

网络出版时间:2023-06-30 16:13  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1390.S.20230629.1646.014.html

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.01.009

# 丛枝菌根真菌对元宝枫生长及其根系形态的影响

李 晴,段文艳,李 鑫,景若楠,盛 敏

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

**【摘要】**【目的】阐明丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌对元宝枫生长状况及根系形态特性的影响,探讨元宝枫根系形态与其生长发育的关系。【方法】在元宝枫幼苗生长基质中接种摩西斗管囊霉(*Funneli formis mosseae*)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)2种 AM 真菌,以不接种 AM 真菌为对照,通过盆栽试验,培养 90 d 后,测定元宝枫的生长状况、根系活力及根系形态指标,利用单因素方差分析和多重比较方法,分析接菌与不接菌处理之间的差异,采用 envfit() 函数、冗余度分析和变差分解分析元宝枫生长状况与其他指标间的关系。【结果】①接种 2 种 AM 真菌后,元宝枫株高、地径、茎干质量和根系活力较对照显著提高,根冠比下降。根内根孢囊霉对元宝枫的促生作用比摩西斗管囊霉显著。②与对照相比,接种 2 种 AM 真菌后,元宝枫根表面积和根体积显著增大,粗根根长占总根长的比例增加,细根根长占总根长的比例显著降低。根内根孢囊霉对元宝枫根系形态的影响比摩西斗管囊霉显著。③元宝枫生长状况与其根系活力和根系形态密切相关。【结论】接种 AM 真菌有助于增强元宝枫的根系活力,改善其根系形态,促使其汲取更多养分,进而提高其生物量。

**【关键词】** 元宝枫;丛枝菌根真菌;根系活力;根系形态

**【中图分类号】** S718.81

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2024)01-0079-08

## Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and root morphology of *Acer truncatum*

LI Qing, DUAN Wenyan, LI Xin, JING Ruonan, SHENG Min

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study elucidated the effects of AM fungi on growth and root morphological characteristics of *Acer truncatum* to explore relationships between root morphology of *Acer truncatum* and growth and development. 【Method】 Two kinds of AM fungi, *Funneli formis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*, were inoculated into the growth matrix of *Acer truncatum* seedlings, and non-inoculation was used as the control. After 90 days, the growth, root activity and root morphology of *Acer truncatum* were determined. The differences between inoculation and non-inoculation treatments were analyzed by one-way analysis of variance and multiple comparison methods. The relationship between the growth of *Acer truncatum* and other indexes was analyzed by envfit() function, redundancy analysis and variation partitioning analysis. 【Result】 ① After inoculation with AM fungi, plant height, ground diameter, stem weight and root activity of *Acer truncatum* were significantly increased, while root-shoot ratio was decreased. The promoting effect of *Rhizophagus intraradices* on *Acer truncatum* was more significant than that of *Funneli formis mosseae*. ② After inoculation with AM fungi, root surface area and root volume of *Acer truncatum* in-

【收稿日期】 2022-10-17

【基金项目】 陕西省自然科学基金项目(2021JM-094);陕西省技术创新专项(2020QFY10-01)

【作者简介】 李 晴(1998-),女,辽宁朝阳人,在读硕士,主要从事森林土壤微生物研究。E-mail:525544844@qq.com

【通信作者】 盛 敏(1977-),女,四川成都人,副教授,博士生导师,主要从事林木菌根真菌种质资源、生态分布和生物多样性研究。E-mail:shengmin1977@126.com

creased significantly, the proportion of coarse roots increased significantly, while the proportion of fine roots decreased significantly. The effect of *Rhizophagus intraradices* on root morphology of *Acer truncatum* was more significant than that of *Funneliformis mosseae*. ③ The growth of *Acer truncatum* was closely related to root activity and root morphology. 【Conclusion】 Inoculation of AM fungi enhanced root activity of *Acer truncatum*, improved its root morphology, promoted nutrient absorption, and increased its biomass.

**Key words:** *Acer truncatum*; arbuscular mycorrhizal fungi; root activity; root morphology

元宝枫(*Acer truncatum*)是我国重要的经济林木之一<sup>[1]</sup>,其种仁和叶中均含有多种活性物质,具有较高的营养价值和药用价值<sup>[2-3]</sup>。元宝枫多种植于我国黄河流域、东北及内蒙古、江苏、安徽、陕西等地的山地和丘陵地区,其种植地一般土层较薄,肥力较差。元宝枫生长缓慢,营养生长期长,结果延迟且产量低,个别地区甚至出现了大面积的“小老树”低产元宝枫林,严重制约了元宝枫产业的发展<sup>[4-6]</sup>。当前,促进元宝枫生长,使其早日开花结果已成为元宝枫产业发展中亟待解决的问题。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌能与 90% 以上的陆生植物形成菌根,是重要的土壤生物成员之一<sup>[7-8]</sup>。研究表明,菌根可通过调节植物根系形态结构、根系活力、根系吸收面积以及活化土壤养分,增加植物对矿质元素和水分的吸收来促进植物生长,增强植物耐营养瘠薄的能力<sup>[9-10]</sup>。关于元宝枫与 AM 真菌间的关系,仅少量研究发现,元宝枫根系可与菌根真菌形成共生体,且该共生体的形成可促进植株对磷的吸收<sup>[12-13]</sup>。根系是植物吸收营养物质的重要器官,其形态结构和活力水平与植物的营养吸收能力密切相关。因此,本研究选取对元宝枫根系侵染效果较好的摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)为供试菌种,在盆栽条件下研究不同 AM 真菌对元宝枫根系形态、根系活力及生长状况的影响,以期菌根技术在元宝枫产业发展中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试菌种

