



AM 真菌对紫花苜蓿细根生长及其生物量动态特征的影响

任爱天¹,娜丽克斯·外里¹,鲁为华^{1*},杨洁晶¹,马春晖¹,刘红玲²

(石河子大学 动物科技学院,新疆石河子 832003;2 石河子大学 师范学院,新疆石河子 832003)

摘要:细根对植物功能的发挥和土壤碳库及全球碳循环具有重要意义。采用容器法和微根管法于2013年6~10月整个生长季内对紫花苜蓿的细根生物量、生产以及周转规律进行研究。结果表明:(1)紫花苜蓿活细根现存生物量平均值以接种摩西球囊霉(Gm)处理最高($12.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),未接种对照最低($7.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),并且活细根现存量在9月中旬达到峰值;死细根现存生物量呈先增加后降低再增加的变化趋势,在整个生长过程中未接种处理高于接种处理,接种根内球囊霉(Gi)处理死细根现存平均生物量($3.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)又较接种组其他处理低。(2)苜蓿植株细根生长量以接种幼球囊霉(Ge)处理最大($0.045 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),接种Gm处理和未接种对照最低(均为 $0.027 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);而未接菌植株细根死亡量($0.044 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)显著高于接种植株,接种组又以Gi处理最低($0.021 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。(3)紫花苜蓿在生长季节内细根生产和死亡的高峰分别出现在8月底和10月份,低谷出现在9月底到10月中旬和6月底到8月;接种地表球囊霉(Gv)后细根现存量和年生长量显著高于对照和接种其他菌种处理,细根的周转以对照组最大,而接种Gv和Gm处理较低。研究发现,通过接种丛植菌根真菌可以提高苜蓿细根生物量,降低细根的死亡,增加细根寿命。

关键词:菌根真菌;苜蓿;生物量;细根;微根管;周转

中图分类号:Q948.12

文献标志码:A

Effect of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Dynamic Characteristics of Fine Root Growth and Biomass of Alfalfa

REN Aitian¹, NARKES Waly¹, LU Weihua^{1*}, YANG Jiejing¹, MA Chunhui¹, LIU Hongling²

(College of Animal Science & Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Teachers College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Fine roots played a significant role in exerting the plant functions, soil carbon pool and global carbon recycling. We observed biomass, production and turnover of the fine roots of alfalfa by container method and minirhizotron in the whole growing season that was ranged from June to October in 2013. The result showed that: (1) The inoculated Glomus mosseae (Gm) had the highest mean biomass ($12.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), the control group had the lowest mean biomass ($7.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). The live fine root biomass peaked in mid September, but the dead showed a tendency of increasing first and then declining, and then increasing. In the whole growing process, the dead fine root biomass of non-inoculated was higher than that with inoculated treatment, and inoculated Glomus intraradices (Gi) showed the lowest biomass of dead fine root ($3.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$).

收稿日期:2014-05-20;修改稿收到日期:2014-11-24

基金项目:兵团博士资金专项(2012BB017);国家牧草产业技术体系项目(CARS-35);石河子大学高层次人才引进项目(RCZX201022);石河子大学科技服务项目(4004103)

作者简介:任爱天(1989—),男,在读硕士研究生,主要从事人工草地高产栽培研究。E-mail:aitianren@163.com

*通信作者:鲁为华,博士,副教授,主要从事草地资源与生态研究。E-mail:winnerlwh@sina.com

m^{-2}). (2) Inoculated *Glomus etunicatum* (Ge) had the highest fine root production ($0.045 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), Gm and control group had the lowest ($0.027 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). However, fine root mortality of non-inoculated treatment ($0.044 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) was significantly higher than that with inoculated treatments, and Gi had the lowest fine root mortality ($0.021 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). (3) Production and mortality peaks of fine roots appeared at the end of August and October, but trough came in at the end of September to mid October and the end of June to August during the growing reason. The average fine root length and annual length production of *Glomus versiforme* (Gv) was significantly higher than that of control and other inoculated treatments. Control treatment had the highest fine root turnover, Gv and Gm were the lowest. Inoculating with arbuscular mycorrhizal fungi could improve fine root biomass, reduce mortality and increase the lifespan of alfalfa.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; alfalfa; biomass; fine root; minirhizotron; turnover

细根通常是指直径小于 2 mm 的根^[1],但因具有巨大的吸收表面积,是植物吸收、运输、储存碳水化合物和营养物质以及合成一系列有机化合物的重要器官,同时还通过呼吸和周转消耗光合产物向土壤输送有机质。但是细根的功能受到生物与非生物的影响很大,特别是土壤微生物活动^[2]。其中,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)作为土壤中普遍存在的一种微生物,与植物细根的共生提高了宿主水分和养分的吸收以及促进宿主的生长^[3],并且菌根的侵染进一步增加了细根的吸收面积,促进其生长发育,促使细根在植物功能和生态系统能量流动和物质循环中发挥更大的作用^[4]。许多研究表明,菌根化可以影响宿主植物根系寿命^[5],而且菌根侵染能诱导植物根系形态发生明显的变化,可以促使植物根系高度分枝,导致根系更高级次根以及细根的形成^[2,6]。同时,菌丝在植物根系表面产生菌丝鞘,可以对细根起到很好地保护作用,其产生的化学物质可以抵御病原菌的侵害,增加植物抗旱性^[7],减少土栖动物因采食对细根的破坏^[8]、增强细根的抗性。研究还发现接种菌根后,菌根影响了碳向细根的分配,同时影响植物根系获得养分的速率,提高植物对土壤有毒有害元素的耐受性,从而延长了根系的寿命,降低植物根系的死亡和周转速率。目前,许多研究主要集中在土壤因子以及气候因子对植物根系生长和死亡动态的影响方面^[9-10],而有关对植物接种菌根真菌后对细根周转的影响则报道较少。

