

DOI:10.11686/cyxb2025272

http://cyxb.magtech.com.cn

甘芮, 吉尔尔格, 隋晓青, 等. 接种丛枝菌根真菌对无芒雀麦生长特性及糖含量的影响. 草业学报, 2026, 35(6): 122—130.

GAN Rui, Jiererge, SUI Xiao-qing, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth characteristics and sugar content of *Bromus inermis*. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 122—130.

接种丛枝菌根真菌对无芒雀麦生长特性及糖含量的影响

甘芮, 吉尔尔格, 隋晓青*, 刘海军, 刘雨旋, 靳瑰丽, 穆耶赛尔·麦麦提

(新疆农业大学草业学院, 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆草地资源与生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究接种丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对无芒雀麦植株生长特性及糖含量的影响,以‘乌苏1号’无芒雀麦为试验材料,通过盆栽试验法对无芒雀麦接种3种丛枝菌根真菌,即摩西管柄囊霉、根内根孢囊霉和异形根孢囊霉。结果表明,单一接种和复合接种均能有效地侵染无芒雀麦根系,其侵染率为69.83%~80.29%,接种丛枝菌根提高了无芒雀麦生长指标和叶绿素含量,并改善了无芒雀麦根总长、根表面积、根体积、根尖数和交叉数等,其中摩西管柄囊霉和根内根孢囊霉复合接种效果最显著,使总生物量、根总长和根表面积分别较对照提高107.67%、73.34%和79.63%。单一接种和复合接种均显著提高了无芒雀麦叶片和根系的蔗糖及葡萄糖含量,其中复合接种效果更显著。通过隶属函数综合分析得出,摩西管柄囊霉和异形根孢囊霉的复合接种处理对无芒雀麦根系构型的建立和糖含量的改善效果最佳。

关键词:丛枝菌根真菌;无芒雀麦;根系构型;糖含量

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth characteristics and sugar content of *Bromus inermis*

GAN Rui, Jiererge, SUI Xiao-qing*, LIU Hai-jun, LIU Yu-xuan, JIN Gui-li, MAIMAITI·Mu-yesaier

College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, 830052, China

Abstract: In this study, we inoculated *Bromus inermis* ‘Wusu No. 1’ with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and determined its effects on the growth characteristics and sugar content of the host plant. A pot experiment was conducted using *B. inermis* ‘Wusu No. 1’ and three AMF species—*Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices*, and *Rhizophagus irregularis*. These AMF were inoculated alone or in various combinations onto *B. inermis* plants. The results show that AMF, whether inoculated singly or co-inoculated, effectively colonized the roots of *B. inermis*, with colonization rates ranging from 69.83% to 80.29%. Compared with non-inoculated plants, those inoculated with AMF showed higher values for growth indicators and chlorophyll content, and higher values for total root length, root surface area, root volume, root tip number, and root cross number. Among the various treatments, the combined inoculation of *F. mosseae* and *R. intraradices* had the most significant effect, increasing the total biomass, total root length, and root surface area by 107.67%, 73.34%, and 79.63%,

收稿日期:2025-07-02;改回日期:2025-09-09

基金项目:国家牧草产业技术体系(CARS-34)和新疆维吾尔自治区重点研发专项(2023B02031)资助。

作者简介:甘芮(1997—),女,四川成都人,在读硕士。E-mail: 893532022@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sxq303@xjau.edu.cn

respectively, compared with the control group. Both single and co-inoculation of *F. mosseae* and *R. intraradices* resulted in significantly increased sucrose and glucose contents in the leaves and roots of *B. inermis* plants, with higher values in the co-inoculation treatment. A comprehensive analysis using the membership function method revealed that the co-inoculation treatment with *F. mosseae* and *R. irregularis* yielded the best results in terms of establishing root architecture and improving sugar content in *B. inermis*.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Bromus inermis*; root architecture; sugar content

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)在自然条件下能够与超过 80% 的陆生植物形成菌根共生关系,作为植物根系的重要共生伙伴,通过调控植物生长发育、根系构型及碳代谢,显著提升植物对环境的适应性^[1]。植物为 AMF 提供光合产物(如碳水化合物和脂质),而 AMF 则通过其庞大的根外菌丝网络显著扩展植物根系的吸收范围,帮助宿主获取土壤中难以直接利用的磷、氮等矿质元素^[2-3]。这种互惠共生机制不仅增强了植物的营养状况,还显著提升了其抗逆能力^[4]。近年来,研究发现 AMF 可通过多种生理与分子机制调控宿主植物的生长发育,通过调控根系构型,促进侧根发生和根系发育,显著提高植物的根表面积、根长和根体积,有助于植物更好地适应逆境环境^[5-6];还能增强光合作用与碳代谢,提高叶绿素含量与光合速率,并影响糖类物质的合成与分配,为植物的生长发育提供了更多的碳水化合物^[7-8]。而 AMF 与植物之间的共生关系是一种典型的互惠共生。AMF 通过其庞大的菌丝网络促进植物生长,改善宿主植物营养状况^[9]。作为回报,植物为 AMF 提供光合作用所需的碳水化合物,维持其生长和代谢^[10]。也有研究表明,AMF 可以提升植物抗逆性,在非生物胁迫下,可以通过调节渗透物质、抗氧化酶活性和激素水平等方式增强植物的适应性^[11]。