供试菌种摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)为本研究室保存。供试菌种经玉米宿主繁殖 60 d 后,制成含有孢子、菌丝体和侵染根段的接种菌剂;摩西斗管囊霉菌剂中的根段侵染率和孢子密度分别为 94.3% 和  $4 \text{ g}^{-1}$ ,根内根孢囊霉菌剂中的根段侵

染率和孢子密度分别为 95.7% 和  $50 \text{ g}^{-1}$ 。

### 1.2 供试材料

供试元宝枫种子购自山西省运城市。选取大小一致的种子,用体积分数 5% NaClO 表面杀菌 10 min,无菌蒸馏水冲洗 5 遍,置于皿底铺有 3 层湿润滤纸和灭菌湿润河沙的无菌培养皿中,于 28 °C 培养箱中催芽 3~5 d,选择露白一致的种子备用。

### 1.3 盆栽基质

将采自西北农林科技大学林学院花圃地的垆土过 2 mm 筛,与洗净的河沙混合(垆土与河沙体积比 2:1),先高压湿热(121 °C)灭菌 2 h,取出放置 1 周后作为盆栽基质。混合前测定垆土的有机质、速效磷、速效钾含量及 pH 值,分别为 20.0, 12.1, 207.0 mg/kg 和 7.6。

### 1.4 试验设计

试验设对照(不接种 AM 真菌,CK)和 2 种接菌处理,其中接种摩西斗管囊霉菌剂处理记为 MX,接种根内根孢囊霉菌剂处理记为 GN,每个处理重复 10 次,共 30 盆。供试盆钵为 150 mm × 130 mm × 150 mm 的塑料盆,每盆装盆栽基质 2.0 kg。每盆播种萌发的元宝枫种子 3 粒,播种 10 d 后间留生长一致的元宝枫幼苗 1 株。菌剂处理(MX 和 GN)分别加入对应菌剂 30 g/盆,对照处理施加等量灭菌菌剂和 10 mL 菌剂过滤液(10 μm 滤膜过滤),保证各处理除 AM 真菌以外的其他微生物区系基本保持一致。常规育苗管理,植株生长约 90 d 后,测定元宝枫株高、地径、地上和地下部生物量、根系形态和根系活力。

### 1.5 测定指标及方法

1.5.1 生长指标 分别用直尺和游标卡尺测定元宝枫的株高(cm)与地径(mm)。

将元宝枫根、茎、叶冲洗干净,用吸水纸吸干表面水分称取鲜质量,然后迅速放入烘箱在 110 °C 下杀青 30 min,于 80 °C 下烘干至恒质量,冷却至室温后称干质量。计算根冠比:根冠比 = 根干质量 / (茎干质量 + 叶干质量)。

1.5.2 根系活力 采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法<sup>[14]</sup>测定元宝枫的根系活力。

1.5.3 根系形态指标 用 EPSON. EXPRESSION 1680 型扫描仪对根系进行扫描,扫描仪分辨率设为 400 dpi,为避免根样分枝互相缠绕,扫描前将根样放入透明托盘内,并注入 3~5 mL 蒸馏水。扫描图像用 WINRHIZO 2003b 根系分析软件进行分析,获得总根长、根表面积、根体积、根分叉数、根尖数和根平均直径等数据。根据根直径对根系进行分级,共分为 3 级,分别为根直径 < 0.5 mm、0.5 ≤ ~ ≤ 1.0 mm 和 > 1.0 mm,计算各级根系长度占总根长的比例和比根长。