紫花苜蓿作为多年生作物,具有庞大的根系,而大量的侧根被菌根侵染后又进一步增强了苜蓿的耐逆性,将对其地上部分的生长产生很大的影响。目前对于紫花苜蓿的研究主要集中在地上部分,而对于地下部分尤其是细根生产及周转的研究较少。微根管技术作为一种非破坏性野外观察细根动态的方

法,已被广泛用来研究细根的生长和死亡动态,并估计细根周转^[11],为此以苜蓿地为研究对象,运用微根管技术研究苜蓿接种不同丛枝菌根真菌后不同时间细根的生长与死亡动态变化,并估计苜蓿细根周转特征,为生物菌剂(AM 真菌)的合理开发利用以及细根在绿洲区农业生态系统中碳平衡、养分循环中的重要作用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试植物与菌种

供试菌种为青岛农业大学提供的摩西球囊霉(*Glomus mosseae*,简称 Gm)、根内球囊霉(*Glomus intraradices*,简称 Gi)、幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*,简称 Ge)、地表球囊霉(*Glomus versiforme*,简称 Gv)、混合菌种(*Glomus mosseae*、*Glomus intraradices*、*Glomus etunicatum*、*Glomus cladoideum*、*Glomus microaggregatum*、*Glomus caledonicum*,简称 6G)。供试的宿主植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种‘三得利’,种子由百绿集团提供,且种子进行了包衣处理。

1.2 试验地概况

试验在石河子大学试验站(44°18'N, 86°03'E)牧草试验地进行,海拔 399.2 m,年日照时数为 2 721~2 818 h,无霜期为 168~171 d,≥0 °C 的活动积温为 4 100 °C,≥10 °C 的活动积温为 3650 °C,年平均气温为 6.9 °C,年降水量为 125.0~207.7 mm。土壤质地为壤土,含有机质 18.39 g·kg⁻¹,pH 为 7.79,碱解氮 75.3 mg·kg⁻¹,速效磷 5.27 mg·kg⁻¹,速效钾 194.6 mg·kg⁻¹。

1.3 研究内容及方法

1.3.1 试验设计 试验设置 6 个接种处理,分别为 Gm、Gi、Ge、Gv、6G 和不接种菌剂(以下简称 CK)。每个处理 28 个重复。采用 14 cm×14 cm×25 cm

(盆口直径×盆底直径×高)规格的黑色塑料盆,盆体在84消毒液里浸泡20 min后备用。种植时每盆装1.5 kg灭菌土,接种处理组每盆层施菌剂10 g,对照组添加同等质量的灭菌菌剂,接种物为含有孢子、菌丝的沙土及其寄主植物的根段混合物。

挑选大小一致且籽粒饱满的种子,用10% H₂O₂对种子进行表面消毒10 min,再以蒸馏水冲洗多次后于恒温培养箱25 ℃催芽。将发芽的种子均匀地播在每盆土壤中,每盆20粒,待幼苗生长7 d后间苗,每盆留10株长势一致并且茁壮的幼苗。接种50 d后,将塑料盆移至室外,植物在生长期间定时定量浇水,称重法将土壤湿度控制在田间持水量的65%~75%,在生长期间定期定量施加Hoagland营养液,观察不同月份侵染率和细根生物量的动态变化。试验从2013年6月1日开始到10月15日结束。

1.3.2 容器法测定细根生物量 植物的细根生物量以每盆总量为单位进行测定。将采集的土样带回实验室,置于细筛之上用水冲洗,去除其他杂质,由于盆栽有一定的局限性,使得粗根的生物量较少,因此仅留直径小于2 mm(误差≤0.1 mm)的细根,在5% TTC(红四氮唑)染色基础上,同时依据根的外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度等区分死活细根,将挑出的细根放置在80 ℃烘箱中烘干至恒重后称重。

1.3.3 微根管法测定细根生长特征 在石河子大学牧草试验地共设18块1.5 m×3 m的样地。在每块样地安装1根微根管(长为100 cm,内径6.4 cm),微根管安装成45°角,垂直深度45 cm左右,露出地面10 cm,每个管外露出地面部分先封一层黑色胶带,用黑色塑料盖封口。试验共设6个处理,每个处理3次重复,共安装18支管。于2013年6月1日进行已经接过菌种的苜蓿移栽,行距20 cm,每2周灌溉1次。从2013年6月到2013年11月,每隔2周用CI-600(美国)对同一位置的根系生长过程进行影像收集,每次影像收集工作在1~2 d内完成,图片实际尺寸为21.59 cm×19.56 cm(长×宽),将影像带回实验室进行数据处理。

用WinRHIZO TRON MF 2007b软件对每个影像进行根系直径、长度、根表面积等数据测定,区分根系类型(如活根与死根,根系的消失与否等)。观测窗中的根如果每次观测均为白色,则定义为白根(活根);当细根完全变成黑色、皮层脱落或出现明显褶皱以及消失时,则被定义为死根^[11]。在图片处

理过程中,依据菌种、样地号、微根管号、图框位置、取样时间和细根编号建立细根数据库,以方便数据分析。微根管能够连续观测细根长度的变化,本试验以根长密度(RLD)作为观测指标,以RLD_P和RLD_M来分别表示细根生长量和细根死亡量。细根生长量指取样间隔期内出现的新根的根长,以及老根伸长生长的增加量;细根死亡量则包括原有根的死亡量和食根动物取食导致原有根长的减少量。细根生长量、死亡量的计算采用文献[12]的方法,细根周转估计采用年细根生长量与年细根平均现存量之比。