植物根系构型(root system architecture, RSA)是植物根系在生长介质中的空间分布与形态特征,包括主根长度、侧根分支、根毛密度等要素,直接影响植物对水分、养分的吸收效率及环境适应能力^[12]。根系构型的形成受遗传调控、环境因素(如水分、养分、微生物互作)以及激素信号等多重因素共同作用,其动态调整是植物应对胁迫、优化资源获取的重要策略^[13]。根际微生物(如丛枝菌根真菌、根瘤菌)通过分泌激素、固氮溶磷等途径促进侧根发育,增强养分吸收,减少化肥依赖性^[14],植物也可以通过改变根系构型适应极端干旱^[15]。AMF 通过分泌信号分子与宿主植物形成共生体,显著改变根系形态结构。

蔗糖和葡萄糖在植物-AMF 共生体中扮演着重要角色,是 AMF 生长所需的主要碳源、能量来源和调节共生关系强弱的关键信号分子,AMF 在根系定殖过程中需要消耗宿主植物 4%~20% 的光合碳水化合物,主要吸收来自根系的葡萄糖,而非蔗糖^[2]。宿主植物根系中蔗糖向葡萄糖的转化效率以及葡萄糖的供应水平,直接决定了 AMF 的活性和对氮、磷等养分的回报率。同时,糖含量的变化也是植物碳代谢状态和抗逆生理的重要指标^[16]。然而,目前关于 AMF 如何影响宿主植物(尤其是牧草)体内蔗糖和葡萄糖的代谢、运输与分配,以及这种碳分配如何与菌根改良的根系构型相耦合,从而共同促进植物生长的机制,尚缺乏深入研究。

无芒雀麦(*Bromus inermis*)作为一种兼具饲用价值与生态效益的多年生草本植物,其营养价值高,适口性好,消化率高,在畜牧业和生态保护领域占据重要地位,被誉为“禾草饲料之王”^[17],深入研究无芒雀麦对推动草牧业的发展具有极其重要的意义^[18]。因此,本试验以无芒雀麦为试验材料,通过观察接种不同 AM 真菌后无芒雀麦生长、根系构型、叶绿素和地上、地下糖含量的变化,探讨 AMF 在植物生长和根系构型建立过程中的作用以及对糖含量变化的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验以‘乌苏 1 号’无芒雀麦(*B. inermis* ‘Wusu No. 1’)为试验材料,由新疆农业大学草业学院提供。供试菌种为摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)、根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)、异形根孢囊霉(*Rhizophagus irregularis*),编号 BGC BJ04A,购自广东利百农生物科技有限公司。

AM真菌菌剂为室内扩繁后含被浸染的白三叶(*Trifolium repens*)植物根段、菌根真菌孢子及根外菌丝的根际沙土混合物,具体参照黄玉丹等^[19]的扩繁方法。3个半月后停止浇水,剪掉地上部分,最后收获测定孢子含量备用。

1.2 试验设计

本试验采用室内盆栽法,于2024年5—8月在新疆农业大学草业学院的智能温室中开展,温室环境条件如下:采用昼/夜变温管理,白天温度为(25±2)℃,夜间温度为(18±2)℃;空气相对湿度维持在60%~70%;光照周期设定为14 h/10 h(光/暗),光合有效辐射强度控制在(300±50) μmol·m⁻²·s⁻¹。试验共设置7个处理组,包括单一接种摩西管柄囊霉(FM)、根内根孢囊霉(FG)、异形根孢囊霉(FY),以及3种复合接种处理:摩西管柄囊霉+根内根孢囊霉(FMG)、摩西管柄囊霉+异形根孢囊霉(FMY)、异形根孢囊霉+根内根孢囊霉(FYG),以不接种丛枝菌根真菌为对照组(CK)。盆栽采用聚乙烯塑料花盆,尺寸为高20 cm、上口径15 cm、底径13 cm。每盆装土量为3 kg,并施用90 g菌剂,每个处理组设4次重复。无芒雀麦种子先在5%的双氧水中浸泡3~4 min进行表面消毒,重复3次,随后用无菌蒸馏水进行多次清洗。每盆播种30粒种子,待种子发芽7 d后,间苗至每盆保留10株。每隔两周向花盆中加入0.5 mol·L⁻¹的1/2 Hoagland营养液(KNO₃、NH₄NO₃、KH₂PO₄等)50 mL,并根据需要适时称重补充水分。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 菌根侵染率和孢子密度测定 将培养3个月后的无芒雀麦植株进行收获,随机选取各处理根系样品,清洗干净并用滤纸吸干水分,切成1~2 cm长的根样。实施固定、碱化、酸化和染色处理后,制作装片以供显微镜(SMZ745T,日本尼康)观察^[19]。应用交叉法计算菌根侵染的百分比,计算公式为:

$$\text{AMF侵染率} = \frac{\text{侵染根段数}}{\text{全部根段数}} \times 100\%$$

土壤孢子密度测定:各处理土壤样品阴干后,称取5 g风干土样,采用湿筛倾注—蔗糖离心法进行测定。

1.3.2 叶绿素含量测定 各处理随机挑选5~10片无芒雀麦倒二叶,使用手持叶绿素仪(TYS-4N,北京中科维禾科技发展有限公司)测定其相对叶绿素含量。

1.3.3 生物量和根系性状测定 生物量测定:将经过不同处理的植株从茎基部截断,分为地上和地下部分。105℃杀青15 min,随后在70℃下烘干至恒重。茎粗:对不同处理的植株用游标卡尺(精度0.02 mm)测量其生殖枝茎基部直径。

