筛后,通过以下公式计算水稳性团聚体含量:

$$WSA(\geq 0.05 \text{ mm 水稳性团聚体数量}) = \frac{\geq 0.05 \text{ mm 团聚体(湿筛)}}{\text{总团聚体(干筛)}} \times 100\%$$

1.6 统计分析

通过单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan多重比较分析不同接种AMF处理对植株生长指标及土壤团聚体相关指标的影响(采用软件SPSS 23.0)。

2 结果与分析

2.1 AMF侵染率

2种AMF(FM和RI)对白三叶和雀稗的侵染率均显著高于对照($P<0.05$),侵染效果较好。百喜草对2种真菌的侵染能力存在差异,对FM侵染率未显著高于对照,但对RI侵染率显著高于对照(表1,图1)。

比对照增加24%和31%,但是对雀稗和百喜草的分蘖数无显著影响。由于白三叶每个分枝都有3片叶,因此未在考虑范围内。接种AMF对雀稗和百喜草的平均分蘖叶片数无显著影响(图3)。

2.2.3 接种AMF对3种植物地上生物量的影响 与对照相比,接种AMF显著提高了白三叶地上生物量($P<0.05$)。AMF也增加了雀稗的地上生物量的趋势。与对照比较,接种FM和RI对白三叶地上生物量的增加幅度分别达到245%和40%;接种FM和RI对雀稗地上生物量的增加幅度分别达到67%和160%