1.3.4 丛枝菌根真菌侵染率和根瘤数测定 采用盆栽法测定。选取1株根系统计根部着生的根瘤数,同时将根样用自来水清洗干净后,选取0.2 g新生根系(直径<1 mm),剪成0.5~1 cm小段,放入FAA固定液中,之后酸性品红染色,按照根段频率常规法计算侵染率^[13]。

1.4 数据处理

对于获得的微根管数据用Excel软件整理,并进行作图。采用方差分析方法分析接种不同菌种处理之间细根生长差异和死亡差异,所有统计处理均采用SPSS软件完成。

2 结果与分析

2.1 AM处理对紫花苜蓿菌根侵染率和根瘤菌数量的动态变化特征

紫花苜蓿菌根侵染率和根瘤菌数在不同的月份发生了显著变化(图1)。首先,苜蓿菌根侵染率在7~9月份随着接种时间的延长而逐渐增加。其中,对照处理植株没检测到菌根侵染;接种植株菌根侵染率在9月中旬达到最大(45.8%~72.2%)并显著高于其他时期($P<0.05$),随后下降,在10月中旬降至25.3%~36.6%;同时,不同菌种的侵染效果不同,其中接种Ge和Gm处理的菌根侵染率比其他菌种侵染率高(图1,A)。

其次,苜蓿根瘤菌数在7月中旬到8月初变化幅度不大,各时期差异均不显著;此后开始迅速上升,并于9月初达到最大,此时根瘤菌数显著高于其他时期,每株达到(11.33~18.33)个;直到10月中旬,除接种Ge处理下根瘤菌数降幅较大($P<0.05$)外,其余接种处理下降幅不大且差异不显著($P>0.05$);对照植株根瘤数量较接种植株低,但差异不显著($P>0.05$),而且在9月中旬下降到每株(8.80)个,此后又开始上升(图1,B)。以上结果说

明在苜蓿整个生长期,随着时间变化其菌根侵染率和根瘤菌数发生明显变化,菌根侵染率在9月中旬达到最大值,而根瘤菌数则在9月初达到最大。同时,接种不同的菌种后菌根侵染率和根瘤菌数也出现了差异,其中接种Ge和Gm处理菌根侵染率最高,而接种Gm、Gv和Gi处理根瘤菌数最高。

2.2 接种菌根真菌紫花苜蓿的活细根和死细根现存生物量动态变化特征

接种不同的菌根真菌苜蓿细根现存量存在着明显变化(图2)。其中,菌根处理的苜蓿植株活细根平均现存生物量均高于未接种对照(图2,A),并以接种Gm处理植株细根现存生物量平均值最高($12.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),其次为接种6G和Gi处理(分别为 10.41 和 $10.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),而对照植株最低($7.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。同时,苜蓿活细根现存量在7~9月份有

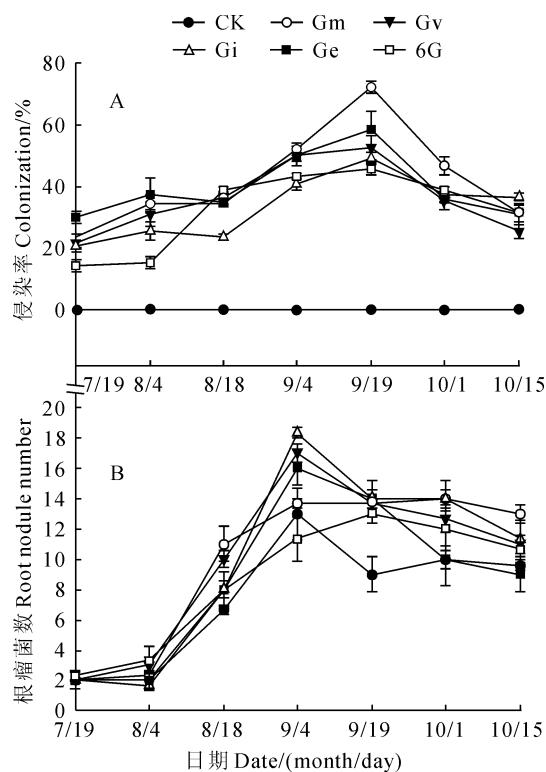


图1 AM 处理对不同时期紫花苜蓿菌根侵染率和根瘤菌数量的影响

CK. 对照;Gm. 摩西球囊霉;Gi. 根内球囊霉;Ge. 幼套球囊霉;
Gv. 地表球囊霉;6G. 混合菌种;下同

Fig. 1 Effect of the arbuscular mycorrhizal fungi on mycorrhizal infection rate and root nodule numbers of alfalfa

CK. Control;Gm. *Glomus mosseae*;Gi. *Glomus intraradices*;
Ge. *Glomus etunicatum*;Gv. *Glomus versiforme*;6G. Mixed strains with *Glomus mosseae*, *Glomus intraradices*, *Glomus etunicatum*, *Glomus cladoideum*, *Glomus microaggregatum*, *Glomus caledonium*;The same as below

不断上升趋势,并在9月中旬达到最高值,但与其他月份差异不显著($P > 0.05$);此后开始下降,在10月中旬下降到 $10.56 \sim 6.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。另外,苜蓿活细根现存量在7月中旬到8月初和9月初到9月中旬有明显增加,说明在这2个时期有大量细根发生。