根系性状测定:根系取样后用清水清洗去除土和杂质,用万深LA-S系列植物根系图像分析系统进行扫描,扫描后获得的图像经分析程序(EPSON-Scan)处理得到根系的根总长、根表面积、根体积、根直径、根尖数和交叉数数据。

1.3.4 糖含量测定 取无芒雀麦地上、地下部样品洗净后烘干研磨,50 mg干样过筛(1 mm),加入4 mL 80%酒精80℃水浴40 min,2500 r·min⁻¹离心5 min,收集上清液,采用比色法^[20]测定蔗糖和葡萄糖含量。

1.4 数据处理

采用Excel 2021进行试验数据统计和整理,运用SPSS 26.0对数据进行显著性分析、隶属函数分析和Duncan's多重比较($P < 0.05$),采用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对无芒雀麦根系侵染率和土壤孢子密度的影响

如图1可知,3种不同的AMF菌株均能侵染无芒雀麦根系,其侵染率为69.83%~80.29%,其中,FMY处理下无芒雀麦根系的侵染率最高,显著高于FY、FG和FYG处理($P < 0.05$),与FM和FMG接种处理无显著差异($P > 0.05$)。土壤孢子数在FMY处理后也达到最大值,为74.3 pcs·g⁻¹干土,且显著高于FY和FG处理,与FM、FMG、FYG接种处理无显著性差异。根系侵染率和土壤孢子密度结果表明复合接种浸染效果更好。

2.2 不同类型 AMF 对无芒雀麦生长指标的影响

如表 1 所示,接种不同 AMF 菌株对无芒雀麦的茎粗、地上及地下生物量、总生物量、根冠比以及叶片数有显著性影响($P < 0.05$)。其中,FM、FY、FG、FMY 和 FYG 处理后茎粗均显著高于对照,FM 处理表现最佳,较对照提高 46.53%;接种 AMF 菌株处理后地上生物量均显著高于对照,FM 处理较对照提高 53.21%;FYG 处理后地下生物量达到了最大值,较 FMY、FMG 处理和对照分别提高了 64.05%、68.46% 和 75.98%;总生物量在 FYG 处理中达到峰值,比对照提高了 107.67%;FM、FY、FMG 处理后根冠比显著高于对照,FM 处理表现最佳,与 FY 处理组无显著差异($P > 0.05$);接种 AMF 菌株处理后叶片数均显著高于对照,FG 处理表现最佳,较对照提高 22.93%,无论是单一接种还是复合接种均促进了无芒雀麦的生长。

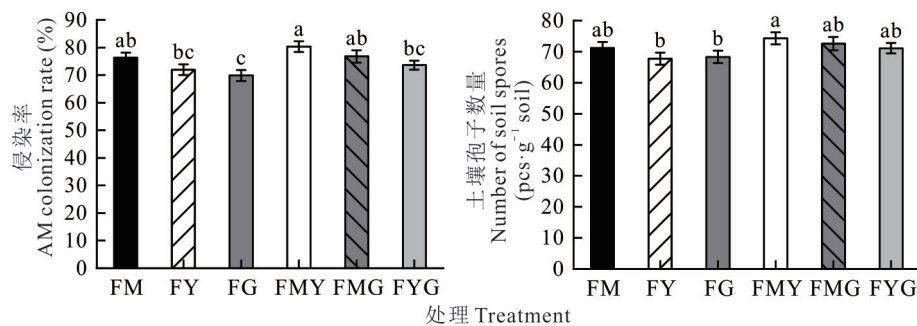


图 1 AMF 对根系侵染率和土壤孢子密度的影响

Fig. 1 Effect of AMF on root colonization rate and soil spore density

FM: 摩西管柄囊霉 *F. mosseae*; FG: 根内根孢囊霉 *R. intraradices*; FY: 异形根孢囊霉 *R. irregularis*; FMG: 摩西管柄囊霉 + 根内根孢囊霉 *F. mosseae* + *R. intraradices*; FMY: 摩西管柄囊霉 + 异形根孢囊霉 *F. mosseae* + *R. irregularis*; FYG: 异形根孢囊霉 + 根内根孢囊霉 *R. irregularis* + *R. intraradices*。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters mean significant difference among treatments at 0.05 level.

表 1 AMF 对无芒雀麦生长指标的影响

Table 1 Effect of AMF on the growth indexes of *B. inermis*

处理 Treatment	茎粗 Stem thickness (cm)	单株地上生物量 Above-ground biomass (g·plant ⁻¹)	单株地下生物量 Below-ground biomass (g·plant ⁻¹)	单株总生物量 Total biomass (g·plant ⁻¹)	根冠比 Root-crown ratio	叶片数 Number of leaves
CK	1.01±0.04d	3.74±0.10d	7.83±0.29b	8.86±0.34d	0.47±0.08cd	39.25±1.49b
FM	1.40±0.14ab	5.73±0.95a	10.08±0.57ab	15.80±0.69ab	0.57±0.06a	45.00±2.45a
FY	1.48±0.06a	5.53±0.36ab	10.15±0.46ab	15.68±0.41ab	0.54±0.04ab	46.25±1.37a
FG	1.34±0.05abc	4.45±0.31abc	10.50±0.84ab	14.90±0.94abc	0.43±0.04cd	48.25±1.90a
FMY	1.39±0.05abc	4.12±0.18c	8.40±0.81b	12.73±1.24bc	0.49±0.09c	42.00±1.13a
FMG	1.18±0.04cd	4.08±0.30c	8.18±0.96b	12.29±0.88bc	0.50±0.08b	41.75±0.47a
FYG	1.34±0.04abc	4.63±0.44abc	13.78±0.95a	18.40±1.27a	0.35±0.03d	44.75±1.10a