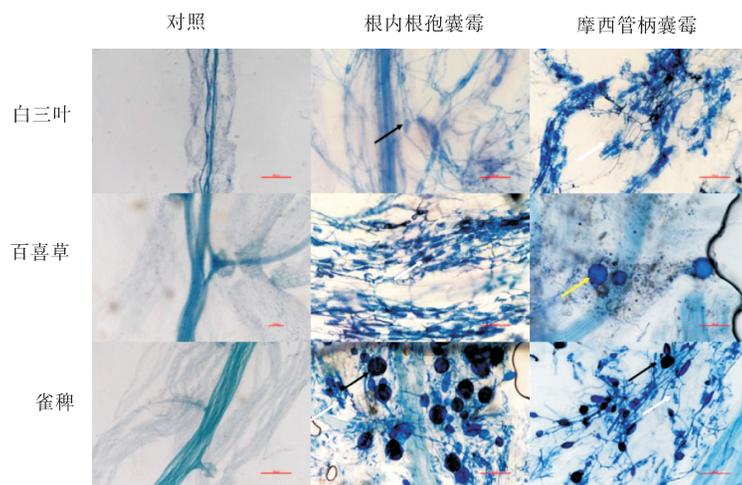


图 1 侵染率照片

Fig. 1 Graph of AMF colonization

注:图中白色、黑色和黄色箭头分别指向AMF的丛枝、孢囊和孢子。

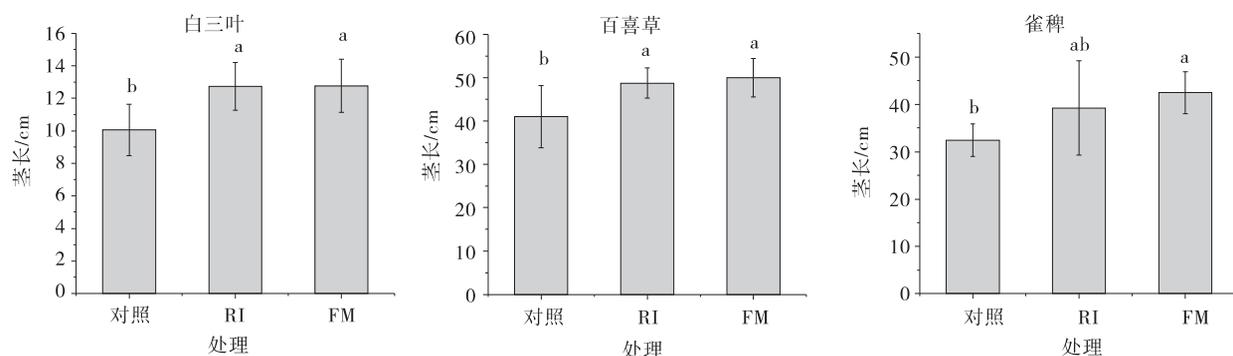


图 2 接种 AMF 对 3 种植物茎长的影响

Fig. 2 Effect of AMF inoculation on the stem length of three grass species

注:柱状图上不同字母代表经邓肯检验在 $P=0.05$ 水平下差异显著,下图同。

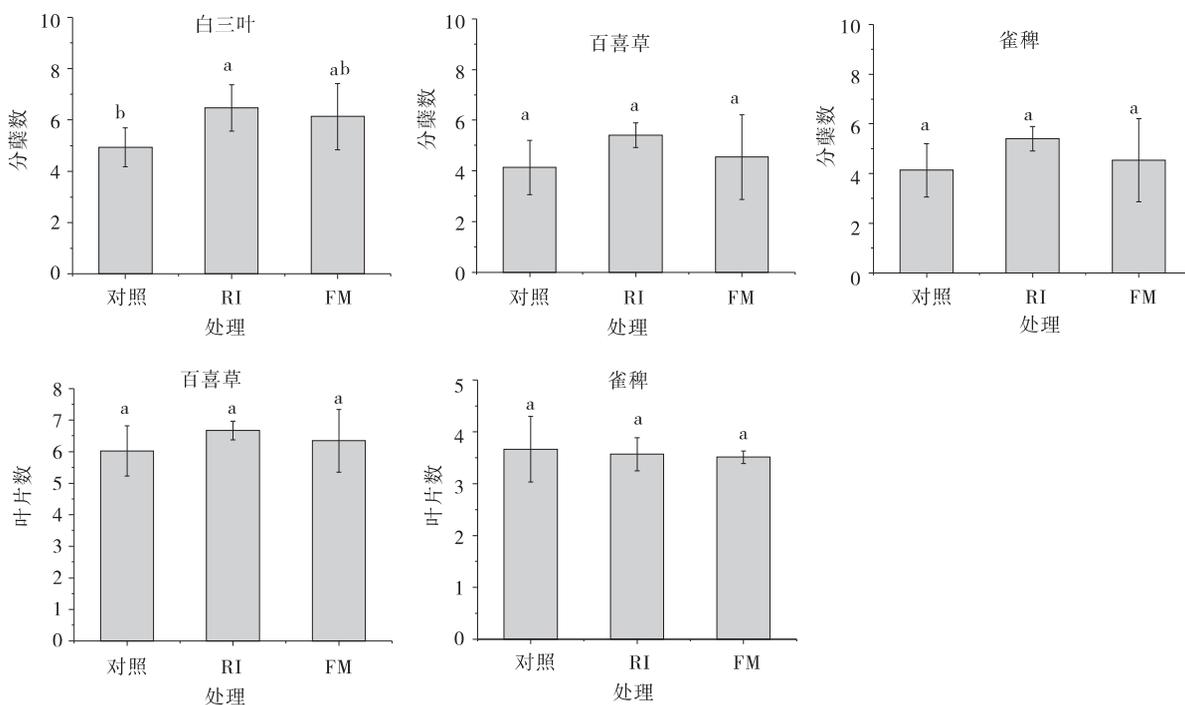


图 3 接种 AMF 对 3 种植物分蘖数、叶片数的影响

Fig. 3 Effect of AMF inoculation on tiller number, leaf number and of three grass species

(图4)。但是,与对照相比,接种FM的百喜草地上生物量低于对照,表现出寄生效应。