苜蓿植株死细根生物量呈现先增加后降低再增加的趋势(图2,B)。其中,各接种处理苜蓿植株死细根现存生物量先在8月中旬达到最大,后在9月中旬下降为 $2.56 \sim 3.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,并以接种Ge组细根死亡生物量最低;此后死细根现存生物量又增加,并以接种Gi和Ge处理增加趋势较缓,而对照处理和接种Gm处理增加迅速,说明此阶段由于气温下降大量细根死亡,且接种Gi和Ge苜蓿细根死亡量较低;在整个生长过程中,紫花苜蓿植株未接种处理死细根现存生物量平均值为 $4.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,高于接种处理但差异不显著($P > 0.05$),而接种处理组中又以接种Gi死细根现存平均生物量($3.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)最低。可见,接种不同菌根真菌都能明显促进紫花苜蓿细根的生长,延长其存活时间,并以接种Gm效果较佳,同时,随着时间的变化,苜蓿活细根生物量呈先增加后降低的趋势,死细根生物量呈逐渐增加的趋势,在生长末期达到最大。

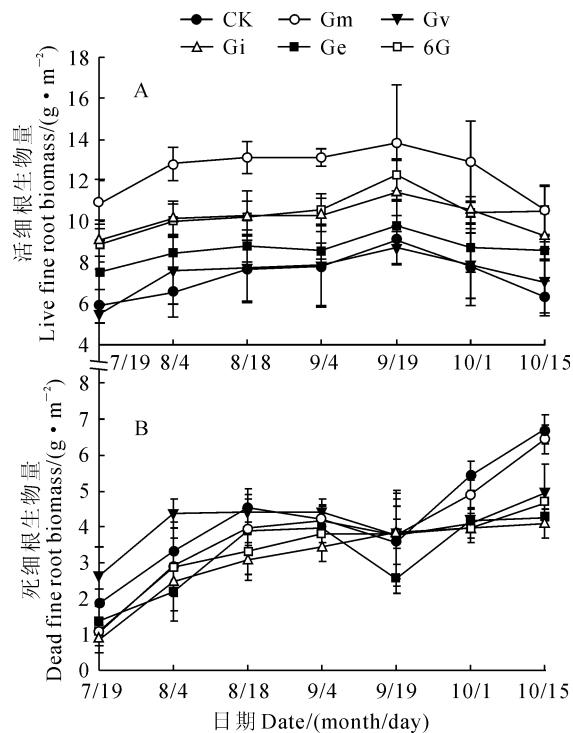


图2 AM 处理对紫花苜蓿活细根和死细根现存生物量的影响

Fig. 2 Effect of the arbuscular mycorrhizal fungi on live fine root and dead fine root biomass of alfalfa

2.3 接种菌根真菌紫花苜蓿细根的生长和死亡动态特征

野外微根管法测定的紫花苜蓿细根的生长(以根长生长量 RLD_p 表示)因不同的菌根真菌和季节表现出一定的差异(图3)。在整个生长期,接种 Ge 紫花苜蓿细根 RLD_p 最大($0.045 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),以未接种最低($0.027 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。其中,接种 Ge 紫花苜蓿细根 RLD_p 在 8 月 6 日~9 月 6 日达到最大,在 9 月 24 日~10 月 10 日达到最低,但在不同月份差异不显著($P>0.05$);接种 Gi 后,苜蓿细根的 RLD_p 在 8 月 22 日~9 月 6 日达到最大($0.048 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),并显著高于其他月份($P<0.05$),于 8 月 6 日~8 月 22 日最低($0.017 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);接种 Gm 菌植株细根 RLD_p 在 7 月 19 日~8 月 22 日显著低于其他月份($P<0.05$);接种 Gv 和 6G 苜蓿细根 RLD_p 分别在 8 月

22 日~9 月 6 日和 8 月 6 日~8 月 22 日达到最大,但均在 6 月 25 日~7 月 19 日达到最低;没接种菌种植株细根生长在不同季节差异不显著。另外,相关性分析发现紫花苜蓿菌根侵染率与其细根 RLD_p 存在显著线性相关性($P<0.05$),而且根瘤菌数也显著地影响苜蓿细根 RLD_p (图 4)。

同时,野外微根管法测定的紫花苜蓿细根的死亡(以根长死亡量 RLD_M 表示)动态与上述 RLD_p 表现相似,其因不同时间及不同菌种表现一定的差异(图 5)。总体上,未接菌苜蓿植株细根 RLD_M 平均为 $0.011 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于各接种植株($P<0.05$);在各接种植株中,又以接种 Gm 处理最低,其 RLD_M 平均为 $0.002 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中,未接菌对照植株细根 RLD_M 在不同时间段之间差异显著,其在 9 月 24 日~10 月 10 日达到最大并显著高于其他时期($P<0.05$),于 6 月 15 日~7 月 19