比根长(cm/g) = 根长/根干质量。

## 1.6 数据统计与分析

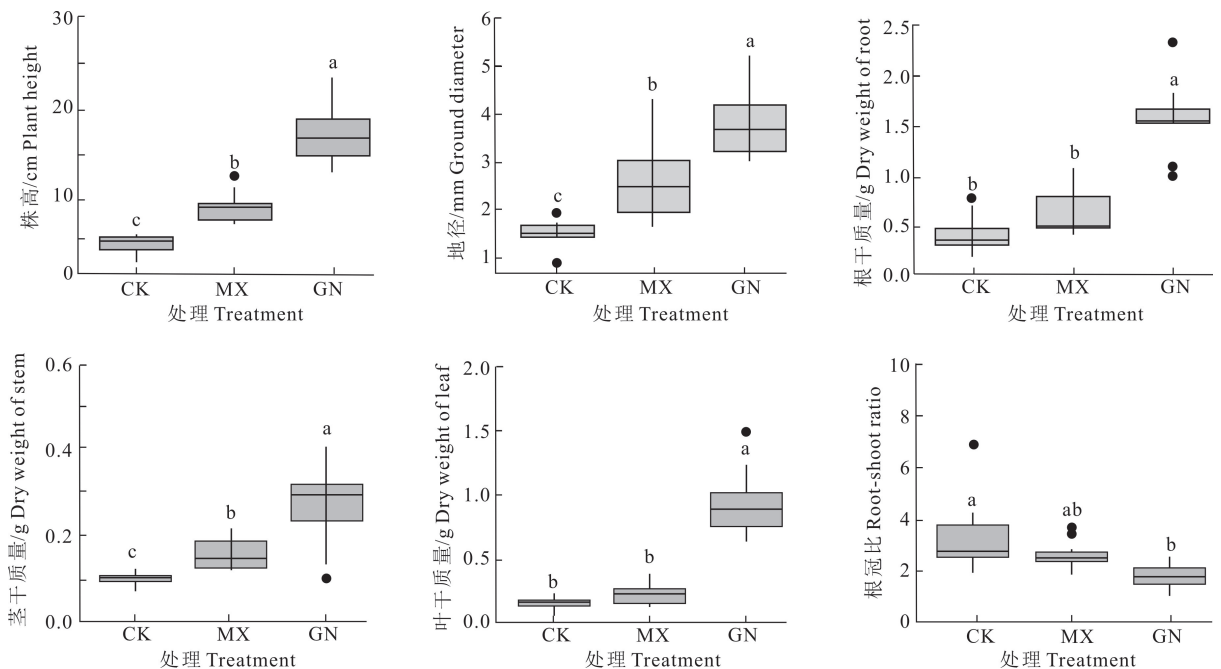
所有试验数据分析及绘图均在 R 统计分析软件(R Core Team, 2019)中进行。采用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),检验菌剂处理对元宝枫生长及根系指标的影响,采用 Duncan's 检验对各菌剂处理进行多重比较( $P < 0.05$ )。利用 envfit() 函数分析单个根系活力或根

系形态指标与元宝枫生长状况间的相关性,再采用冗余度分析(redundancy analysis, RDA)确定元宝枫生长状况与根系活力及根系形态间的关系。利用变差分解分析(variation partitioning analysis, VPA)中的 varpart() 函数分析根系活力和根系形态对元宝枫生长的贡献。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 种丛枝菌根真菌对元宝枫生长的影响

方差分析结果表明,元宝枫株高、地径、根干质量、茎干质量、叶干质量和根冠比在不同菌剂处理间差异显著(图 1)。由图 1 可知,与 CK 相比, MX 处理元宝枫的株高、地径和茎干质量显著增加,而根干质量、叶干质量和根冠比变化不显著; GN 处理元宝枫株高、地径、根干质量、茎干质量和叶干质量均显著增加,但根冠比显著降低。由此可见, GN 对元宝枫的促生效应更为突出,其可能部分替代了根系的功能,致使碳水化合物更多地分配于地上部分,促进了元宝枫茎和叶的生长,从而导致元宝枫的根冠比降低。



CK. 对照; MX. 摩西斗管囊霉处理; GN. 根内根抱囊霉处理; 图柱上标不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

灰色圆点表示离群点( $\pm 1.5$  倍四分位距以外的值)。下图同

CK. Control; MX. *Funniformis mosseae* treatment; GN. *Rhizophagus intraradices* treatment. Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ). Grey dots represent outliers (values other than  $\pm 1.5$  times the interquartile range). The same below

图 1 2 种丛枝菌根真菌对元宝枫生长的影响

Fig. 1 Effect of two AM fungi on *Acer truncatum* growth

## 2.2 2 种丛枝菌根真菌对元宝枫根系活力的影响

由图 2 可见,不同菌剂处理元宝枫根系活力差异显著。与 CK 相比, MX 和 GN 处理元宝枫根系活力分别显著增加了 61.9% 和 126.1%, 且 GN 对元宝枫根系活力的促进作用显著高于 MX。

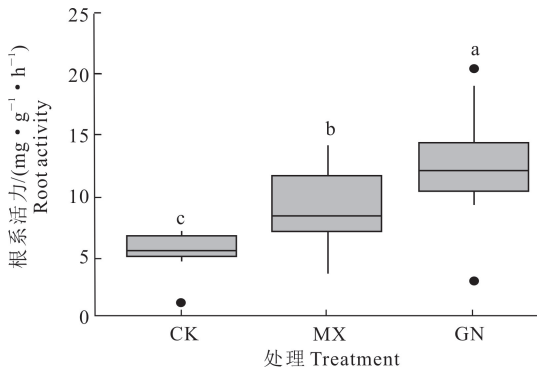


图 2 2 种丛枝菌根真菌对元宝枫根系活力的影响

Fig. 2 Effect of two AM fungi on root activity of *Acer truncatum*

## 2.3 2 种丛枝菌根真菌对元宝枫根系形态的影响

方差分析结果表明,除比根长外,不同菌剂处理元宝枫根系形态相关指标差异均达显著水平(图 3)。由图 3 可知,与 CK 相比, MX 处理元宝枫的根表面积和根体积显著增大,而总根长、根平均直径、根尖数和根分叉数虽有增加但不显著; GN 处理元宝枫的总根长、根表面积、根平均直径、根体积、根尖数和根分叉数均显著增加。表明 GN 对元宝枫根系生长的促进作用显著高于 MX。