接种2种AMF显著改变了白三叶、百喜草和雀稗的地上部分形态结构,增加其茎长、分蘖数,有利于促进水土保持植物的快速成坪,增加地表粗糙度,增强植物措施在水土保持应用中的效率。因此,AMF-植物联合技术在水土保持植被恢复,特别是坡地生草措施中增加地表覆盖度过程中具有显著优势。但是,也应该看到,不同植物对不同AMF的响应存在差异,在实际应用中应该通过试验筛选AMF与植物的最优组合,充分利用AMF和植物的协同效应。

本研究表明接种AMF显著促进了白三叶、百喜草和雀稗的地上部生长,接种AMF后的植物根系比对照植物更发达(图5)。

2.3 AMF对植物根系特征的影响

接种AMF显著提高白三叶的根长($P<0.05$)、根体积($P<0.05$)、根表面积($P<0.05$)、平均直径($F_{2,12}=18.008, P<0.0001$)、根尖数($F_{2,12}=25.945, P<0.0001$)和分叉数($F_{2,12}=31.3, P<0.0001$),因此,接种AMF可显著促进白三叶的根系生长。接种FM的白三叶根长、根体积、根表面积、平均直径、根尖数和分叉数分别比对照提高238%、495%、346%、35%、206%和376%;接种RI的白三叶根长、根体积、根表面积、平均直径、根尖数和分叉数分别比对照提高68%、140%、101%、20%、48%和108%,所以,FM对白三叶的根系生长促进效果优于RI。更强大的根系结构有利于植物锚定土壤,同时有利于稳定土壤结构。但是,FM和RI对另外两种植物的根系特征无显著效果,可见利用AMF-植物组合保持水土时,应关