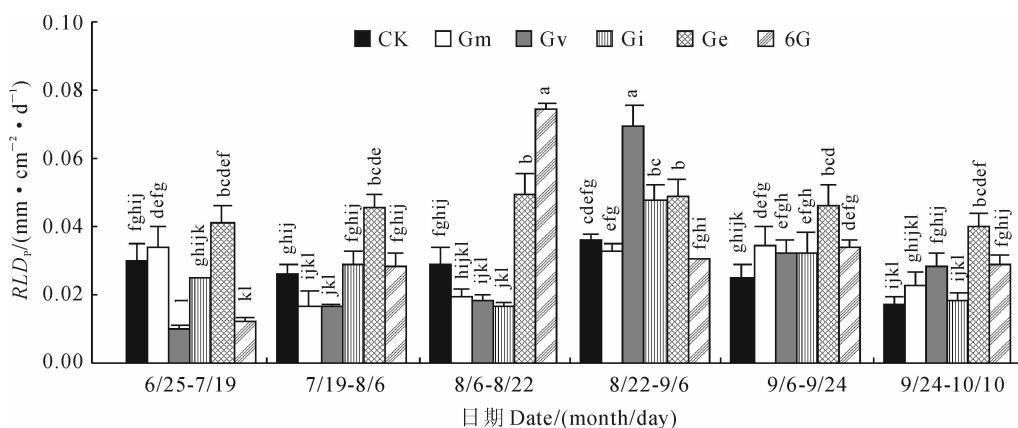


图 3 AM 处理对紫花苜蓿细根长生长量 (RLD_p) 的影响

不同字母表示不同处理在不同期间在 0.05 水平上存在显著差异($P<0.05$);下同

Fig. 3 Effect of the arbuscular mycorrhizal fungi on fine root length production (RLD_p) of alfalfa

Different letters indicated the significant difference between different treatments among different dates at 0.05 level; The same as below

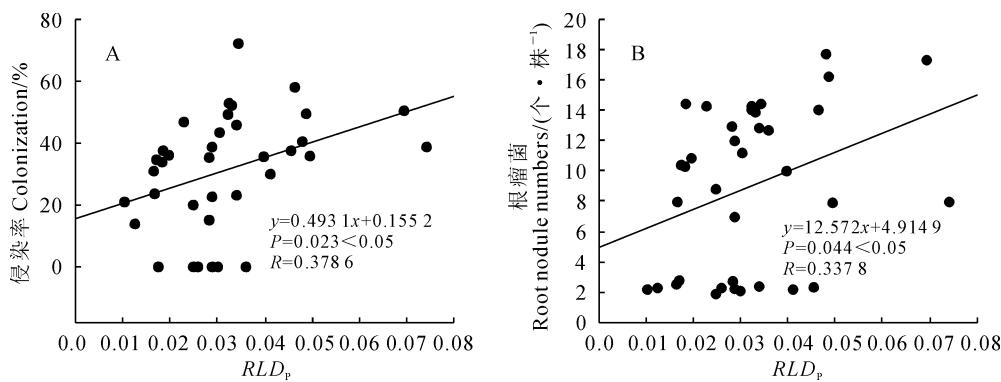
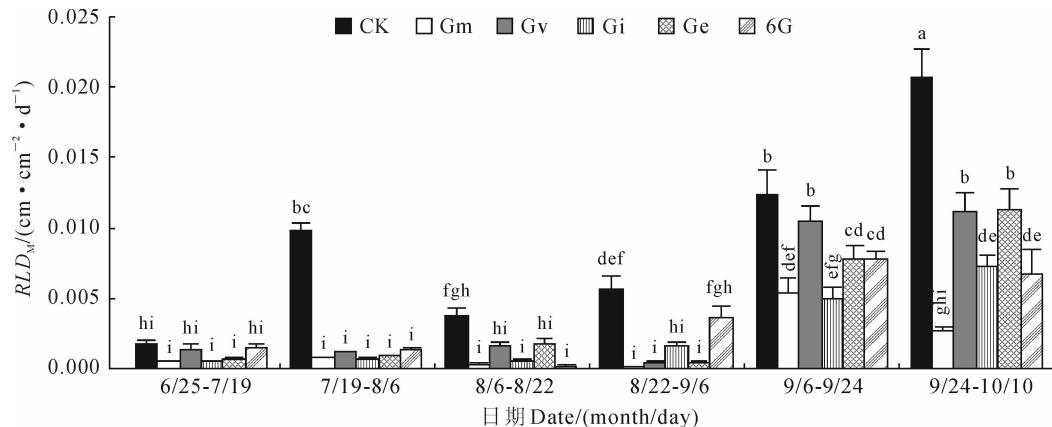


图 4 紫花苜蓿 RLD_p 与 AM 处理菌根侵染率和根瘤菌数的相关性分析

Fig. 4 Correlation coefficients of fine root length production with the mycorrhizal infection rate and root nodule numbers of alfalfa

图 5 AM 处理对紫花苜蓿细根长死亡量(RLD_M)的影响Fig. 5 Effect of the arbuscular mycorrhizal fungi on fine root length mortality (RLD_M) of alfalfa

日达到最低水平;接种 Ge 和 Gi 植株细根 RLD_M 均在 9 月 24 日~10 月 10 日达到最大并显著高于其他时间($P<0.05$),但其在 6 月中旬到 9 月初之间差异不显著($P>0.05$);接种 Gm 植株细根 RLD_M 在 9 月 6 日~9 月 24 日间显著高于其他时间($P<0.05$);接种 Gv 和 6G 植株细根 RLD_M 均在 9 月初到 10 月中旬间显著高于其他时期($P<0.05$),它们分别在 7 月 19 日~8 月 6 日和 8 月 6 日~8 月 22 日达到最低水平。

2.4 接种菌根真菌紫花苜蓿细根的年生长量、现存量和周转特征

野外微根管法测定的紫花苜蓿接种不同菌根真菌后细根现存量、年生长量和周转有显著的差异(表 1)。其中,接种 Gv 后细根现存量显著高于对照和接种其他菌种,并以对照最低($0.004 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。接种不同菌种紫花苜蓿细根的年生长量之间存在差异,并以接种 Gv 菌种年生长量最高并显著