CK: 未接种 Unvaccinated; FM: 摩西管柄囊霉 *F. mosseae*; FG: 根内根孢囊霉 *R. intraradices*; FY: 异形根孢囊霉 *R. irregularis*; FMG: 摩西管柄囊霉 + 根内根孢囊霉 *F. mosseae* + *R. intraradices*; FMY: 摩西管柄囊霉 + 异形根孢囊霉 *F. mosseae* + *R. irregularis*; FYG: 异形根孢囊霉 + 根内根孢囊霉 *R. irregularis* + *R. intraradices*; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

2.3 不同类型 AMF 对无芒雀麦根系构型的影响

如表 2 所示,接种不同 AMF 菌株的无芒雀麦根系构型相关指标均显著高于未接种处理 ($P < 0.05$)。FMG 处理对根总长和根表面积表现最佳,较对照提高了 73.34%、79.63%;FMY 处理对根体积、根直径、根尖数和交叉数表现最佳,分别较对照提高 49.02%、47.37%、30.56%、51.70%,FMY、FMG、FYG 处理间无显著性差异。结果表明,无芒雀麦复合接种后根系构型各指标明显高于单一接种,其中 FMG 复合接种效果最明显。

表2 AMF对无芒雀麦根系构型的影响

Table 2 Effect of AMF on the root conformation of *B. inermis*

处理 Treatment	单株根总长 Root length (cm·plant ⁻¹)	单株根表面积 Root surface area (cm ² ·plant ⁻¹)	单株根体积 Root volume (cm ³ ·plant ⁻¹)	单株根直径 Root diameter (mm·plant ⁻¹)	根尖数 Root tips number	交叉数 Crossings
CK	119.16±16.67d	9.08±0.54e	0.051±0.004b	0.19±0.04b	216±19.78b	147±5.01c
FM	191.71±24.75ab	13.19±0.62bc	0.069±0.005a	0.21±0.03ab	260±7.43ab	182±7.96b
FY	140.63±19.89bc	11.83±1.03cd	0.067±0.003a	0.22±0.02b	265±10.08a	191±7.58b
FG	156.85±17.34b	9.98±0.46d	0.065±0.003a	0.25±0.04b	257±24.35ab	176±5.18b
FMY	198.20±26.14ab	15.03±0.75ab	0.076±0.002a	0.28±0.05a	282±11.63a	223±19.97a
FMG	206.55±31.25a	16.31±0.37a	0.071±0.004a	0.23±0.05ab	273±11.72a	214±11.55a
FYG	203.23±19.57a	15.73±0.54a	0.069±0.006a	0.24±0.07ab	250±9.62ab	217±14.45a

2.4 不同类型AMF对无芒雀麦叶绿素含量的影响

根据图2所示,接种不同种类的AMF菌株较对照对无芒雀麦叶片的叶绿素有显著性影响($P<0.05$)。在各AMF接种处理中,FMG处理的无芒雀麦叶绿素含量最高,显著高于FM、FY、FG、FMY处理,与FYG处理之间没有显著差异($P>0.05$),较对照提升了35.51%。复合接种AMF菌株后叶绿素含量均高于单一接种。

2.5 不同类型AMF对无芒雀麦蔗糖和葡萄糖含量的影响

如图3所示,除FG处理,无芒雀麦幼苗在接种不同类型的AMF菌株处理后,叶片的蔗糖含量均显著高于对照($P<0.05$)。其中,FMG处理后叶片蔗糖含量最高,与其他接种处理的差异不显著,较对照提高了27.92%。根系蔗糖含量在FYG处理下达到峰值,显著高于对照,比对照提高了60.69%。

接种不同种类的AMF菌株后无芒雀麦叶片和根系的葡萄糖含量均高于对照($P<0.05$)。其中,FYG处理的无芒雀麦叶片葡萄糖含量最高,显著高于FM、FY和FG处理,但与FMY、FMG处理之间没有显著差异($P>0.05$),较对照提高了37.67%。相反,根系葡萄糖含量在FM处理中达到最高,较对照提高了43.12%。

2.6 无芒雀麦植株各指标的相关性分析

对无芒雀麦植株各测定指标进行相关性分析,结果如图4所示,无芒雀麦的根总长、根表面积、根体积、交叉数、叶绿素含量、叶片及根系的蔗糖含量和葡萄糖含量等指标之间存在显著或极显著的正相关关系($P<0.05$)。