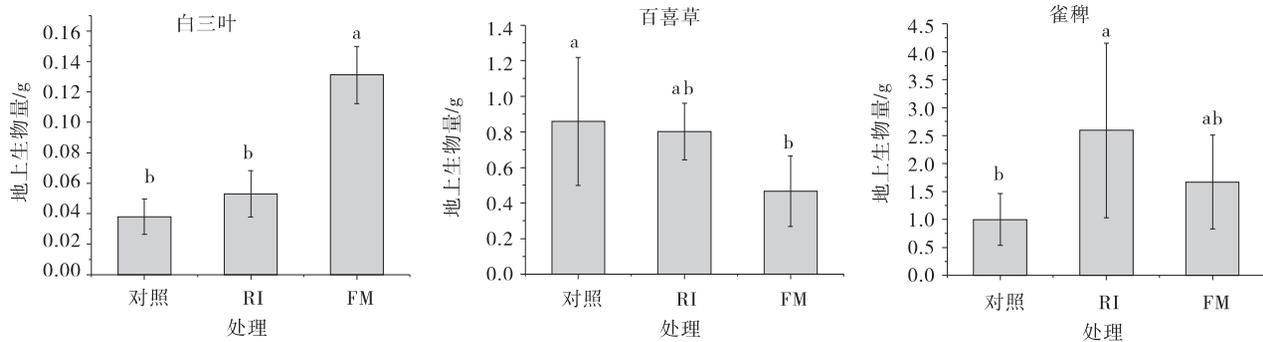


图4 接种AMF对3种植物地上生物量的影响

Fig. 4 Effect of AMF inoculation on aboveground biomass of three grass species

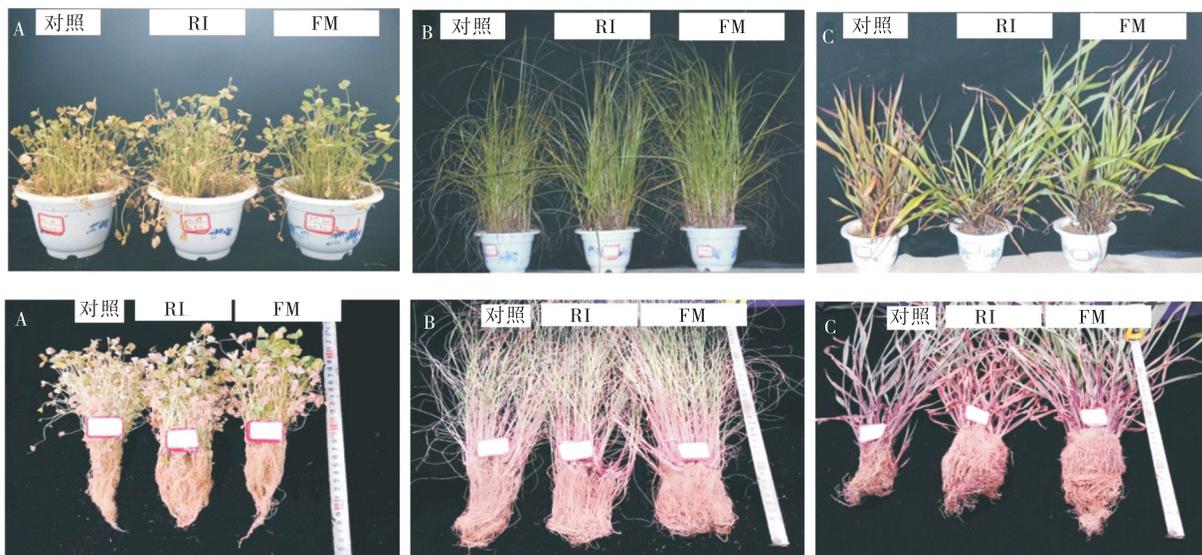


图5 接种AMF与对照植株及根系对比

Fig. 5 The comparison between AMF inoculated and control plants and plant roots

注:图中A-白三叶,B-百喜草,C-雀稗,FM-摩西管柄囊霉,RI-根内根孢囊霉

注不同 AMF 和植物组合的协同效应。但是,接种两种 AMF 对 3 种植物的比根长、质量密度比和根长密度影响不显著(表 2)。

与不接种对照相比,接种 2 种 AMF 显著提高了白三叶根系生物量($P < 0.05$),接种 FM 和 RI 的提高幅度分别达到 80% 和 154%。接种 2 种 AMF 对雀稗的根系生物量无显著影响,但是接种 AMF 降低了百喜草的根系生物量。不同植物生物量对 AMF 的响应不同,2 种 AMF 对白三叶生物量的增加效应最为显著,对雀稗生物量的影响不显著,对百喜草生物量积累有负面作用(图 6)。

2.4 根冠比和菌根依赖度

与对照相比,接种 FM 和 RI 显著提高了白三叶的根冠比($P < 0.05$),接种 FM 和 RI 对白三叶根冠比的提高幅度分别为 97% 和 175%。但是,接种 2 种 AMF 对雀稗和百喜草的根冠比影响不显著(图 7)。

除百喜草外,接种 AMF 均不同程度提高了宿主植物地上、地下部分生物量(图 8)。白三叶根系对 RI 的菌根依赖度显著高于另外 2 种植物,但是地上部分和总依赖度与另外两种植物差异不显著。百喜草对 RI 的依赖度低于另外两种植物(特别是根系)。总体而言,白三叶和雀稗对 RI 的依赖度均大于零,表明,接

表 2 接种 AMF 对 3 种植物根系的影响

Table 2 Effect of AMF inoculation on the root of three plant species

指标	处理	白三叶	百喜草	雀稗
根长/cm	对照	62.82 ^c	328.27 ^a	293.29 ^a
	FM	212.45 ^a	295.89 ^a	372.66 ^a
	RI	105.63 ^b	317.06 ^a	333.29 ^a
根体积/cm ³	对照	0.023 ^c	0.530 ^a	0.660 ^a
	FM	0.134 ^a	0.417 ^a	1.826 ^a
	RI	0.054 ^b	0.544 ^a	1.283 ^a
根表面积/cm ²	对照	4.16 ^c	45.43 ^a	45.59 ^a
	FM	18.55 ^a	38.21 ^a	86.88 ^a
	RI	8.38 ^b	45.38 ^a	68.93 ^a
根直径/mm	对照	0.21 ^c	0.45 ^a	0.54 ^a
	FM	0.28 ^a	0.43 ^a	0.71 ^a
	RI	0.25 ^b	0.48 ^a	0.71 ^a
根尖数	对照	362 ^b	2329 ^a	2336 ^a
	FM	1107 ^a	2287 ^a	3219 ^a
	RI	537 ^b	2311 ^a	2724 ^a
根分叉数	对照	695 ^c	6289 ^a	6137 ^a
	FM	3309 ^a	5356 ^a	11364 ^a
	RI	1444 ^b	5881 ^a	8024 ^a
比根长/(m·g ⁻¹)	对照	95.87 ^a	6.08 ^a	9.07 ^a
	FM	39.91 ^b	10.30 ^a	6.31 ^a
	RI	36.12 ^b	6.93 ^a	5.39 ^a
根质量密度比/(g·cm ⁻³)	对照	0.34 ^a	1.20 ^a	0.61 ^a
	FM	0.43 ^a	0.79 ^b	0.57 ^a
	RI	0.62 ^a	0.89 ^{ab}	0.56 ^a
根长密度/(cm·cm ⁻³)	对照	2798 ^a	666 ^a	548 ^a
	FM	1609 ^b	796 ^a	343 ^a
	RI	2043 ^b	608 ^a	33.0 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下表同。