由图 4 可以看出,接种菌根真菌可使元宝枫根系形态中粗根根长占总根长的比例增大。与 CK 相比,接种 GN 的元宝枫根系中根直径  $>1.0$  mm 的粗根根长占比显著提高;而接种 MX 的元宝枫根系中根直径  $0.5 \leq \sim \leq 1.0$  mm 的粗根根长占比显著提高;接种 GN 和 MX 的元宝枫根系中根直径  $<0.5$  mm 的细根根长占比均显著下降。

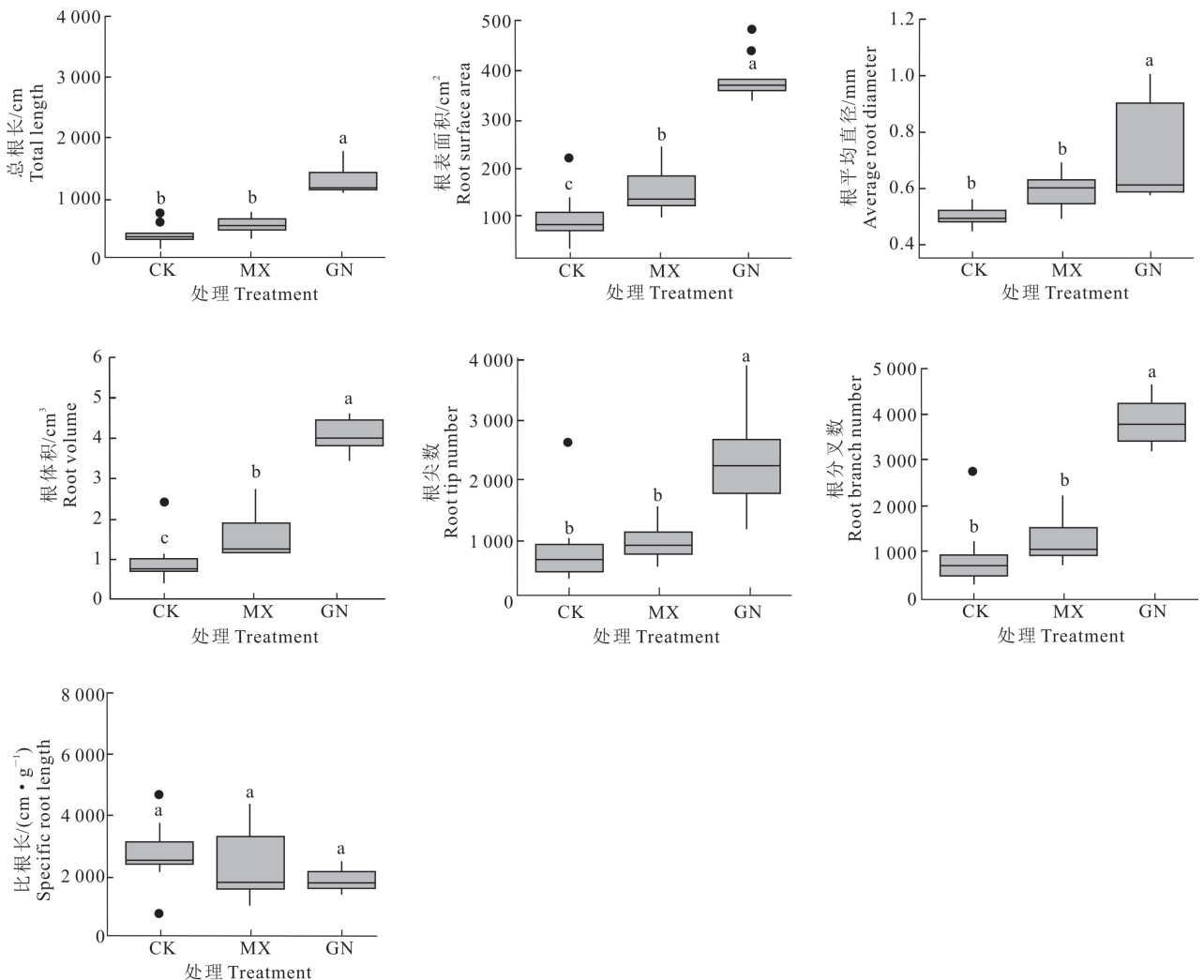


图 3 2 种丛根菌根真菌对元宝枫根系形态的影响

Fig. 3 Effect of two AM fungi on root morphology of *Acer truncatum*

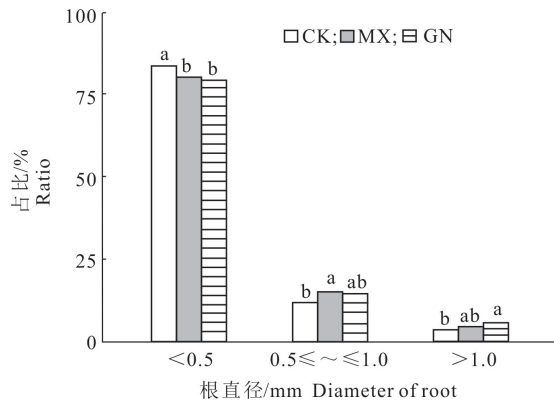


图 4 不同处理元宝枫各类根直径的根长占总根长的比例

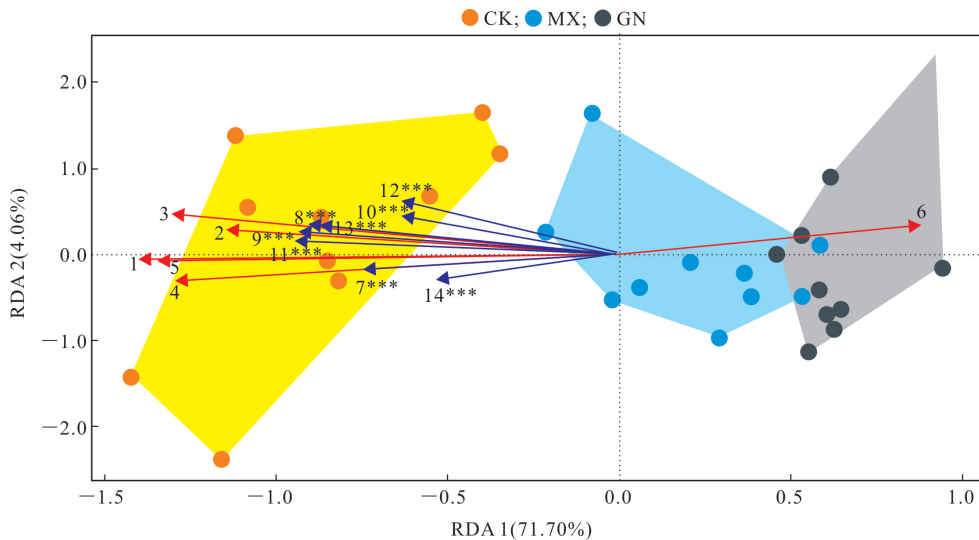
Fig. 4 Ratios of root lengths with different diameters of *Acer truncatum* in different treatments

### 2.4 元宝枫生长状况与根系形态间的关系

为了探究元宝枫生长状况与根系形态间的关系,选取受菌剂处理显著影响的元宝枫生长指标、根系活力和根系形态相关指标,利用 envfit () 函数进行分析,结果表明元宝枫生长指标(株高、地径、根干质量、茎干质量、叶干质量和根冠比)与根系活力 ( $r^2=0.55, P<0.001$ )、总根长 ( $r^2=0.77, P<0.001$ )、

根表面积 ( $r^2=0.82, P<0.001$ )、根平均直径 ( $r^2=0.40, P<0.01$ )、根体积 ( $r^2=0.84, P<0.001$ )、根尖数 ( $r^2=0.43, P<0.001$ )、根分叉数 ( $r^2=0.74, P<0.001$ )、根直径  $>1$  mm 的根系长度占总根长比例 ( $r^2=0.29, P<0.01$ ) 均显著相关,而与根直径  $<0.5$  mm ( $r^2=0.18, P=0.072$ ) 和根直径  $0.5 \leq \sim \leq 1.0$  mm ( $r^2=0.09, P=0.27$ ) 的根长占总根长比例的相关性不显著。