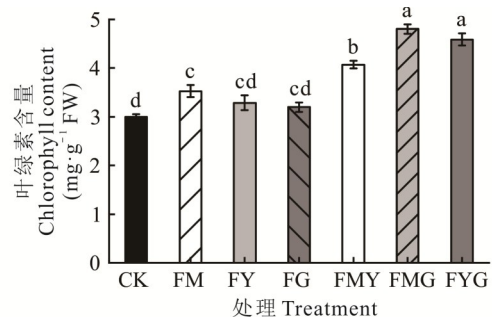


图2 AMF对无芒雀麦叶绿素含量的影响

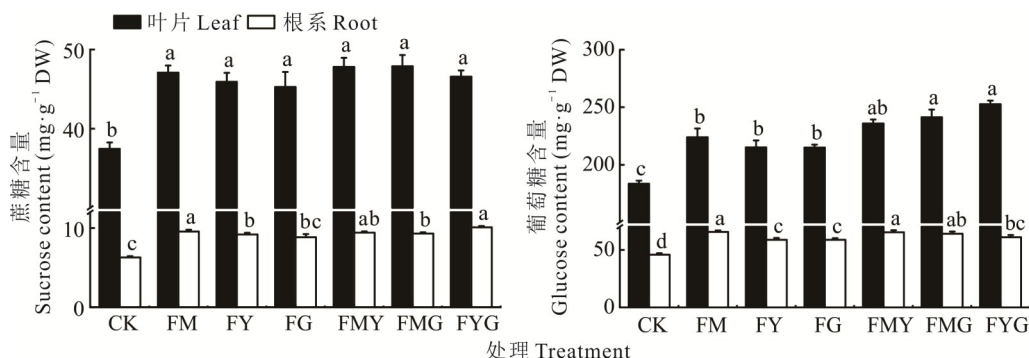
Fig. 2 Effect of AMF on chlorophyll content of *B. inermis*

图3 AMF对无芒雀麦蔗糖含量和葡萄糖含量的影响

Fig. 3 Effect of AMF on sucrose and glucose content of *B. inermis*

2.7 隶属函数综合评价分析

通过根系构型和糖含量等指标对不同处理进行隶属函数综合评价。根据表 3 综合评价 D 值排序结果可知：FMY 处理，即摩西管柄囊霉和异形根孢囊霉的复合接种处理对无芒雀麦的根系构型和糖含量的影响最大，FMG 和 FYG 处理次之。

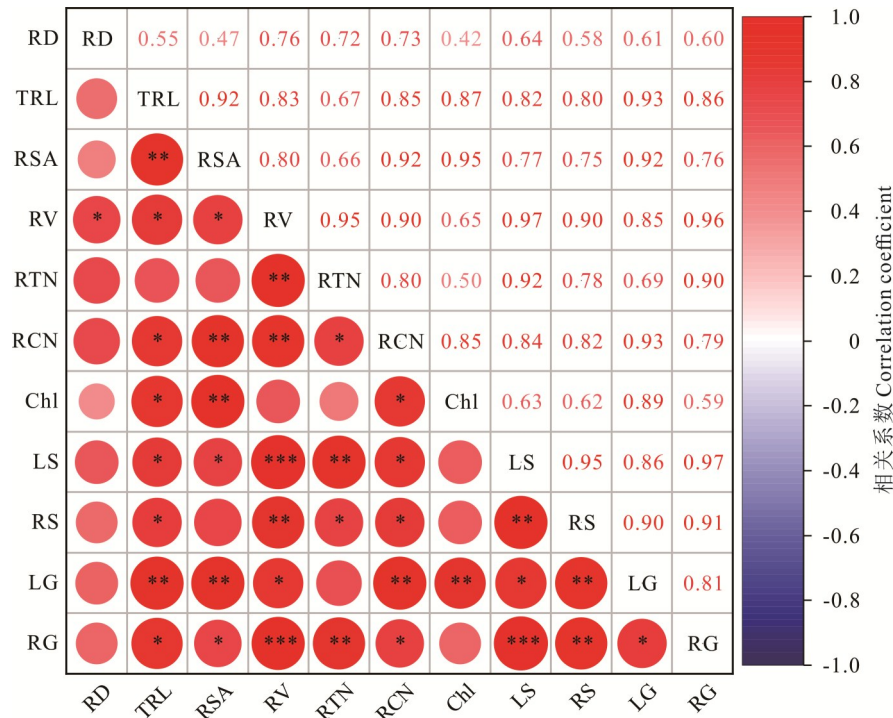


图 4 无芒雀麦植株各指标的相关性分析热图

Fig. 4 Heat map of correlation analysis of various indicators of *B. inermis*

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. RD: 根直径 Root diameter; TRL: 根总长 Total root length; RSA: 根表面积 Root surface area; RV: 根体积 Root volume; RTN: 根尖数 Number of root tips; RCN: 交叉数 Number of root crossings; Chl: 叶绿素 Chlorophyll; LS: 叶片蔗糖 Leaf sucrose; RS: 根系蔗糖 Root sucrose; LG: 叶片葡萄糖 Leaf glucose; RG: 根系葡萄糖 Root glucose.