高于对照和接种 Gm 菌种处理,而接种 Gm 菌种处理年生长量最低。由于接种不同菌种的苜蓿细根平均现存量和年生长量不同,也导致它们的细根周转次数也存在差别,其中对照组细根周转次数最大(2.25 次),接种 Gv 和 Gm 后细根的周转次数较低,分别只有 1.25 次和 1.00 次。

3 讨 论

目前对细根生物量和周转的研究方法很多,本试验选择容器法和微根管法研究了接种不同菌根真菌和在不同接种时间内紫花苜蓿细根生物量动态变化以及细根生长、死亡动态变化。由于容器法得到的仅是在生长季节内定时测定的结果,对活细根生长、死细根的分解等测定不准确,而微根管技术由于可以连续观测,能够准确地反映细根生长、衰老、死亡甚至分解的整个动态过程,因此用微根管进行细根周转的估计。

本研究中紫花苜蓿细根现存生物量在不同时期发生着明显动态变化。不同时期苜蓿细根生物量变化与细根发育和死亡规律、细根分解速率以及环境条件和土壤微生物的种类和活性有密切关系^[14]。苜蓿在生长季节内根系发生是不均匀的,一般一年之中细根的生物量出现 1 或 2 个峰值,本研究中苜蓿细根生物量呈现单峰型,并在 8~9 月间苜蓿活细根生物量达到最大,可能是在 6 月份对苜蓿进行移栽后,至 8~9 月间植株受到外界环境温度和良好菌根的侵染,接瘤能力增加,促进了根系对养分以及水分的吸收,加大了地上部分光合作用,使更高的碳水化合物分配到了根中,使得细根的生物量积累受到一定程度地促进,从而出现了峰值^[15-16]。本研究结果显示苜蓿细根大量发生后,随之产生大量细根的

表 1 AM 处理下紫花苜蓿细根平均长度、年长度生长量和周转量

Table 1 Average fine root length, annual length production and turnover of alfalfa in different AM treatments

接种处理 AMF treatment	现存量 Average length $/(\text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	年生长量 Annual length production $/(\text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	年周转量 Annual turnover times
Ge	0.007 ± 0.001 4b	0.012 ± 0.001 7ab	1.71
Gi	0.008 ± 0.001 1ab	0.014 ± 0.002 0a	1.75
Gm	0.005 ± 0.000 5b	0.005 ± 0.000 5c	1.00
Gv	0.012 ± 0.001 7a	0.015 ± 0.002 0a	1.25
6G	0.007 ± 0.002 0b	0.011 ± 0.001 7ab	1.57
CK	0.004 ± 0.000 8b	0.009 ± 0.001 5bc	2.25

注:同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters are significantly different at 0.05 level.

死亡,生长季末死亡细根生物量往往是最高的^[14],可能在10月份由于苜蓿地上部分开始枯黄、死亡以及昼夜气温开始迅速下降,细根开始停止生长,导致菌根侵染率的降低和根瘤数量减少,以及土壤有效养分等因素造成了死细根现存生物量的增加^[16]。接种不同菌根真菌对细根现存生物量也存在着一定的影响。如枳实生苗接种Gm后可以显著地提高细根生物量^[2]。本研究也发现接种Gm和Gi后能显著地提高苜蓿细根现存生物量,说明接种的Gm和Gi菌根真菌能与苜蓿形成良好的互惠共生。

许多研究表明细根的生产和死亡受季节影响很大。如运用微根管技术对美国北方硬阔叶林木细根研究发现,细根的产生量在春末和夏初最多、秋季最少,而细根的死亡量在夏末和秋季达到峰值^[17];班克松和黑云杉细根的生产高峰主要出现在夏季,死亡峰值则出现在秋季^[18]。本研究结果表明,接种不同菌种紫花苜蓿细根的生产在8~9月份最多,6和10月份最少,而且在8月底到9月初达到峰值,同时由于在6月进行移栽,因此在春季没有出现峰值。由于不同植物种的根系都有其自身的生命周期和生长过程,同时随着水热条件的变化,细根出生和死亡就存在一定的季节规律^[18-19]。在6~7月份苜蓿处于建植初期,苜蓿幼苗开始生长,为满足叶和嫩枝的发育,需要提供大量的养分和水分,这就要迫使植物持有较高的生物量才能满足植株生长需求^[20]。因此,在此阶段除了接种Gv和6G植株外,其他接种处理细根生产量均较高。到8月底到9月份,随着菌根侵染率以及接瘤能力增加,虽然较高的土壤温度导致细根维持消耗增加,但是细根通过菌根侵染增加矿物元素和水的吸收,而且此时期植物处于生长旺盛时期,促进光合产物的运输和分配^[21],这一时期细根可以获得大量碳水化合物的供应。本研究相关性分析发现菌根侵染率和根瘤菌数与苜蓿细根生产呈显著正相关,接种菌根真菌促进植物细根生产。同时苜蓿为了构建根系的消耗可能远远超过维持消耗,但为了获得最大的投入产出比,延长了细根寿命^[19,21]。在9月底到10月中旬,可能是气温的降低,不利于菌根生长发育和功能的发挥,同时细根获得的碳水化合物量减少,细根生产下降,已有研究发现温度(大气温度和土壤温度)是影响细根生产最重要的环境因子,大气温度变化直接影响光合产物的合成^[22]。本研究发现在整个生长阶段内,接种处理细根的生长均高于未接种处理,说明接种菌根真菌促进苜蓿侧根的大量发生,同时接种后能很好地