利用 RDA 对元宝枫生长指标及与其显著相关的根系活力或根系形态指标进行降维,分析结果(图 5)表明,RDA1 轴解释 71.70% 的变量,RDA2 轴解释 4.06% 的变量,二者共解释 75.76% 的变量,能够反映大量数据的信息。其中,元宝枫根系活力、总根长、根表面积、根平均直径、根体积、根尖数、根分叉数、直径  $>1$  mm 的根系长度占总根长的比例与株高、地径、根干质量、茎干质量和叶干质量呈正相关,而与根冠比呈负相关。不同菌剂对元宝枫的促生效应与其对根系活力和根系形态的影响有关;GN 对元宝枫根系活力和根系形态的影响强于 MX,这可能是 GN 对元宝枫具有较强促生效应的主要原因。



1. 株高;2. 地径;3. 根干质量;4. 茎干质量;5. 叶干质量;6. 根冠比;7. 根系活力;8. 总根长;9. 根表面积;10. 根平均直径;11. 根体积;12. 根尖数;13. 根分叉数;14. 直径  $>1$  mm 的根系长度占比; \* \* \*  $P<0.001$ , \* \*  $P<0.01$

1. Plant height;2. Ground diameter;3. Dry weight of root;4. Dry weight of stem;5. Dry weight of leaf;6. Root-shoot ratio;7. Root activity;8. Total root length;9. Root surface area;10. Average root diameter;11. Root volume;12. Tip number;13. Root branch number;14. Proportion of root length with diameter  $>1$  mm. \* \* \*  $P<0.001$ ; \* \*  $P<0.01$

图 5 元宝枫生长状况与根系形态间的关系

Fig. 5 Relationship between growth status and root morphology of *Acer truncatum*

将与元宝枫生长指标显著相关的根系活力及根系形态指标作为解释变量,利用 varpart () 函数进行变差分解分析,比较根系活力和根系形态对元宝枫生长的贡献程度。分析结果表明,根系活力和根系形态总解释率为 84.90%;其中根系活力单独解