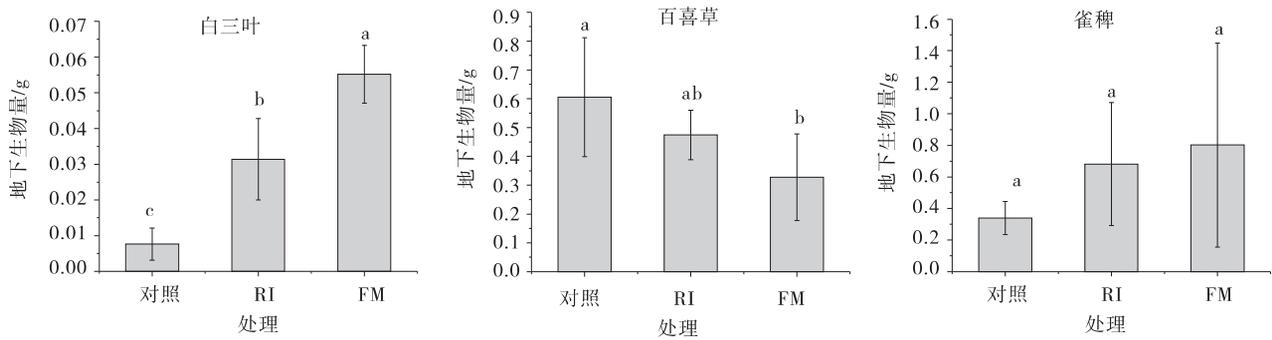


图6 接种AMF对3种植物地下部分生物量的影响

Fig. 6 Effect of AMF inoculation on the belowground biomass of three grass species

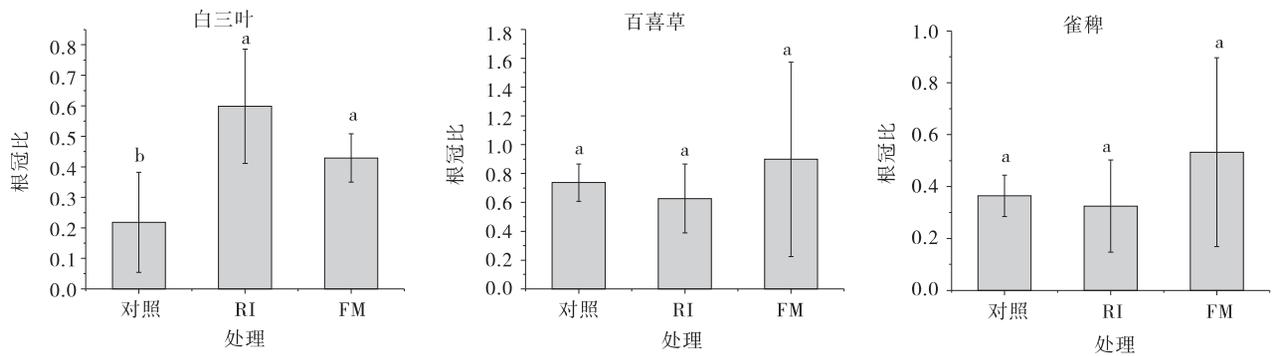


图7 接种AMF对3种植物根冠比的影响

Fig. 5 Effect of AMF inoculation on the root to shoot ratio of three grass species

种RI对这2种草本植物具有生长促进作用。

对于FM的菌根依赖度,白三叶的根系、地上部分和总依赖度均显著高于另外两种植物。百喜草对FM的依赖度是负值,因此,百喜草不能和FM建立良好的互利共生关系(图8)。白三叶和雀稗对FM的依赖度大于零,表明接种FM对这两种草本植物的生长具有促进作用。

接种RI和FM对白三叶的促生效应最为显著,因此,找到合适的植物-AMF组合对于实现植物的快速生长十分关键。

2.5 团聚体稳定性分析

本研究所选3种植物在接种FM和RI后,其土壤平均重量直径和几何平均直径与对照相比,未见显著差异。但是,接种FM和RI具有提高白三叶水稳性团聚体含量的趋势,随着时间推移有望增加土壤结构稳定性(表3)。

