

# 赣南脐橙根系 AM 真菌侵染特征及其与土壤化学性质的通径分析

肖有亮<sup>1</sup>, 黄荣珍<sup>1</sup>, 袁继红<sup>2</sup>, 邹显花<sup>1</sup>, 杨润<sup>1</sup>,  
韦美娇<sup>1</sup>, 黄智军<sup>1</sup>, 李燕燕<sup>1</sup>, 王金平<sup>1</sup>

(1. 江西水利电力大学 水土保持学院, 南昌 330099;

2. 江西省林业科学院 江西武功山草地生态系统定位观测研究站, 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 探求赣南脐橙根系丛枝菌根真菌(AM真菌)侵染特征及其与土壤化学性质的关系, 为赣南脐橙种植区 AM 真菌在脐橙产业可持续发展和水土流失治理中提供理论依据。[方法] 以章贡区、信丰县、会昌县 3 个主要脐橙品种(纽荷尔、红肉、赣南早)根系和根际土为研究对象, 分析了不同区域不同品种脐橙根系菌丝、丛枝、泡囊、总侵染率的差异, 并用通径分析等方法对脐橙根系侵染率与土壤化学性质做了相关分析。[结果] 脐橙根系侵染率的区域差异高于品种差异, 章贡区脐橙根系侵染率高于其他区域, 其中, 章贡区赣南早脐橙根系菌丝侵染率(86.7%)、丛枝侵染率(80%)和总侵染率(86.7%)显著高于信丰县赣南早脐橙(38.9%)、信丰县纽荷尔脐橙(27.8%)和会昌县纽荷尔脐橙(27.8%)( $p < 0.05$ ), 而泡囊侵染率在不同区组间差异不显著; 土壤养分因子中只有碱解氮含量和根系侵染率有显著相关关系, 且只与菌丝侵染率( $r = -0.541, p < 0.01$ )、丛枝侵染率( $r = -0.474, p < 0.05$ )和总侵染率( $r = -0.541, p < 0.01$ )有显著负相关关系, 与泡囊侵染率无显著相关关系; 其他土壤因子(有机质 OM、有效磷 AP、速效钾 AK、pH 值)与各侵染率间无显著相关性; 通径分析进一步揭示, 土壤碱解氮对根系菌丝、丛枝、总侵染率的直接通径系数绝对值(分别为 0.515, 0.396, 0.515)远高于间接通径系数绝对值(分别为 0.026, 0.078, 0.026), 这表明碱解氮是直接影响脐橙根系侵染率的关键因子。土壤 pH 值、有机质、有效磷和速效钾通过碱解氮对根系总侵染率间接作用效应大小顺序为有效磷 > 速效钾 > pH 值 > 有机质。[结论] 赣南脐橙根系 AM 真菌侵染主要受土壤碱解氮的直接调控, 在对赣南脐橙施肥时应尽量减少 N 元素的施入, 以促进 AM 真菌与脐橙的共生关系, 提升水土资源利用效率和生态保护效益。

**关键词:** 侵染率; 土壤化学性质; 赣南脐橙; 通径分析

中图分类号: S666.4; S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0283-07

## AM fungal colonization characteristics in roots of Gannan navel orange and their path analysis with soil chemical properties

Xiao Youliang<sup>1</sup>, Huang Rongzhen<sup>1</sup>, Yuan Jihong<sup>2</sup>, Zou Xianhua<sup>1</sup>, Yang Run<sup>1</sup>,  
Wei Meijiao<sup>1</sup>, Huang Zhijun<sup>1</sup>, Li Yanyan<sup>1</sup>, Wang Jinping<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Wugong Mountain Grassland Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the colonization characteristics of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the roots of Gannan navel orange and their relationship with soil chemical properties, thereby providing a theoretical basis for the role of AM fungi in the sustainable development of the navel orange industry

收稿日期: 2025-05-18

修回日期: 2025-06-24

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 国家自然科学基金(42467044), 江西省自然科学基金(20224BAB215032); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ201924); 赣鄱俊才支持计划: 主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ23043)

第一作者: 肖有亮(1999—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持研究。E-mail: 576019304@qq.com