释 3.10% 的变差,根系形态单独解释 34.90% 的变差,根系形态与根系活力共同解释 46.90% 的变差,这表明根系形态的变化可能是元宝枫生长状况差异的主导因素。

### 3 结论与讨论

根系活力能够客观反映植物根系的生命活动<sup>[15]</sup>,包括根系氧化力、根系伤流组分、根系分泌物等系列生理指标<sup>[16]</sup>,其可直接影响植物的生长和发育<sup>[17-18]</sup>。大量研究发现,菌根真菌的生命活动对植物的根系活力具有重要影响<sup>[19]</sup>,菌根真菌的侵入可以诱导生长素的产生,增强植物根系对土壤养分的吸收,加快植株中氮磷等的代谢<sup>[20]</sup>,最终促进植物根系活力的增强<sup>[21]</sup>。本研究接种 2 种 AM 真菌后,元宝枫的根系活力均显著提高,可能是由于 AM 真菌侵染后改善了植物根系的吸收性能,促进了地上和地下部分的养分交流,从而提高了根系活力<sup>[22]</sup>;此外,不同的 AM 真菌与元宝枫可以形成不同程度的共生体,且存在不同的接种效应,导致接种 2 种 AM 真菌后元宝枫的根系活力提高幅度不同,这与前人研究结果<sup>[23]</sup>相似。

研究证明,植物根系的形态结构与根系养分的吸收功能密切相关<sup>[24]</sup>,菌根真菌侵染植物并与其共生后<sup>[25]</sup>,植物根系朝着两个方向进化:一方面,较粗的根依赖菌根真菌的存在加强了与土壤的联系并从中获得养分;另一方面,较细的根使植物能够更有效地利用光合产物,从而进行土壤侵殖<sup>[26]</sup>。这也进一步说明,菌根真菌侵染植物后,可以扩大植物根系的吸收范围,促进植物与土壤的养分传递<sup>[27]</sup>,进而影响植物的生长发育<sup>[28]</sup>。本研究发现,2 种 AM 真菌在不同程度上改变了元宝枫的根系形态结构。大量研究表明,AM 真菌对植物的根长、根表面积、根体积、根干质量、根尖数等根系形态结构有显著改善作用<sup>[29]</sup>,本研究中接种 GN 菌剂处理也得到了类似的结果,但接种 MX 菌剂元宝枫根系形态中仅根表面积和根体积显著增大,这可能是由于不同 AM 真菌对宿主植物根系的侵染能力不同所致<sup>[30]</sup>。经过菌根化后,元宝枫根系中粗根根长占总根长的比例有所升高,而细根根长占总根长的比例下降,从而提高了根系生物量。前人研究发现,植物根系生物量越大,越有助于根系分泌物的合成与分泌<sup>[31]</sup>,进而有利于植物对土壤中营养成分的吸收,植株的株高、地径、茎干质量随之增加<sup>[32]</sup>。本研究也得到类似结果,接种 AM 真菌后元宝枫的地上部分生物量均有所增加。由此可见,元宝枫生物量增加与其根系形态改变密切相关。但不同的 AM 真菌对元宝枫的亲合力、根系活力和根系形态结构的作用效果不同<sup>[33]</sup>,因而对水分和营养成分的吸收能力及生长的

促进作用也不同<sup>[34]</sup>。

前人研究表明,根系是植物从土壤中吸收养分和水分的主要器官,在不同条件下控制和影响着整个植株的生长发育,其吸收能力主要体现在 2 个方面,即根系大小和根系的吸收性能<sup>[35]</sup>。本研究发现,元宝枫地上部分生物量高的植株,其地下部分根系活力和根系生物量也较高,这与前人研究结果<sup>[36]</sup>相似。由于 AM 真菌侵染植物根系后,将生物电信号传递给植物根系,可能引起根系中细胞膜的通透性发生改变<sup>[37]</sup>,使根系特性得以改良。这种优良的根系特性有助于维持其根系活力,促进其根系形态结构发育<sup>[38]</sup>,使根系充分利用深层土壤的稳定环境,从而吸收更多的水分和养分促进地上部分生长,获得较高的生物产量<sup>[39]</sup>。由此可见,AM 真菌对元宝枫根系特性的影响与其生长发育密切相关。由于不同的 AM 真菌对植物根系的侵染强度不同,所以其对根系特性的影响也有所差异,进而对植物生长发育的作用也不同<sup>[40-41]</sup>。

本研究发现,AM 真菌对元宝枫的生长具有显著促进作用,这种促进作用与 AM 真菌增强植株根系活力和改善根系形态结构密切相关。与对照相比,接种 2 种 AM 真菌的元宝枫生物量均明显增加,其根系活力和根表面积、根体积等根系形态也显著变优。元宝枫的生物量与这些根系特性显著相关,不同 AM 真菌处理元宝枫的生长状况有所差异。此外,根系分泌物可能也会对元宝枫的生长产生影响,关于 AM 真菌对元宝枫根系特征的作用机制还有待深入研究。