表 3 隶属函数综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of the subordinate function

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value											D 值 D value	排序 Rank	
	TRL	RSA	RV	RD	RTN	RCN	Chl	LS	RS	LG	RG			
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7
FM	0.83	0.57	0.72	0.22	0.67	0.46	0.29	0.92	0.86	0.58	1.00	0.65	0.65	4
FY	0.25	0.38	0.64	0.33	0.74	0.58	0.16	0.81	0.76	0.46	0.65	0.52	0.52	5
FG	0.43	0.12	0.56	0.66	0.62	0.38	0.11	0.75	0.67	0.45	0.65	0.49	0.49	6
FMY	0.90	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	0.99	0.82	0.76	0.98	0.89	0.89	1
FMG	1.00	1.00	0.80	0.44	0.86	0.88	1.00	1.00	0.79	0.84	0.92	0.87	0.87	2
FYG	0.96	0.91	0.72	0.56	0.51	0.92	0.88	0.87	1.00	1.00	0.76	0.83	0.83	3

TRL: 根总长 Total root length; RSA: 根表面积 Root surface area; RV: 根体积 Root volume; RD: 根直径 Root diameter; RTN: 根尖数 Number of root tips; RCN: 交叉数 Number of root crossings; Chl: 叶绿素 Chlorophyll; LS: 叶片蔗糖 Leaf sucrose; RS: 根系蔗糖 Root sucrose; LG: 叶片葡萄糖 Leaf glucose; RG: 根系葡萄糖 Root glucose.

3 讨论

丛枝菌根真菌(AMF)作为植物土壤根际微生物的一个重要组成部分,通过与根系建立共生关系来调节植物

生理代谢与形态发育,能够显著提升植物对养分的吸收效率及环境适应性^[21]。已有研究表明,接种AMF能够促进植物生长,提高植株株高、茎粗、叶片数、生物量等^[22-23]。接种摩西管柄囊霉能够与大豆(*Glycine max*)根系形成良好的菌根共生体,其侵染率高达89.90%,显著提高大豆产量和籽粒蛋白质含量^[24]。接种异形根孢囊霉显著增加了大豆地上部和根部干重及吸磷量,增加了总根长、根表面积及根体积^[25]。接种根内根孢囊霉后玉米(*Zea mays*)根系侵染率达到76.67%,显著提高了玉米地上部生物量^[26],证明3种AMF均能有效地作用于植物养分吸收。AMF混合接种对宿主植物生长的促进效果,主要取决于特定菌株与植物根系之间的兼容性以及互选机制,因此针对寄生根系筛选适宜的AMF组合尤为重要^[27]。本研究中,接种不同AMF菌株均能侵染无芒雀麦根系,复合接种摩西管柄囊霉和异形根孢囊霉对无芒雀麦根系的侵染率最高,复合接种AMF侵染率和土壤孢子数量均高于单一接种,更好地改善了根总长、根直径等根系指标。可能是因为不同AMF通过功能协同,在宿主植物根系内外形成菌丝网络,共同扩展水分与养分的吸收范围;同时,真菌可激发植物合成内源激素,维持较高根系活力,从而促进其生长与代谢,最终体现为生物量积累,但菌种之间匹配性和土壤环境等对其都有很大影响。与前人研究一致,方静等^[28]通过对青山杨(*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*)复合接种根内根孢囊霉和摩西管柄囊霉,发现其促进了植株地上和地下部的生长,叶宽、叶面积和根系活力有明显改善,在根长、根体积等方面表现出较好的趋势。

植物通过叶绿素捕获光能进行光合作用。叶绿素分子的生物合成依赖于氮和镁等矿质元素,缺少这两种元素就不能正常合成叶绿素^[29]。与AMF共生能改善宿主植物矿质营养状况使得叶绿素含量显著提升,AMF通过其广泛分布的根外菌丝网络,极大地拓展了根系在土壤中的吸收空间与效率,能更有效地活化和吸收水分及矿质养分(如磷、锌,尤其是氮和镁)并供给宿主^[30],为叶绿素的大量合成奠定了坚实的物质基础。本研究中在接种AMF后植株吸收到足够的养分使得无芒雀麦生物量显著增加。同时,叶绿素含量也通过复合接种AMF显著升高。与前人研究结果一致,摩西管柄囊霉和根内根孢囊霉复合接种,红花石蒜(*Lycoris radiata*)的叶绿素相对含量、净光合速率、气孔导度和水分利用率较对照均显著增加^[31]。在40g根内根孢囊霉接种量接种时,促进了麦冬(*Ophiopogon japonicus*)的生长,叶绿素含量也显著增加^[32]。叶绿素作为光合作用的核心,其含量的增加会直接影响光能捕获效率,提高净光合速率。接种不同AMF无芒雀麦的光合利用效率需要进一步研究。

蔗糖和葡萄糖不仅是碳源和能量物质,还可能作为重要的信号分子,参与调控植物的多种生理过程,包括根系发育、养分转运基因的表达以及胁迫响应等^[2],本研究中,复合接种AMF显著提高了无芒雀麦叶片与根系的蔗糖和葡萄糖含量,这可能是植物叶片通过光合作用合成与积累蔗糖,这些蔗糖通过维管系统从“源”(叶片)被运输到各类“库”器官(如根系)。在根系中,一部分蔗糖被水解为葡萄糖,作为根系构建和呼吸代谢的直接能量底物^[3,33],为AMF提供更多碳源,使AMF菌丝网络更发达、活性增强吸收更多养分回报宿主。前人研究表明,白三叶接种AMF,显著提升了其叶绿素含量,叶片和根系的蔗糖和葡萄糖含量也显著增加^[8]。可以推断出通过对植物根系接种AMF,光合作用增加了叶片蔗糖向地下根系的分配,提高植物水分和养分吸收。也有研究表明,接种AMF能够有效提高植物对氮和磷的吸收^[34],因此需要进一步探讨接种AMF对无芒雀麦养分吸收和利用的影响。