通信作者: 王金平(1990—), 男, 江西吉安人, 博士, 讲师, 主要从事退化土壤生态修复研究。E-mail: wangjp0107@nit.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

and soil erosion control in the Gannan navel orange planting areas. [Methods] Using the roots and rhizosphere soil of three major navel orange varieties (*Citrus sinensis* Osbeck cv. Gannan Zao, *Citrus sinensis* Osbeck cv. Cara, and *Citrus sinensis* Osbeck cv. Newhall) in Zhanggong District, Xinfeng County, and Huichang County as the study objects, this study analyzed the differences in hyphal colonization, arbuscular colonization, vesicular colonization, and total colonization rates among different regions and varieties. Path analysis and other methods were used to conduct correlation analysis between root mycorrhizal colonization rates and soil chemical properties. [Results] Regional differences in root mycorrhizal colonization rates were more noticeable than varietal differences. The root mycorrhizal colonization rates of navel orange in Zhanggong District were higher than those in other regions. Specifically, hyphal colonization (86.7%), arbuscular colonization (80%), and total colonization rates (86.7%) of Gannan Zao navel orange in Zhanggong District showed significantly higher values than Gannan Zao navel orange in Xinfeng County (38.9%), Newhall navel orange in Xinfeng County (27.8%), and Newhall navel orange in Huichang County (27.8%) ( $p < 0.05$ ), while the vesicular colonization rates showed no significant differences among different groups. Among soil nutrient factors, only alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) content exhibited significant correlations with root mycorrhizal colonization rates. It showed negative correlations with hyphal colonization ( $r = -0.541$ ,  $p < 0.01$ ), arbuscular colonization ( $r = -0.474$ ,  $p < 0.05$ ), and total colonization ( $r = -0.541$ ,  $p < 0.01$ ), but showed no significant correlation with the vesicular colonization rate. Other soil factors (organic matter, OM; available phosphorus, AP; available potassium, AK; pH) showed no significant correlation with any of the colonization rates. Path analysis further revealed that the absolute values of the direct path coefficients of soil AN on the root hyphal colonization, arbuscular colonization, and total colonization rates (0.515, 0.396 and 0.515, respectively) were much higher than those of the indirect path coefficients (0.026, 0.078, 0.026, respectively), indicating that AN was the key factor directly affecting root mycorrhizal colonization rates. The indirect effects of soil factors on total mycorrhizal colonization rate through AN followed the order:  $AP > AK > pH > OM$ . [Conclusion] The colonization of AM fungi in the roots of Gannan navel orange is primarily directly regulated by soil AN. Therefore, the application of nitrogen fertilizers should be minimized during fertilization to enhance the symbiotic relationship between AM fungi and navel orange, thereby improving water-soil resource utilization efficiency and ecological conservation benefits.

**Keywords:** colonization rate; soil chemical properties; Gannan navel orange; path analysis

赣南地区凭借其独特的红壤资源和亚热带气候条件,已成为中国脐橙产业的核心产区<sup>[1]</sup>。然而,长期集约化种植模式和不合理的整治方式导致该区域脐橙果园普遍面临土壤养分失衡、酸化加剧以及水土流失与面源污染等问题,这严重制约着当地脐橙产业的可持续发展<sup>[2]</sup>。丛枝菌根真菌(AM真菌)作为天然的“生物肥料”和“土壤改良剂”<sup>[3]</sup>,能通过其庞大的菌丝网络显著提升宿主植物对土壤氮、磷等低迁移性养分的吸收效率,尤其在贫瘠土壤中<sup>[4-5]</sup>;同时,AM真菌能诱导植物抗逆基因表达,增强宿主对干旱、盐胁迫及重金属毒性的耐受性;并通过分泌球囊霉素相关土壤蛋白这一独特的“生物胶结剂”,促进土壤团聚体形成和稳定<sup>[6]</sup>,有效降低土壤侵蚀风险<sup>[7-8]</sup>。因此,合理利用AM真菌这一生物肥料,减少农药化肥的使用有助于脐橙产业的可持续发展,并降低脐橙产区的环境风险。

AM真菌与植物能否形成良好的共生关系是AM真菌发挥作用的关键,但这种共生关系的形成极易受土壤环境的影响。根系侵染率是表征AM真菌与植物共生关系的显性指标,研究表明土壤性质是调控根系AM真菌侵染的关键环境因子<sup>[9]</sup>。磷被认为是调控AM真菌与植物共生关系最重要的土壤指标,低磷条件下,植物体会分泌更多的独角金内酯,引导AM真菌菌丝向根部生长,促进根内侵染结构的形成<sup>[10-11]</sup>,然而,当土壤磷浓度升高超过一定阈值后,侵染又会受到抑制<sup>[12]</sup>。也有研究表明氮和钾与根系AM真菌侵染密切相关,当土壤氮和钾含量较高时,植物会降低对AM真菌养分吸收的依赖,因此会减少植物对菌丝的碳输送,进而减弱这种共生关系<sup>[13-14]</sup>。此外,土壤pH值、有机质含量等也普遍与AM真菌侵染存在关联<sup>[15-16]</sup>。影响AM真菌与植物共生关系的关键土壤因子与土壤类型有关,如在盐碱土中,制约