### [参考文献]

- [1] 王性炎,崔娟子. 中国元宝枫与人类健康 [M]. 陕西杨凌:西北农林科技大学出版社,2019:1-11.  
Wang X Y, Cui J Z. Chinese *Acer truncatum* and human health [M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2019:1-11.
- [2] 王 琨,刘少波,张 娜,等. 元宝枫研究进展 [J]. 西北林学院学报,2021,36(3):152-157.  
Wang K, Liu S B, Zhang N, et al. Research progress on *Acer truncatum* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021,36(3):152-157.
- [3] 刘昱迪,李佳美,王坤华,等. 元宝枫籽蛋白的营养性及理化性质 [J]. 食品科学,2021,42(27):271-277.  
Liu Y D, Li J M, Wang K H, et al. Nutritional and physico-chemical properties of *Acer truncatum* seed protein [J]. Food Science, 2021,42(27):271-277.
- [4] 白雪,李小英,邱宗海. 添加生物炭与菌肥的复合基质对元宝枫幼苗生长的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学版),

- 2020,26(6):1-9.
- Bai X, Li X Y, Qiu Z H. Effects of adding compound substrates with biochar and bacterial fertilizer on the growth of *Acer truncatum* seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 26(6): 1-9.
- [5] 聂晨曦, 王爱国. 太行山低山丘陵区侧柏元宝枫混交林造林技术 [J]. 现代农村科技, 2018(8): 38, 10.
- Nie C X, Wang A G. Afforestation technology of mixed forest of *Platycladus orientalis* and *Acer truncatum* in hilly area of Taihang Mountain [J]. Modern Rural Science and Technology, 2018(8): 38, 10.
- [6] 王 婕, 魏朝富, 刘卫平, 等. 基于土地整治的山地丘陵区耕地质量潜力测算 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 122-132.
- Wang J, Wei C F, Liu W P, et al. Calculation of cultivated land quality potential in hilly areas based on land consolidation [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(7): 122-132.
- [7] 何新华, 段英华, 陈应龙, 等. 中国菌根研究 60 年: 过去、现在和将来 [J]. 中国科学: 生命科学, 2012, 42(6): 431-454.
- He X H, Duan Y H, Chen Y L, et al. 60 years of mycorrhizal research in China: past, present and future [J]. Science China: Life Sciences, 2012, 42(6): 431-454.
- [8] 王曙光, 林先贵, 施亚琴. 丛枝菌根(AM)与植物的抗逆性 [J]. 生态学杂志, 2001(3): 27-30.
- Wang S G, Lin X G, Shi Y Q. Arbuscular mycorrhizal(AM) and plant stress resistance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2001(3): 27-30.
- [9] Parihar M, Meena V S, Mishra P K. Arbuscular mycorrhiza: a viable strategy for soil nutrient loss reduction [J]. Archives of Microbiology, 2019, 201(6): 723-735.
- [10] Lenoir I, Fontanine J, Lounes-hadj S A. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review [J]. Phytochemistry, 2016, 123: 4-15.
- [11] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005, 30(1): 75-115.
- [12] 王性炎. 中国元宝枫 [M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2013: 1-10.
- Wang X Y. Chinese *Acer truncatum* [M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2013: 1-10.
- [13] 唐 明, 陈 辉, 张博勇. 元宝槭 VA 菌根的研究 [J]. 西北林学院学报, 1993, 8(3): 18-21.
- Tang M, Chen H, Zhang B Y. Study on VA mycorrhiza of *Acer truncatum* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1993, 8(3): 18-21.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 36-40.
- Gao J F. Plant physiology experiment guidance [M]. Xi'an: World Book Publishing Company, 2000: 36-40.
- [15] Bardgett R D, Mommer L, De V F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2014, 29(12): 692-699.
- [16] 张子健, 刘美琴, 张 东, 等. 盐胁迫对甜瓜幼苗根系生长及膜脂过氧化的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 11-16.
- Zhang Z J, Liu M C, Zhang D, et al. Effects of salt stress on root growth and membrane lipid peroxidation of muskmelon seedlings [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2022, 43(2): 11-16.
- [17] Laliberte E. Below-ground frontiers in trait-based plant ecology [J]. New Phytologist, 2017, 213(4): 1597-1603.
- [18] Mallik A U, Biswas S R, Collier L C S. Belowground interactions between *Kalmia angustifolia* and *Picea mariana*: roles of competition, root exudates and ectomycorrhizal association [J]. Plant and Soil, 2016, 403: 471-483.
- [19] 赵 飞, 唐 明, 张好强. 丛枝菌根真菌对宁夏枸杞生长和氮代谢的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 166-171.
- Zhao F, Tang M, Zhang H Q. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nitrogen metabolism of *Lycium barbarum* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 166-171.
- [20] 吴金丹, 陈 乾, 刘晓曦, 等. 印度梨形孢对水稻的促生作用及其机理的初探 [J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 200-207.
- Wu J D, Chen Q, Liu X X, et al. Preliminary study on mechanisms of growth promotion in rice colonized by *Piriiformospora indica* [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(2): 200-207.
- [21] 袁志林. 一株广谱内生真菌 B3 对水稻生长及生理影响研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2005.
- Yuan Z L. Study on the growth and physiological effects of a broad-spectrum endophytic fungal strain B3 on rice [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2005.
- [22] 郭修武, 李 坤, 郭印山, 等. 丛枝菌根真菌对连作土壤中葡萄生长及根系分泌特性的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(4): 392-395.
- Guo X W, Li K, Guo Y S, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) strains on growth and root exudation characteristics of grapevine [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(4): 392-395.
- [23] 赵顺鑫, 魏祖晨, 李卓蔚, 等. 丛枝菌根真菌对滇重楼根系活力及药材化学成分的影响 [J]. 华西药学杂志, 2021, 36(5): 510-515.
- Zhao S X, Wei Z C, Li Z W, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on root activity and chemical constituents of *Paris polyphylla* [J]. Chinese Journal of Pharmacy, 2021, 36(5): 510-515.
- [24] 马炬峰, 辛 敏, 徐陈超, 等. 丛枝菌根真菌与氮添加对不同根形态基因型水稻氮吸收的影响 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 728-737.
- Ma J F, Xin M, Xu C C, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen addition on nitrogen uptake of rice genotypes with different root morphologies [J]. Plant Ecology Report, 2021, 45(7): 728-737.