4 结论

综上所述,接种丛枝菌根真菌(AMF)能有效侵染无芒雀麦根系,促进其生长发育,改善根系构型。同时,显著提高了无芒雀麦叶绿素含量、叶片和根系中的蔗糖及葡萄糖含量。复合接种效果普遍优于单一接种,其中摩西管柄囊霉与异形根孢囊霉组合在隶属函数综合评价中最佳,表明复合接种能提高无芒雀麦生长和糖含量积累,更好地促进植物对养分的吸收和利用,为提升无芒雀麦的饲用价值和生态适应性提供了重要的理论依据和实践参考。

参考文献 References:

- [1] Zhang X L, Xu J, An T T, *et al.* Relationship between rhizosphere soil properties and yield of maize at different nitrogen levels. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(14): 2687-2699.

- 张学林, 徐钧, 安婷婷, 等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2687—2699.
- [2] Bago B, Pfeffer P E, Shachar-Hill Y. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. *Plant Physiology*, 2000, 124: 949—958.
- [3] Bago B, Pfeffer P E, Abubaker J, *et al.* Carbon export from arbuscular mycorrhizal roots involves the translocation of carbohydrate as well as lipid. *Plant Physiology*, 2003, 131(3): 1496—1507.
- [4] Liu J X, Sun P, Zhao X Y, *et al.* Regulation of antioxidant metabolic pathways in ryegrass by biochar and arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress. *Periodical of Ocean University of China*, 2025, 55(4): 81—89.
刘佳鑫, 孙萍, 赵新月, 等. 盐胁迫下生物炭和丛枝菌根真菌对黑麦草抗氧化代谢路径的调节作用. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 81—89.
- [5] Schellenbaum L, Berta G, Ravolanirina F, *et al.* Influence of endomycorrhizal infection on root morphology in a micropropagated woody plant species (*Vitis vinifera* L.). *Annals of Botany*, 1991, 68(2): 135—141.
- [6] Kan H M, Xu H K, Lu J N, *et al.* The influence of different arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth characteristics of three forage species. *Acta Agraria Sinica*, 2023, 31(7): 1922—1930.
阚海明, 徐恒康, 鲁佳男, 等. 不同丛枝菌根真菌接种对 3 种草地植物生长特性的影响. 草地学报, 2023, 31(7): 1922—1930.
- [7] Guo H, Zhou H, Zhuang J J, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat physiological characteristics and rhizosphere soil enzyme activities under cadmium stress. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(8): 20—27.
郭晖, 周慧, 庄静静, 等. 镉胁迫下丛枝菌根真菌对小麦生理特性和根际土壤酶活性的影响. 河南农业科学, 2022, 51(8): 20—27.
- [8] Wu Q S, Yuan F Y, Fei Y J, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root system architecture and sugar contents of white clover. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 199—204.
吴强盛, 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. 草业学报, 2014, 23(1): 199—204.
- [9] Guo Y E, Li F, Li Y D, *et al.* Progress in the elucidation of the mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in promotion of phosphorus uptake and utilization by plants. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12): 2379—2390.
郭艳娥, 李芳, 李应德, 等. AM 真菌促进植物吸收利用磷元素的机制. 草业科学, 2016, 33(12): 2379—2390.
- [10] Gianinazzi S, Gollotte A, Binet M, *et al.* Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 2010, 20(8): 519—530.
- [11] Qu L L, Guo X F, Jia Z Y, *et al.* Review on the progress of adaptability to abiotic stress adversity by arbuscular mycorrhizal fungi in plants. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2024(1): 4—9.
屈璐璐, 郭秀芳, 贾振宇, 等. 丛枝菌根真菌提高植物非生物逆境胁迫适应性研究进展. 草学, 2024(1): 4—9.
- [12] Zhu W Y. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root characteristics of two maize varieties and cadmium-lead migration in soil. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
朱文雅. 丛枝菌根真菌对 2 个品种玉米根系性状与土壤镉铅迁移的影响. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [13] Hou Y N, Jiang F, Zhou S Y, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi improve physiological metabolism and ameliorate root damage of *Coleus scutellarioides* under cadmium stress. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2025, 41(2): 680—692.
侯亚男, 江帆, 周舒扬, 等. 镉胁迫下丛枝菌根真菌对彩叶草生理代谢和根系损伤的影响. 生物工程学报, 2025, 41(2): 680—692.
- [14] Lu W, Yang X R, Tan Y, *et al.* The influence of AMF on the growth and nutrient absorption of grape cutting seedlings under drought stress. *South China Fruits*, 2022, 51(2): 129—133, 138.
鲁薇, 杨秀蓉, 谭焱, 等. 干旱胁迫下 AMF 对葡萄扦插苗生长及养分吸收的影响. 中国南方果树, 2022, 51(2): 129—133, 138.
- [15] Malamy J E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28: 67—77.
- [16] Luo Y Q, Zhao X Y, Li M X. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3496—3504.
罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3496—3504.
- [17] Zhang X S, Dai L Y, Wang Z J, *et al.* The king of grass feed—smooth bluegrass. *Animal Husbandry in Xinjiang*, 2002(4): 28—29.
张希山, 代连义, 王志杰, 等. 禾草饲料之王—无芒雀麦. 新疆畜牧业, 2002(4): 28—29.
- [18] Wang W, Feng S D, Yang Z X, *et al.* Effects of sludge/soil ratio on the remediation of PAH-contaminated sludge by smooth brome grass. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(2): 148—160.
王伟, 冯圣东, 杨志新, 等. 无芒雀麦—污泥系统中泥/土不同比例对 PAHs 修复效果的影响. 草业学报, 2015, 24(2):

148—160.