其共生关系的关键土壤因子是土壤盐分浓度,通常情况下高盐浓度易导致土壤溶液渗透压升高,致使AM真菌孢子萌发、菌丝生长以及宿主植物根系吸水变得困难,需消耗大量能量维持渗透平衡<sup>[17]</sup>。而在肥力较高的黑土中,调控其共生关系的土壤关键因子却是土壤磷含量,当土壤磷供给充足时,植物根系直接吸收磷的效率大大提高,转而降低对AM真菌的依赖性。

赣南地区土壤为酸性红壤,所种植的脐橙属于柑橘类,根毛较少,其水分和养分吸收依赖AM真菌,但赣南脐橙与AM真菌的共生关系如何受土壤环境的影响尚不清晰。因此,本研究以赣南章贡区、信丰县、会昌县3个主要脐橙品种(纽荷尔、红肉、赣南早)为研究对象,分析脐橙根系侵染特征的区域差异和品种差异,并采用通径分析等方法揭示土壤化学性质对赣南脐橙根系AM真菌(丛枝菌根真菌)侵染特征的影响。研究结果能为赣南脐橙果园合理施肥,充分发挥AM真菌功能提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况和根际土采集

赣南丘陵区位于赣江上游,江西南部,地处中亚热带南缘(24°29′—27°09′N, 113°54′—116°38′E),属亚热带湿润季风气候,年均温18.9℃,年降水量1605mm,无霜期286d,昼夜温差大,土壤由花岗岩风化而成,呈酸性、黏性、养分含量低等特点。研究区覆盖章贡区、信丰县、会昌县3个典型脐橙产区,研究所选脐橙品种包括主栽品种纽荷尔脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck cv. Newhall)、特色品种红肉脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck cv. Cara)及早熟品种赣南早脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck cv. Gannan Zao),脐橙果树树龄为6~10a,生长阶段施用有机肥。

采样在秋季进行,针对每个地域3个脐橙品种,分别选择距离50m以上的3个采样点,每个采样点选取3棵生长条件相似的脐橙果树,分别从东西南北4个方向采样。将3棵树在不同方向采集的12个子土样和根系样混合作为1个混合样,共计27份,其中纽荷尔脐橙采集12个样本(包含3个大棚内的混合样),红肉脐橙采集9个样本,赣南早脐橙采集6个样本。采样时,去除表层枯枝落叶杂草以及石块等,采集土层厚度为2—30cm的根系和土壤,轻轻抖动根系,残留在根系上的土和根系一起装入自封袋,并标记样号,置于便携式小冰箱中运回实验室。根际土风干过筛后用于测定化学性质,细根洗好后,用FAA固定液(90ml 70%乙醇溶液+5ml冰醋酸+5ml丙三醇)的小瓶(500ml)浸没,用于根系侵染率的测定。

### 1.2 指标测定方法

在均匀混合土壤样品后,风干过2mm筛子,以测定土壤理化性质以及可利用养分。参照《土壤农化分析》<sup>[18]</sup>,土壤pH值采用电位法测定、有机质采用重铬酸钾氧化-外化热法测定、有效磷(Available Phosphorus, AP)采用盐酸硫酸浸提法-钼锑抗比色法测定、速效钾(Available Potassium, AK)采用浸提法-火焰光度法测定、碱解氮(Alkali-hydrolyzable Nitrogen, AN)含量采用碱解扩散法。

### 1.3 根系侵染特征的测定

从FAA固定液中取出细根,小心剪下呈约1cm根段,将根段放入10%的氢氧化钾(KOH)溶液中90℃水浴加热40min,以便根段透明化,取出根段,用去离子水冲洗3遍。将冲洗后的根段放入碱性双氧水中浸泡30min,去除色素杂质,取出根段,用去离子水冲洗3遍。随后将根段放入1%的盐酸(HCL)溶液中浸泡3min,进行酸化处理,去除土壤残留物,取出根段,用去离子水冲洗3遍。将根段放入曲利苯蓝染色液中90℃水浴加热30min,使菌根结构着色。染色完成后,用去离子水洗去多余染色剂,随后将根段放入乳酸甘油溶液中进行脱色处理,使根系背景色变浅,便于观察。过夜后,将根段挑出制片。使用显微镜观察菌根侵染情况,在体视显微镜和光学显微镜下可以清楚地看到菌根的组织结构,包括侵入点、菌丝、丛枝、泡囊等。按照下列公式计算AM真菌侵染率<sup>[19]</sup>:

$$\text{侵染率} = (\text{AM真菌侵染根段数} / \text{检查总根段数}) \times 100\%$$

### 1.4 数据统计与处理

采用Excel 2019进行数据初步整理分析,使用SPSS线性回归进行通径分析,使用程序“Analyze-Regression-Linear”获得通径系数和相关系数,采用R 4.0.3软件绘制脐橙根系侵染率与土壤化学性质的相关性图。