- [25] 主春福,刘晶晶,刘春铃,等. 生物炭对 M9T337 苹果幼苗生长和磷素吸收及损失的影响 [J]. 中国果树,2022(5):39-42.  
Zhu C F, Liu J J, Liu C L, et al. Effect of biochar on the growth, phosphorus absorption and losses of M9T337 apple rootstocks [J]. China Fruits, 2022(5):39-42.
- [26] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits [J]. Nature, 2018, 555:94-97.
- [27] Mei L, Yang X, Cao H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alter plant and soil C:N:P stoichiometries under warming and nitrogen input in a semiarid meadow of China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16:397.
- [28] 孙晨瑜,曾燕红,马俊卿,等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长和根系分泌物化学组成的影响 [J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1831-1837.  
Sun C Y, Zeng Y H, Ma J Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Artemisia annua* L. growth and chemical composition of root exudates [J]. Journal of Tropical Crops, 2020, 41(9):1831-1837.
- [29] 唐悦. 丛枝菌根真菌对复合盐胁迫下草莓根系结构的影响 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020:44-49.  
Tang Y. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root structure of strawberry under combined salt stress [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020:44-49.
- [30] 韦竹立. 丛枝菌根真菌对玉米 (*Zea mays* L.) 根系的形态结构的影响及生理机制 [D]. 南宁:广西大学, 2018:51-55.  
Wei Z L. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological and biochemical characteristics and morphological structure of root systems of *Zea mays* L. [D]. Nanning: Guangxi University, 2018:51-55.
- [31] 刘欢. 不同丛枝菌根真菌对四种植物生长特性影响 [D]. 兰州:甘肃农业大学, 2016:12-16.  
Liu H. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on growth characteristics of four plants [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016:12-16.
- [32] Gealy D R, Moldenhauer K A K, Duke S. Root distribution and potential interactions between allelopathic rice, sprangletop (*Leptochloa* spp.), and barnyardgrass (*Echinochloa crusgalli*) based on <sup>13</sup>C isotope discrimination analysis [J]. Journal of Chemical Ecology, 2013, 39(2):186-203.
- [33] 李侠,叶诚诚,张俊伶,等. 丛枝菌根真菌侵染指标与植物促生效应相关性分析 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10):41-53.  
Li X, Ye C C, Zhang J L, et al. Correlation analysis between arbuscular mycorrhizal fungi colonization indices and plant growth promoting effect [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10):41-53.
- [34] 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 [J]. New Phytologist, 2017, 214(3):1330-1337.
- [35] Eghball B, Maranville J W. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and N stress [J]. Agronomy Journal, 1993, 85:147-152.
- [36] 春亮,陈范骏,张福锁,等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005(5):615-619.  
Chun L, Chen F J, Zhang F S, et al. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005(5):615-619.
- [37] 魏玉倩,陈健鑫,郑艳玲,等. 干热河谷不同树龄攀枝花苏铁丛枝菌根真菌多样性研究 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 203-209.  
Wei Y Q, Chen J X, Zheng Y L, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in *Cycas panzhihuaensis* at different tree ages in Dry Hot Valley [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4):203-209.
- [38] 卓鑫鑫,刘昆,周舟,等. 土壤微生物对水稻根系形态活力影响的研究进展 [J]. 东北农业科学, 2023, 48(2):78-85.  
Zhuo X X, Liu K, Zhou Z, et al. Research progress on the effect of soil micro-organisms on root morphology and activity in rice [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(2):78-85.
- [39] 刘欢,姚拓,李建宏,等. 丛枝菌根真菌对番茄生长的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(4):75-81.  
Liu H, Yao T, Li J H, et al. Effect of various arbuscular mycorrhizal fungi on growth of tomato [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(4):75-81.
- [40] 崔美香,李焱,卢彦琦. 不同丛枝菌根真菌对小麦幼苗侵染及生物产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(1):57-59.  
Cui M X, Li Y, Lu Y Q. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat seedling infection and biological yield [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(1):57-59.
- [41] 南雪芹. 不同丛枝菌根真菌(AMF)对茶树生长及耐盐性的影响研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2016:54-59.  
Nan X Q. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and salt tolerance of tea plant [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016:54-59.