3 讨论

接种AMF能促进白三叶、百喜草和雀稗等的生长,3种植物均能和FM及RI建立共生关系,表明

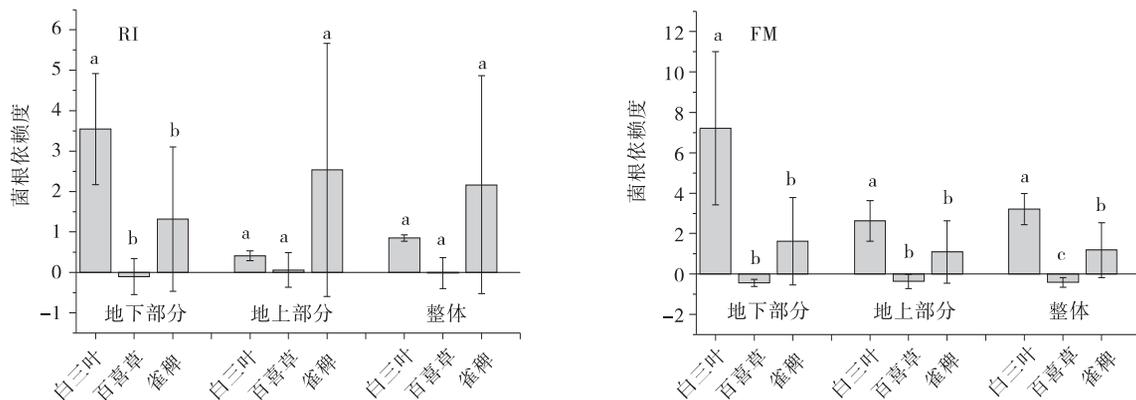


图8 3种植物对RI和FM的菌根依赖度

Fig. 8 Mycorrhizal dependency of three grass species on *Rhizophagus intraradices* (RI) and *Funneliformis mosseae* (FM)

表 3 接种 AMF 对 3 种植物土壤平均重量直径、几何平均直径、水稳性团聚体 (>0.05 mm) 含量的影响

Table 3 Effect of AMF inoculation on the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and proportion of water stable aggregate (>0.05 mm) of three plant species

指标	处理	白三叶	百喜草	雀稗
平均重量直径/mm	对照	0.65 ^a	0.54 ^a	0.49 ^a
	FM	0.61 ^a	0.51 ^a	0.54 ^a
	RI	0.70 ^a	0.47 ^a	0.51 ^a
几何平均直径/mm	对照	0.71 ^a	0.68 ^a	0.66 ^a
	FM	0.70 ^a	0.67 ^a	0.69 ^a
	RI	0.74 ^a	0.65 ^a	0.69 ^a
水稳性团聚体含量/%	对照	65.88 ^b	76.77 ^a	70.50 ^a
	FM	72.84 ^{ab}	79.20 ^a	75.33 ^a
	RI	82.65 ^a	78.09 ^a	72.78 ^a

AMF 具有寄主植物广适性。在共生体系中,植物为 AMF 提供光合作用的产物碳^[5],而 AMF 能通过促进植物吸收矿质营养、水分、调节植物激素等机制影响植物生长^[18],菌丝体在植物根部生长并延伸到更深更广土层,将根区外土壤中营养物质输送给寄主植物^[19],尤其在营养缺乏的条件下促进作用更显著^[20]。本研究接种 FM 和 RI 显著改善白三叶、百喜草和雀稗的地上生长指标,对百喜草和白三叶的促进效果最为显著。其中,增加植物分蘖数有利于在水土保持实践中快速成坪。因此,AMF 在促进植被盖度快速恢复方面有应用潜力。但是,应该看到,不同植物分蘖数对于接种 AMF 的响应程度不同,表明不同 AMF 与不同植物之间的共生效率存在差异。在水土保持实践中,应充分考虑植物对不同 AMF 的响应度,从而科学选择最优组合,提高水土保持效率。

根冠比、根生物量是反映植物协调积累状况的重要指标之一,植物能够调节根冠比来实现对逆境的适应^[21]。接种 FM 和 RI 显著提高白三叶根系生长指标,增加根长、根体积、根分叉数等,对白三叶的根冠比也有显著提高。AMF 侵染宿主后刺激植物分泌类黄酮和菌根真菌分泌生长素进行信号识别,根系细胞在生长素诱导作用下促进侧根形成,导致其根系形态发生变化^[22]。本试验接种 RI 和 FM 对白三叶的促生效应最为显著,分析原因可能是白三叶根部自然附着根瘤菌与接种的 AMF 呈现良好协同作用,根瘤菌与 AMF 的混合菌种对植物根系具有较高侵染率,能同时促进白三叶生长和对氮磷的吸收,形成“AMF 真菌—豆科

植物—根瘤菌”共生关系,这与刘忆等^[23]的研究结果相吻合。但是,FM 和 RI 对另外 2 种植物的根系特征无显著效果,可见筛选出合适的植物—AMF 组合对于实现植物的快速生长及保持水土效果十分关键。