## 2 结果与分析

### 2.1 脐橙根系AM真菌侵染状况及差异性

不同品种脐橙根系AM真菌侵染状况如图1所示。3个品种脐橙根系均检测到AM真菌侵染,描述性统计分析显示不同根系样本根系侵染率的变化范围较大(0~96.67%),其中泡囊侵染率的变异系数远高于菌丝、丛枝和总侵染率,而其均值(15.93%)却远低于后三者(58.02%, 46.30%和58.02%),菌丝、丛枝和总侵染率之间的变异系数和均值都相差不大。

方差分析表明不同区域及品种的脐橙根系AM真菌侵染特征存在显著差异,总体而言,区域差异对侵染率的影响显著高于品种差异( $p < 0.05$ )(表1)。对

于野外各个脐橙品种,章贡区脐橙的菌丝侵染率、丛枝侵染率及总侵染率均高于信丰县与会昌县( $p < 0.05$ ),其中章贡区赣南早脐橙的菌丝侵染率(86.7%)、丛枝侵染率(80.0%)及总侵染率(86.7%)最高,而信丰县纽荷尔脐橙的菌丝侵染率(27.8%)、丛枝侵染率(16.7%)和总侵染率(27.8%)最低(表2)。然而,信丰县纽荷尔脐橙在大棚内时,其菌丝侵染率(80.0%)、丛枝侵染率(75.6%)和总侵染率(80.0%)显著高于大棚外( $p < 0.05$ )。泡囊侵染率在不同区域和品种间均无显著差异( $p > 0.05$ )。

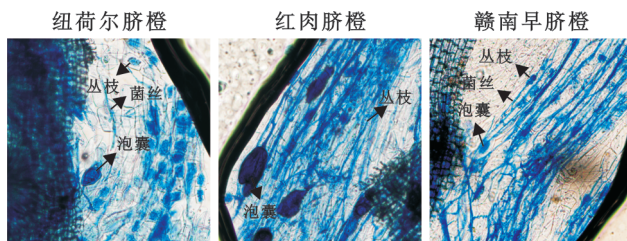


图1 不同品种脐橙根系AM真菌侵染状况  
Fig. 1 AM fungal colonization status of roots in different navel orange varieties

## 2.2 根际土壤理化性质的差异性

脐橙根际土pH值、碱解氮、有效磷和速效钾含量在不同区组间具有显著差异( $p < 0.05$ ),而有机质含量在不同区组间差异不显著(表3)。信丰县红肉

脐橙根际土pH值显著高于会昌县( $p < 0.05$ )。信丰县纽荷尔脐橙根际土碱解氮含量(284.7 mg/kg)显著高于其他区组( $p < 0.05$ ),会昌县红肉脐橙根际土有效磷含量(164.7 mg/kg)显著高于信丰县、章贡区纽荷尔脐橙以及赣南早脐橙( $p < 0.05$ ),会昌县和信丰县红肉脐橙根际土速效钾含量( $> 260.0$  mg/kg)显著高于信丰县大棚内纽荷尔脐橙(160.6 mg/kg)( $p < 0.05$ )。从总体来看,土壤pH值、碱解氮和有效磷含量的区域差异大于品种差异(表4),章贡区脐橙根际土碱解氮和有效磷含量明显低于其他区域。而脐橙速效钾含量的品种差异高于区域差异。

表1 脐橙根系菌根侵染率双因素方差分析  
Table 1 Two-way ANOVA of root mycorrhizal colonization rate of navel orange by variety and region

因素	项目	菌丝侵染率	丛枝侵染率	泡囊侵染率	总侵染率
品种	<i>F</i>	0.206	0.185	1.453	0.206
	<i>p</i>	0.816	0.832	0.259	0.816
区域	<i>F</i>	3.402	1.792	2.124	3.402
	<i>p</i>	0.055	0.194	0.147	0.055
品种×区域	<i>F</i>	1.153	1.216	0.846	1.153
	<i>p</i>	0.353	0.331	0.485	0.353

注:*F*值反映组间变异与组内变异的比值;*p*值为显著性水平。

表2 不同区域3个品种脐橙根系侵染率

Table 2 Root mycorrhizal colonization rates of three navel orange varieties from different regions