- [19] Huang Y D, Zhang S B, Li L, *et al.* Efficient propagation of arbuscular mycorrhizal fungal propagules. *Microbiology China*, 2023, 50(2): 503—513.
黄玉丹, 张淑彬, 李琳, 等. 丛枝菌根真菌繁殖体的高效扩繁. *微生物学通报*, 2023, 50(2): 503—513.
- [20] Vierhrlig H, Coughlan A P, Wyss U. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(12): 5004—5007.
- [21] Wu Q S, Zou Y N, Zhan T T, *et al.* Polyamines participate in mycorrhizal and root development of citrus (*Citrus tangerine*) seedling. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2010, 38: 25—31.
- [22] Zhao J L, He X L. Effects of AM fungi on the growth and drought-resistance of *Artemisia ordosica*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(5): 184—188.
赵金莉, 贺学礼. AM真菌对油蒿生长和抗旱性的影响. *华北农学报*, 2007, 22(5): 184—188.
- [23] Huang W J. Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on the morphology and physiology of *Rosa rugosa* 'Feng Hua'. Changsha: Agricultural University of Hunan, 2022.
黄文镜. 接种丛枝菌根真菌对'丰花'玫瑰的形态与生理的影响. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [24] Feng Y H, Gao X, Song C W, *et al.* Effects of inoculation with *Funneliformis mosseae* on net photosynthetic rate, yield and quality of soybean. *Soybean Science*, 2020, 39(6): 926—931.
冯宇涵, 高翔, 宋丛威, 等. 接种摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)对大豆净光合速率及产量和品质的影响. *大豆科学*, 2020, 39(6): 926—931.
- [25] Huang H Z, Liu Y, Chen A, *et al.* Inoculating arbuscular mycorrhizal fungi promotes the growth and phosphorus uptake of phosphorus-efficient soybean genotype. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(12): 2354—2365.
黄活志, 刘洋, 陈阿, 等. 接种丛枝菌根真菌促进磷高效基因型大豆生长和磷吸收. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(12): 2354—2365.
- [26] Bi N, Guo W, Guo J Y, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Rhizophagus intraradices*) on the maize growth in the three types of coal mine spoil soil. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(2): 194—199.
毕娜, 郭伟, 郭江源, 等. 丛枝菌根真菌(*Rhizophagus intraradices*)对玉米在3种煤矸石中生长的影响. *安全与环境学报*, 2016, 16(2): 194—199.
- [27] Koch A M, Antunes P M, Maherali H, *et al.* Evolutionary asymmetry in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: Conservatism in fungal morphology does not predict host plant growth. *The New Phytologist*, 2017, 214(3): 1330—1337.
- [28] Fang J, Wu S, Meng S J, *et al.* Effects of complex inoculation with two species arbuscular effects of complex inoculation with two species *Arbuscular pseudo-cathayana*×*P. deltooides*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(4): 17—22.
方静, 武帅, 孟昭军, 等. 两种丛枝菌根真菌复合接种对青山杨生长生理指标的影响. *东北林业大学学报*, 2024, 52(4): 17—22.
- [29] Wang P R, Zhang F T, Gao J X, *et al.* An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 629—636.
王平荣, 张帆涛, 高家旭, 等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 629—636.
- [30] Shi Y Y, Lv L X, Tuo D F. Effects of AMF and PGPR on growth and nutrient absorption of *Matthiola incana* under low temperature and weak light stress. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2025, 37(8): 1694—1705.
师阳阳, 吕丽霞, 脱登峰. 低温弱光胁迫下AMF和PGPR对紫罗兰生长及营养吸收的影响. *浙江农业学报*, 2025, 37(8): 1694—1705.
- [31] Wen T, You X, Wu J, *et al.* Effects of two AMF combinations on leaf growth and photosynthetic efficiency of *Lycoris radiata*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(6): 1436—1444.
温婷, 游欣, 吴靖, 等. 两种AMF组合对石蒜叶生长及光合效能的影响. *江西农业大学学报*, 2024, 46(6): 1436—1444.
- [32] Zhao L, Wang L. Effects of different AMF inoculations on root activity and growth characteristics of *Ophiopogon japonicus* seedlings. *Northern Horticulture*, 2024(9): 41—46.
赵乐, 王雷. 不同丛枝菌根真菌(AMF)接种量对麦冬幼苗根系活力及生长特性的影响. *北方园艺*, 2024(9): 41—46.
- [33] Wang Y T. The effect of strip intercropping on soybean morphology and distribution of photosynthetic assimilates. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2024.
王雨婷. 带状间作对大豆形态及光合同化物分配的影响. 成都: 四川农业大学, 2024.
- [34] Zhu J X, Lei M, Huang Z J, *et al.* Effects of different types of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on nitrogen and phosphorus nutrient uptake and losses of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(17): 1—12.
祝嘉新, 雷梅, 黄智军, 等. 不同种类丛枝菌根真菌接种对杉木幼苗氮磷养分吸收和流失的影响. *生态学报*, 2025, 45(17): 1—12.