同时,白三叶对 2 种 AMF 的菌根依赖度高于另外 2 个草种,且对 FM 的总依赖度要高于 RI,百喜草对 FM 的依赖度是负值,不能和 FM 建立互利共生关系,说明了植物对 AMF 选择具有偏好性^[24]。Hazard 等^[25]研究发现长势较好的水土保持植物白三叶和黑麦草根定植不同的 AMF 群落也具有偏好性。植物—AMF 之间存在的相互偏好性、依赖程度及养分分配也导致植物养分吸收和生长效应的不同,进而影响双方的互作及多样性发生^[26]。不仅如此,菌根还能在不同尺度通过改变土壤颗粒组成及影响地下微生物群落功能等改善土壤团聚体组成和结构。AMF 菌丝网可通过缠绕包裹作用促进团聚体的形成,并通过机械力提高其稳定性^[27];其次,AMF 菌丝分泌的具有粘性的糖蛋白(Glomalin related soil protein, GRSP)通过胶结作用增加团聚体表面疏水性,提高抵御外力分解能力^[28];Kohler 等^[29]研究表明 AMF 菌丝直接参与团聚体形成和稳定过程,还能通过促进植物根系生长间接提高土壤团聚体稳定性。本研究通过接种 FM 和 RI 均显著提高了白三叶土壤水稳性团聚体含量,提高了土壤团聚体稳定性,增强其调控坡面侵蚀的能力,这对于治理红壤侵蚀区坡面水土流失尤为重要。

本研究主要在盆栽条件下进行,局限于室内人工模拟的单一环境,菌种种类也较少,相较于自然环境下

多样胁迫交错叠加,多种菌类混合共生的复杂条件,还需要将研究延伸到自然环境中探究不同AMF在不同逆境下与植物最佳组合。其次,下一步研究还应侧重于从南方红壤区典型水保植物根际筛选土著AMF,并进行扩大培养,分析它与外来AMF对水保植物生长和土壤团聚情况的效果差异。本研究筛选到2个AMF与水保植物的最优组合,白三叶-FM和白三叶-RI,下一步研究将应用更多AMF种类,筛选适宜南方红壤区水土保持护坡的更多植物-AMF组合,进而在生产实际中发挥重要作用。

4 结论

摩西管柄囊霉(FM)、根内根孢囊霉(RI)显著提高了白三叶和雀稗的侵染率,改变了白三叶、百喜草和雀稗的地上部分形态结构,增加了其茎长、分蘖数,显著促进了白三叶的根系生长及根冠比。白三叶和雀稗的地上、地下部分对FM和RI的菌根依赖度大于零,均高于百喜草。接种FM和RI具有提高白三叶土壤水稳性团聚体含量的趋势。FM和RI与白三叶优良共生关系对促进红壤侵蚀区植被恢复具有良好应用前景。

参考文献:

- [1] 梁音,张斌,潘贤章,等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008(1):22-27.
- [2] 谢锦升,杨玉盛,解明曙. 亚热带花岗岩侵蚀红壤的生态退化与恢复技术[J]. 水土保持研究,2004(3):154-156.
- [3] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [4] 杨洁,喻荣岗,王照艳. 红壤侵蚀区优良水土保持草本植物的选择及评价[J]. 中国水土保持,2009(3):25-28.
- [5] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal Symbiosis [J]. Quarterly Review of Biology, 2008, 3(3):273-281.
- [6] Lekberg Y, Waller L P. What drives differences in arbuscular mycorrhizal fungal communities among plant species? [J]. Fungal Ecology, 2016, 24: 135-138.
- [7] Smith S E, Facelli E, Pope S, et al. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas [J]. Plant and Soil, 2010, 326(1-2):3-20.
- [8] 张楚婷,彭雪,宋玉,等. ‘兰引3号’结缕草足球场丛枝菌根真菌多样性及菌群结构分析[J]. 草原与草坪,2022,42(3):27-34.
- [9] 陈梅梅,陈保冬,王新军,等. 丛枝菌根真菌群落对白三叶草生长的影响[J]. 生态学报,2010,30(6):1456-1462.
- [10] 吴强胜,袁芳英,费永俊,等. 丛枝菌根真菌对白三叶根系构型和糖含量的影响[J]. 草业学报,2014,23(1):199-204.
- [11] Xie M M, Zou Y N, Wu Q S, et al. Single or dual inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia regulates plant growth and nitrogen acquisition in white clover [J]. Plant, Soil and Environment, 2020, 66(6):287-294.
- [12] 李龙兴,王志伟,陈莹. 高温胁迫对5种牧草生理生化特性的影响[J]. 草原与草坪,2019,36(4):107-111.
- [13] 叶松清,蔡志发. 百喜草的栽培技术[J]. 草原与草坪, 2003(2):62-64.
- [14] 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):158-161.
- [15] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytol, 1980, 84(3):489-500.
- [16] 刘雅洁,王玉丹,曹红月,等. AM真菌群落结构对4种不同科属植物根系特征的响应[J]. 草业科学, 2022, 39(6):1185-1196.
- [17] 郭伟,周云鹏,陈美淇,等. 长期不同氮肥施用量对潮土团聚体分布和真菌群落组成的影响[J/OL]. 土壤学报: 1-13 [2023-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20230410.1323.002.html>.
- [18] Liu H H, Wang Y J, Hart M, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis regulates hormone and osmotic equilibrium of *Lycium barbarum* L. under salt stress [J]. Mycosphere, 2016, 7(6):828-843.
- [19] Heijden M G A, Martin F M, Marc-André Selosse, et al. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future [J]. New Phytologist, 2015, 205(4):1406-1423.
- [20] Giri B, Prasad R, Varma A. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Responses to Nutrient Enrichment [J]. Root biology, 2018, 35:429-449.
- [21] 张绪成,郭天文,谭雪莲,等. 氮素水平对小麦根-冠生长及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3):97-102.