品种	区域	菌丝侵染率	丛枝侵染率	泡囊侵染率	总侵染率
纽荷尔脐橙	章贡区	77.8±8.4ab	60.0±6.7abc	36.7±6.7a	77.8±8.4ab
	会昌县	27.8±15.8c	20.0±18.6c	7.8±6.9a	27.8±15.8c
	信丰县	27.8±22.7c	16.7±15.3c	1.1±1.9a	27.8±22.7c
	信丰县(大棚)	80.0±12.0ab	75.6±15.4ab	10±8.8a	80.0±12.0ab
红肉脐橙	章贡区	67.8±44.3abc	43.3±38.4abc	34.4±38.9a	67.8±44.3abc
	会昌县	62.2±25.2abc	43.3±30.6abc	31.1±48.2a	62.2±25.2abc
	信丰县	53.3±20.3bc	44.4±29.1abc	10.0±10a	53.3±20.3abc
赣南早脐橙	章贡区	86.7±8.8a	80.0±5.8a	7.8±1.9a	86.7±8.8a
	信丰县	38.9±32.9bc	33.3±31.8bc	4.4±7.7a	38.9±32.9bc

注:不同小写字母代表具有显著性差异。

## 2.3 脐橙根系侵染特征与根际土壤因子的相关分析

Pearson相关性分析显示(图2),根系侵染率互相之间呈现极显著正相关( $p < 0.01$ )关系,碱解氮与菌丝侵染率( $r = -0.541$ )、丛枝侵染率( $r = -0.474$ )及总侵染率( $r = -0.541$ )均呈显著负相关( $p < 0.05$ ),而与泡囊侵染率无显著关联( $p > 0.05$ )。其他土壤因子(如有机质、有效磷、速效钾)与侵染率无直接显著相关性(图2)。

利用根系侵染率与土壤碱解氮含量做散点图并进行线性拟合,得到脐橙根系菌丝侵染率与土壤碱解氮含量之间的线性回归方程  $Y = 80.465 - 0.182X$ ,决定

系数  $R^2 = 0.264$ ;丛枝侵染率与土壤碱解氮含量之间的线性回归方程  $Y = 65.884 - 0.159X$ ,决定系数  $R^2 = 0.194$ ;泡囊侵染率与土壤碱解氮含量之间的线性回归方程  $Y = 27.671 - 0.095X$ ,决定系数  $R^2 = 0.103$ ;总侵染率与土壤碱解氮含量之间的线性回归方程  $Y = 80.465 - 0.182X$ ,决定系数  $R^2 = 0.264$ (图3)。

## 2.4 碱解氮与根系侵染率的途径分析

由以上分析可知,碱解氮在很大程度上决定根系侵染率大小,但是各个土壤养分的作用是相互的,并不是独立的,有的是直接的,有的是间接的。为了

探究碱解氮对脐橙根系作用的直接和间接效应,进行通径分析。结果表明,土壤养分因子中碱解氮对菌丝、丛枝、泡囊、总侵染的直接通径系数分别为-0.515,-0.396,-0.520,-0.515,间接通径系数分别为-0.026,-0.078,0.149,-0.026,通过比较发现,土壤碱解氮对菌丝、丛枝、泡囊、总侵染的直接通径

系数远高于间接通径系数(表 5)。土壤碱解氮通过其他土壤因子对菌丝和总侵染率的间接作用大小顺序为有效磷>速效钾>pH 值>有机质,对丛枝侵染率的间接作用大小顺序为有效磷>pH 值>速效钾>有机质,对泡囊侵染率的间接作用大小顺序为 pH 值>速效钾>有效磷>有机质。

表 3 不同区域 3 个品种脐橙根际土壤化学性质  
Table 3 Rhizospheric soil chemical properties of three navel orange varieties from different regions