提高苜蓿根系的耐受性和抗性,降低细根的死亡,延长了根系寿命。

细根的死亡是一个复杂的生理生态过程,在生理学上解释为细根的死亡与光合产物分配到根系多少有关^[23]。本研究中苜蓿细根死亡在6月底到8月份变化不大,并且比例相对较低;7月中旬到8月初,对照组细根死亡显著增加,虽然土壤资源的有效性(如温度、养分和水分)最适宜细根生理活动,但是光合产物分配的格局发生改变(主要分配到地上部分)^[10],细根死亡主要是地上部分和地下部分竞争碳源的结果^[20];在9月到10月份细根大量死亡与落叶和温度降低有关,叶子的衰老和凋落减少了细根碳水化合物的分配^[22],同时随着侵染率的下降,菌根真菌对养分和水分的吸收减弱,菌根真菌的促生效应降低。有资料显示,细根吸收水分和养分越多,分配到细根的碳也就越多,其寿命也就越长。一旦细根吸收能力减弱,碳向细根分配立刻减少,细根则衰老进而死亡^[24],在整个生长时期对照组苜蓿细根死亡显著地高于接种组,而且以接种Gm菌种后细根死亡最低。许多研究也证实了接种菌根真菌后能够提高植物对营养元素的吸收效率,增加植物的抗旱性,同时能够有效保护根系免受病原菌的侵害和土栖动物的破坏,进而降低了细根的死亡^[7-8]。

细根周转是碳和养分归还土壤的主要途径。微根管是一种非破坏性观察细根动态的方法,目前已广泛地应用于农作物、草地、沙漠植物、果园和森林等人工或自然植物群落的细根动态研究^[10]。它最大的优点是在不干扰细根生长过程的前提下,能对同一细根的出现、生长、衰老、死亡和消失进行连续观察,因此能准确估计细根周转^[25]。细根周转量计算是用细根年生长量除以细根平均现存量得到的^[26],估计细根周转可采用生物量指标或长度指标,采用生物量指标必须根据比根长数反推得到细根生物量(需要用土钻法得到细根生物量数据),本研究是根据细根长度估计细根周转的。本研究发现接种不同菌种后紫花苜蓿细根周转率降低,细根寿命延长。许多研究也发现共生微生物在增加细根生命周期方面起着重要作用,特别是菌根真菌能增加细根生命周期^[2,27]。如菌根真菌通过分泌化学物质和物理阻隔以保护细根不受病菌的侵害,提高植物对有毒物质的抗性,从而延长细根生命周期^[28]。未接种处理细根周转较高,说明植物为了维持生命活动,不断产生新的细根以替代旧的细根来吸收水分和营养物质,提高利用效率^[29]。同时,保持较高的

细根周转率可以以较低现存细根生物量满足植物旺盛的生命活动对水分和营养物质的需求,这是植物降低能耗的一种适应方式^[30]。

综上所述,本研究结果表明:(1)紫花苜蓿各菌根侵染率和根瘤菌数均在9月份达到最大,分别为45.8%~72.2%和11.33~18.33个,此后均开始下降;不同的菌种其侵染效果不同,接种Ge和Gm后菌根侵染率比其他菌种侵染率高。(2)接种不同菌根真菌后苜蓿活细根和死细根现存生物量发生了变化。接种Gm后活细根现存生物量平均值最高,而未接种对照最低,并且活细根现存量在9月中旬达到峰值;死细根生物量是先增加后降低再增加的趋势,在8月中旬达到最大后在9月中旬下降,此后现

存生物量增加,在整个生长过程中未接种处理高于接种处理,且接种Gi处理死细根现存平均生物量较接种组其他处理低。(3)苜蓿细根的生长和死亡因不同的菌根真菌和季节表现出一定的差异。在整个生长期,苜蓿细根生长量以接种Ge处理最大,而未接种对照最低;而未接菌植株细根的死亡量显著地高于接种植株,而在各接种植株中又以接种Gm处理最低。同时,细根生产和死亡的高峰分别出现在8月底和10月,低谷出现在9月底到10月中旬和6月底到8月;接种Gv后细根现存量和年生长量显著高于对照和接种其他菌种,而且对照组细根周转最大,而接种Gv和Gm处理较低。

参考文献:

- [1] SON Y, HWANG J H. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea[J]. *Ecological Research*, 2003, **18**(3): 339—346.
- [2] HODGE A, BERTA G, DOUSSAN C, et al. Plant root growth, architecture and function[J]. *Plant Soil*, 2009, **321**(1—2): 153—187.
- [3] WU Q S, ZOU Y N, HE X H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi can alter some root characters and physiological status in trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings[J]. *Plant Growth Regul.*, 2011, **65**(2): 273—278.
- [4] JACKSON R B, MOONEY H A, SCHULZE E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, **94**(14): 7 362—7 366.
- [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.)[J]. *Ann. Bot.*, 1991, **68**(2): 135—141.
- [6] YAO Q, WANG L R, ZHU H H, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on root system architecture of trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings[J]. *Sci. Hortic.*, 2009, **121**: 458—46.
- [7] BOYLE C D, HELLENBRAND K E. Assessment of the effect of mycorrhizal fungi on drought tolerance of conifer seedlings[J]. *Can. J. Bot.*, 1991, **69**(16): 1 764—1 771.
- [8] EISSENSTAT D M, WELLS C E, YANAI R D, et al. Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. *New Phytol.*, 2000, **147**(1): 33—42.
- [9] GILL R A, JACKSON R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems[J]. *New Phytol.*, 2000, **147**(1): 13—31.
- [10] SHI J W(史建伟), WANG ZH Q(王政权), YU SH Q(于水强), et al. Estimating fine root production, mortality and turnover with minirhizotrons in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology(植物生态学报)*, 2007, **31**(2): 333—342(in Chinese).
- [11] HENDRICK R L, PREGITZER K S. The demography of fine roots in a northern hardwood forest[J]. *Ecology*, 1992, **73**: 1 094—1 104.
- [12] BURTON A J, PREGITZER K S, HENDRICK R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests[J]. *Oecologia*, 2000, **125**(3): 389—399.
- [13] 刘润进,陈应龙.菌根学[M].北京:科学出版社,2006:214—217.
- [14] GUO ZH L(郭忠玲), ZHENG J P(郑金萍), MA Y D(马元丹), et al. A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2006, **26**(9): 2 855—2 862(in Chinese).
- [15] LÓPEZ B, SABATÉ S, GRACIA C A. Annual and seasonal changes in fine root biomass of a *Quercus ilex* L. forest[J]. *Plant Soil*, 2001, **230**(1): 125—134.
- [16] JI W P(冀卫萍), WANG J J(王健健), ZHAO X CH(赵学春), et al. Fine root production and turnover of *Alhagi sparsifolia* community in arid area of Xinjiang, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 2013, **32**(10): 2 635—2 640(in Chinese).
- [17] HENDRICK R L, PREGITZER K S. The dynamics of fine root, length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems[J]. *Can. J. For. Res.*, 1993, **23**: 2 507—2 520.

- [18] STEELE S J, GOWER S T, VOGEL J G, et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada[J]. *Tree Physiol.*, 1997, 17: 577–587.
- [19] ZHENG J X(郑金兴), HUANG J X(黄锦学), WANG ZH ZH(王珍珍), et al. Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe bournei* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2012, 32(23): 7 532–7 539(in Chinese).
- [20] CHENG Y H(程云环), HAN Y ZH(韩有志), WANG Q CH(王庆成), et al. Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2005, 29(3): 403–410(in Chinese).
- [21] EISSENSTAT D M, YANAI R D. The ecology of root lifespan[J]. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 1–60.
- [22] JIANG H Y(姜红英), GU J C(谷加存), QIU J(邱俊), et al. Seasonal variations of fine root production and mortality in *Larix gmelini* plantation in 2004–2008[J]. *Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2010, 21(10): 2 465–2 471(in Chinese).
- [23] FARRAR J F, JONES D L. The control of carbon acquisition by roots[J]. *New Phytol.*, 2000, 147(1): 43–53.
- [24] HENDRICKS J J, NADELHOFFER K J, ABER J D. A ^{15}N tracer technique for assessing fine root production and mortality[J]. *Oecologia*, 1997, 112: 300–304.
- [25] HUANG J H(黄建辉), HAN X G(韩兴国), CHEN L ZH(陈灵芝). Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 1999, 19(2): 270–277(in Chinese).
- [26] SHI J W(史建伟), YU SH Q(于水强), YU L ZH(于立忠), et al. Application of minirhizotron in fine root studies[J]. *The Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2006, 17(4): 715–719(in Chinese).
- [27] VOGT K A, GRIER C C, MEIER C E, et al. Mycorrhizal role in net primary production and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in Western Washington[J]. *Ecology*, 1982, 63(2): 370–380.
- [28] ZHANG X Q(张小全) WU K H(吴克红). Fine root production and turnover for forest ecosystems[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2001, 37(3): 126–138(in Chinese).
- [29] WANG Y J(王永吉), ZHAO X CH(赵学春), LAI L M(来利明), et al. Growth dynamic and turnover of fine root of *Haloxylon ammodendron* communities in Sangong River Basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*(生态与农村环境学报), 2013, 29(5): 666–670(in Chinese).
- [30] BURKE M K, RAYNAL D J. Fine root growth phenology, production and turnover in a northern hardwood forest ecosystem[J]. *Plant Soil*, 1994, 162(1): 135–146.

Introduction of the Plant Front Cover:*Cardamine scaposa* Franch.

Cardamine scaposa Franch. belongs to the family Brassicaceae. Herbs perennial, 4–18 cm tall, scapose, glabrous throughout. Rhizomes slender, with slender stolons. Stems leafless, erect, simple. Rhizomatous leaves simple; petiole 1–12 cm; leaf blade reniform or suborbicular, 0.3–2.0×0.5–3.0 cm, base cordate, margin repand-crenate or entire. Cauline leaves absent. Racemes terminal, 2–10-flowered. Fruiting pedicels erect or erect-ascending, 1–4 cm, proximal longest. Sepals ovate or oblong, 3–4×1.5–2.2 mm, margin membranous-lateral pair subsaccate. Petals white, broadly obovate, 8–13×5–7 mm, cuneate into a clawlike base to 2 mm, apex rounded or subemarginate. Median filament pairs 4.5–8.0 mm, slightly dilated at base; lateral pair 2.5–4.5 mm; anthers narrowly oblong, 1.5–1.8 mm. Ovules 8–14 per ovary. Fruit linear, 2.0–3.5 cm×1.2–1.7 mm; valves glabrous, smooth; style 3.0–7.5 mm. Seeds brown, oblong, 2–3×1.0–1.5 mm, wingless. Fl. Apr-Jun, fr. Jun-Jul.

C. scaposa is used medicinally and endemic to China. They growing on shrubby slopes and moist areas at altitude between 1 400–2 900 m in Hebei, Inner Mongolia, Shaanxi, Shanxi, Sichuan.

(Photographed and introduced by ZHU Renbin)