- [22] 薛英龙,李春越,王苾蓉,等.丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制[J].水土保持学报,2019,33(6):10—20.
- [23] 刘忆,袁玲.根瘤菌和AM真菌对紫花苜蓿结瘤和产质量的影响[J].土壤学报,2020,57(5):1292—1298.
- [24] 梁雪飞,唐梦君,吕立新,等.三种丛枝菌根真菌对茅苍术的生长、生理及主要挥发油成分的影响[J].生态学报,2018,37(6):1871—1879.
- [25] Hazard C, Gosling P, VanD, *et al.* The role of local environment and geographical distance in determining community composition of arbuscular mycorrhizal fungi at the landscape scale [J]. *The ISME Journal*, 2013, 7 (3) : 498—508.
- [26] 王浩,吴爱姣,刘保兴,等.菌根真菌多样性与植物多样性的相互作用研究进展[J].微生物学通报,2020,47(11):3918—3932.
- [27] Rillig M C, Aguilar—Trigueros C A, Bergmann J, *et al.* Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation [J]. *New Phytologist*, 2014, 205 (4) : 1385—1388.
- [28] 王建,周紫燕,凌婉婷.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.
- [29] Kohler J, Roldán A, Campoy M, *et al.* Unraveling the role of hyphal networks from arbuscular mycorrhizal fungi in aggregate stabilization of semiarid soils with different textures and carbonate contents[J]. *Plant and Soil*, 2017, 410(1—2):273—281.

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and soil aggregates of three soil and water conservation herbs

GE Pei-lin¹, KONG Zhao-yu², XIA Jin-wen³, LIU Hong-guang^{1,4*}

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. College of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330000, China; 3. College of Hydraulic & Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] The screening of the combination between soil and water conservation herbs and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is the key to improving the control of soil erosion in red soil areas. [Method] A greenhouse experiment was conducted with three AMF treatments (inoculation with *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices* and non-inoculated control), and three plant species, *Trifolium repens*, *Paspalum notatum* and *Paspalum thunbergii*. The AMF colonization rate, above-ground and belowground growth traits of the three herbs and soil aggregates were analyzed. [Result] The results showed that inoculation of AMF significantly improved the above-mentioned growth indices of *T. repens*, *P. notatum* and *P. thunbergii*, and exerting the most significant growth-promotion effect on *P. notatum* and *T. repens*. AMF inoculation significantly increased root length, root volume, root forks and root-to-shoot ratio of *T. repens*, promoting the root growth and development of *T. repens*. The positive effect of *T. repens* on AMF root-cap ratio and mycorrhizal dependency was better than the other two plants. AMF inoculation significantly increased the content of water-stable aggregates in the soil of *T. repens*. [Conclusion] *T. repens* had higher rate of mycorrhizal infection, developed a more robust root system and good growth potential through symbiosis with AMF, improving soil aggregate stability. It effectively promoted vegetation and soil interaction, thus enhancing its ability to control slope erosion, improving red soil erosion area of slope soil, and reducing wa-

ter loss from plant measures at the management level o. This could accelerates the region's ecological restoration and vegetation reconstruction.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; plant roots; planting grass measures; soil aggregate; soil and water conservation

(责任编辑 靳奇峰)