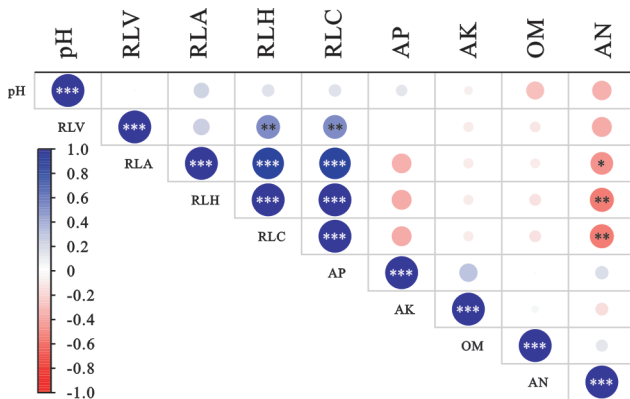
品种	区域	pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
纽荷尔脐橙	章贡区	4.1±0.2ab	33.9±12.4a	30.3±10.7d	73.4±32.1bc	243.4±19.3ab
	会昌县	3.9±0.3ab	46.3±10.2a	172.7±80.8b	111.6±11.8abc	190.3±46.1ab
	信丰县	4.2±0.9ab	47.7±18.2a	284.7±127.0a	77.6±23.6bc	174.7±60.7ab
	信丰县(大棚)	4.2±0.2ab	34.7±11.7a	107.3±42.8bcd	80.8±74.7bc	160.6±44.7b
红肉脐橙	章贡区	4±0.3ab	53.2±19.6a	53.7±35.2cd	119.2±63.9ab	252.4±96.5ab
	会昌县	3.8±0.2b	59.3±17.8a	149.3±8.1bc	164.7±29.3a	271.2±47.5a
	信丰县	5.3±1.7a	31.5±16.7a	81.7±22.5bcd	140.8±52.7ab	263.7±27.6a
赣南早脐橙	章贡区	4.2±0.3ab	76.4±78.2a	83±32.4bcd	36.4±6.5c	215.6±33.4ab
	信丰县	4.4±0.8ab	37.2±10.8a	143±23.6bc	108.8±16.8abc	246.6±33.8ab

注:不同小写字母代表具有显著性差异。

表 4 脐橙根系菌根侵染率双因素方差分析  
Table 4 Two-way ANOVA of root mycorrhizal colonization rate of navel orange by variety and region

因素	项目	pH 值	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
品种	F	0.479	0.910	0.810	5.287	3.922
	p	0.627	0.419	0.460	0.015	0.037
区域	F	2.744	1.414	4.849	3.067	0.127
	p	0.090	0.268	0.020	0.070	0.882
品种×区域	F	1.352	0.820	1.213	0.823	1.651
	p	0.288	0.499	0.332	0.497	0.211

注:F 值反映组间变异与组内变异的比值;p 值为显著性水平。



注:AP 为有效磷;AK 为速效钾;OM 为有机质;AN 为碱解氮;RLV 为泡囊侵染率;RLA 为丛枝侵染率;RLH 为菌丝侵染率;RLC 为总侵染率,\*代表 p<0.05,\*\*代表 p<0.01,\*\*\*代表 p<0.001。

图 2 脐橙根系侵染率与土壤化学性质的 Pearson 相关性  
Fig. 2 Pearson correlation between root mycorrhizal colonization rates and soil chemical properties of navel orange

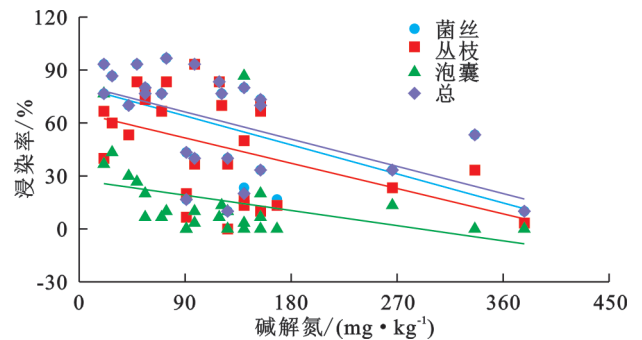


图 3 根系侵染率随根际土壤碱解氮含量升高的散点分布  
Fig. 3 Scatter plots of root mycorrhizal colonization rates with increasing alkali-hydrolyzable nitrogen content in rhizospheric soil

### 3 讨论

本研究发现,在赣州章贡区、会昌县、信丰县选取的 3 种赣南脐橙品种根系中均检测到 AM 真菌侵染,其中,章贡区脐橙根系的菌丝侵染率、丛枝侵染率及总侵染率显著高于信丰县与会昌县,而品种差异对侵染率的影响较小。这一结果与赣南地区土壤化学性质的空间异质性密切相关。章贡区作为集约化管理区<sup>[20]</sup>,其土壤碱解氮含量显著低于信丰县,而低氮环境可能更有利于 AM 真菌的定殖<sup>[21]</sup>。已有研究表明,宿主植物在氮素匮乏条件下会通过上调菌根共生相关基因的表达,增加碳分配至菌根<sup>[22-23]</sup>以换取氮、磷等养分。例如,Yoneyama 等<sup>[24]</sup>发现,氮缺乏会促进植物根系分泌独脚金内酯,从而刺激 AM 真菌

孢子萌发和菌丝生长。此外,章贡区土壤虽处于酸性范围,但可能未达到抑制菌根共生的阈值。Smith等<sup>[25]</sup>研究发现,AM真菌对土壤pH值的适应性较强,在pH值4.0~7.5范围内均能正常侵染,但过度酸化(pH值<4.0)可能破坏菌丝网络的结构。信丰县部分区域土壤pH值较高,但其高碱解氮含量可能抵消pH值的潜在正效应,导致侵染率下降。区域间土壤

有效磷含量的差异未对AM真菌侵染率产生显著影响,这可能与磷素的双重作用有关<sup>[26-28]</sup>。一方面,磷素充足时,植物对菌根的依赖性降低,减少碳分配至菌根,另一方面,磷素匮乏会通过诱导菌根共生相关基因增强共生效率。本研究区域的有效磷含量普遍较高(均值>70 mg/kg),可能削弱磷素对菌根共生的调控作用,导致其与侵染率无显著相关性。

表5 根系侵染率与碱解氮的直接和间接途径系数

Table 5 Direct and indirect path coefficients between root mycorrhizal colonization rates and alkali-hydrolyzable nitrogen

Y	碱解氮通过X的间接途径系数				间接途径系数之和	直接途径系数	相关系数
	pH值	有机质	有效磷	速效钾			
菌丝侵染率	0.009	-0.008	-0.042	0.015	-0.026	-0.515	-0.541**
丛枝侵染率	-0.040	0.000	-0.047	0.009	-0.078	-0.396	-0.474*
泡囊侵染率	0.091	-0.013	0.032	0.039	0.149	-0.520	-0.371
总侵染率	0.009	-0.008	-0.042	0.015	-0.026	-0.515	-0.541**

注:\*代表显著相关,\*\*代表极显著相关。

Pearson相关性分析表明土壤碱解氮含量与侵染率呈显著负相关,通径分析进一步发现土壤碱解氮对菌丝、丛枝及总侵染率的直接途径系数(-0.515, -0.396, -0.515)远高于其通过pH值、有机质、有效磷和速效钾的间接途径系数,表明碱解氮是直接影响侵染率,而非间接影响。有研究表明,高氮环境可能导致植物减少对菌根的碳投资。当土壤氮素充足时,植物倾向于通过根系直接吸收氮素,而非依赖菌根交换,从而降低光合产物向菌根的转移量。本研究中,信丰县纽荷尔脐橙根际土壤碱解氮含量高达284.7 mg/kg,其菌丝侵染率仅为27.8%,印证了这一机制。同时,过量氮肥施用可能抑制AM真菌的竞争力。Verbruggen等<sup>[29]</sup>发现,长期高氮输入会减少AM真菌的多样性,并促进腐生真菌和病原菌的增殖,破坏菌根共生的稳定性<sup>[30]</sup>。氮素还可能通过酸化根际微环境(如信丰县部分区域pH值<4.0)间接抑制菌丝生长。此外,独脚金内酯的合成与分泌受氮素水平调控。氮缺乏显著增加独脚金内酯的分泌量,而氮充足时该信号物质减少,导致AM真菌的侵染能力下降。本研究结果中碱解氮与侵染率的负相关性可能与此信号通路的抑制有关。

尽管本研究未发现有效磷与侵染率的直接关联,但通径分析表明有效磷对总侵染率的间接作用最大(通径系数=-0.042)。适量补充磷肥可缓解磷素缺乏对菌根共生的限制,但需避免过量施用导致碳分配失衡。速效钾对侵染率的正效应(通径系数=0.015)提示,钾肥的合理配比可能通过改善根系生理状态间接促进菌根共生。

## 4 结论

AM真菌为植物提供矿物质营养以及逆境条件下给予保护,对植物的生长作用非常大,其与植物能否形成良好的共生关系是AM真菌发挥作用的关键,但这种共生关系的形成极易受土壤环境的影响。脐橙属于柑橘类,根毛较少,其水分和养分吸收依赖AM真菌。因此研究脐橙与AM真菌的共生关系具有重要意义。本研究发现赣南脐橙根系菌丝侵染率、总侵染率和丛枝侵染率在不同区组间具有显著差异,而泡囊侵染率在不同区组间差异不显著。脐橙根系侵染率的区域差异高于品种差异,章贡区脐橙根系侵染率高于其他区域。此外,通径分析发现土壤因子中碱解氮含量与根系AM真菌菌丝、丛枝、总侵染率呈显著负相关,且其直接途径系数远高于间接途径系数,说明赣南脐橙根系与AM真菌共生关系的形成受土壤碱解氮的直接调控,因此,对赣南脐橙施用肥料的过程中应尽量降低N元素的施用,以便AM真菌更好地发挥作用。

### 参考文献(References):

- [1] Yu X X, Du C, Wang X J, et al. Multivariate analysis between environmental factors and fruit quality of citrus at the core navel orange-producing area in China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1510827.
- [2] Wang Q Y, Li T, Liao Q, et al. Multi-scale analysis of supply-demand relationship of ecosystem services and zoning management in a key ecological-restoration city (Ganzhou) of China [J]. *Natural Resources Research*, 2024, 33(4): 1871-1891.

- [3] Pooja P, Tallapragada S, Saini S, et al. Exploring the potential of arbuscular mycorrhizal fungi as biofertilizers to enhance growth, nutrient acquisition and yield in chickpea genotypes under salinity stress[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25:5782-5797.
- [4] Russell M, Řezáčová V, Miller K S, et al. Common mycorrhizal networks improve survival and mediate facilitative plant interactions among *Andropogon gerardii* seedlings under drought stress [J]. *Mycorrhiza*, 2025, 35(1):8.
- [5] Lyu H Q, Yu A Z, Chai Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi mediate soil N dynamics, mitigating N<sub>2</sub>O emissions and N-leaching while promoting crop N uptake in green manure systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 957:177592.
- [6] Ji L L, Tan W F, Chen X H. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in calcareous regosol under well-watered and drought stress conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185:1-8.
- [7] Wang J Y, Wei H, Huang J, et al. Soil aggregate stability and its response to overland runoff-sediment transport in karst peak-cluster depressions [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620:129437.
- [8] Ulrich U, Zeiger M, Fohrer N. Soil structure and herbicide transport on soil surfaces during intermittent artificial rainfall[J]. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2013, 57(1):135-155.
- [9] Wang M G, Wang Z B, Guo M J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and herbivore infestation depend on availability of soil water and nutrients[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1101932.
- [10] Sun H W, Tao J Y, Liu S J, et al. Strigolactones are involved in phosphate- and nitrate-deficiency-induced root development and auxin transport in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(22):6735-6746.
- [11] Mori N, Nishiuma K, Sugiyama T, et al. Carlactone-type strigolactones and their synthetic analogues as inducers of hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Phytochemistry*, 2016, 130:90-98.
- [12] Yang G W, Liu N, Lu W J, et al. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and soil phosphorus availability influences plant community productivity and ecosystem stability [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(4):1072-1082.
- [13] 史雪荣, 黄宏亮, 季杭翔, 等. 氮和生物炭添加对毛竹林 AMF 侵染率和孢子密度的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(4):165-172.
- Shi X R, Huang H L, Ji H X, et al. Effects of nitrogen and biochar addition on arbuscular mycorrhizal fungi colonization rate and spore density in moso bamboo plantations[J]. *Forest Research*, 2023, 36(4):165-172.
- [14] 孙颖盈, 王欣雨, 祝晨琳, 等. 光照强度和氮素形态对棉花-丛枝菌根真菌共生体碳氮代谢的影响[J]. *微生物学杂志*, 2024, 44(3):32-39.
- Sun Y Y, Wang X Y, Zhu C L, et al. Effects of light intensity and nitrogen forms on carbon and nitrogen metabolism in cotton arbuscular mycorrhizal fungi symbionts[J]. *Journal of Microbiology*, 2024, 44(3):32-39.
- [15] Shao L L, Yan P X, Ye S Q, et al. Soil organic matter and water content affect the community characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi in Helan mountain, an arid desert grassland area in China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15:1377763.
- [16] Feng Z W, Liu X D, Qin Y Q, et al. Cooperation of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria to facilitate the host plant growth dependent on soil pH[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14:1116943.
- [17] McMillen B G, Juniper S, Abbott L K. Inhibition of hyphal growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus in soil containing sodium chloride limits the spread of infection from spores[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13):1639-1646.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根真菌及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Liu R J, Li X L. *Application of mycorrhizal fungi* [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [20] 林贵富. 章贡区蔬菜产业发展现状与前景分析[J]. *基层农技推广*, 2021, 9(5):86-88.
- Lin G F. Analysis on the development status and prospect of vegetable industry in Zhanggong District [J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2021, 9(5):86-88.
- [21] 陈伟. 丛枝菌根真菌对楸树生长和氮素吸收与利用的影响及相关机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- Chen W. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nitrogen uptake and utilization of *Catalpa bungei* and related mechanisms[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [22] Zhu Y G, Michael Miller R. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems[J]. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(9):407-409.
- [23] Smith S E, Smith F A. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth[J]. *Mycologia*, 2012, 104(1):1-13.
- [24] Yoneyama K, Xie X N, Kusumoto D, et al. Nitrogen deficiency as well as phosphorus deficiency in sorghum promotes the production and exudation of 5-deoxystrigol, the host recognition signal for arbuscular mycorrhizal fungi and root parasites[J]. *Planta*, 2007, 227(1):125-132.