

第 2 年宿根蔗根围土壤丛枝菌根真菌多样性研究

王 晟^{1,2}, 徐欣婷^{2,3}, 杨春华^{2,3}, 覃晓娟², 康贻豪², 张金莲^{2*}, 招礼军^{1*}, 陈廷速²

1. 广西大学林学院, 广西南宁 530004; 2. 广西农业科学院微生物研究所, 广西南宁 530007; 3. 广西大学农学院, 广西南宁 530004

摘 要: 本研究旨在探究不同施肥水平下第 2 年宿根蔗根围土壤丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌的多样性, 为 AM 真菌在甘蔗上的应用提供理论依据。本研究以甘蔗品种桂糖 29 号 (GT29) 和桂糖 58 号 (GT58) 为试验材料, 设 4 个施肥水平: 0.0 kg/hm² (A)、562.5 kg/hm² (B)、1125.0 kg/hm² (C)、2250.0 kg/hm² (D)。研究结果表明: 不同施肥水平对 GT29 的根系菌根侵染率有显著影响, 而对 GT58 影响不显著。随着施肥水平的提高, AM 真菌多样性和丰富度均显著下降。不同施肥水平的 GT29 根围土壤中共获得 185 个 OTUs, GT58 根围土壤中共获得 175 个 OTUs。不同施肥水平下 2 个甘蔗品种根围土壤的优势 AM 真菌均为球囊霉属 (*Glomus*)。在 OTU 水平对不同施肥水平甘蔗根围土壤 AM 真菌群落进行差异物种分析, 发现 GT29 的 2 个差异物种均为球囊霉属, 而 GT58 中的 3 个差异物种均为近明球囊霉属 (*Claroideoglomus*)。经 Mantel 检验, 发现土壤中的 Ca、Mg 含量与 4 个 AM 真菌属之间均呈极显著正相关, 土壤 pH 与 3 个 AM 真菌属间也呈显著正相关。因此, 过量施肥会使增产效果大幅降低, 且造成土壤酸化及磷元素过剩, 同时使甘蔗根围土壤 AM 真菌群落组成改变, 多样性和丰富度降低, 但品种间有差异; 适量施肥有助于丰富土壤 AM 真菌的多样性, 促进甘蔗产业的可持续发展。

关键词: 甘蔗; 宿根蔗; 根围土壤; 丛枝菌根真菌; 多样性

中图分类号: S566.1; S154.3 文献标志码: A

Study on the Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere Soil of the Second Ratoon Sugarcane

WANG Sheng^{1,2}, XU Xinting^{2,3}, YANG Chunhua^{2,3}, QIN Xiaojuan², KANG Yihao², ZHANG Jinlian^{2*}, ZHAO Lijun^{1*}, CHEN Tingsu²

1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 3. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

Abstract: This paper aimed to explore the arbuscular mycorrhizal (AM) fungal community structure in the rhizosphere soil of ratoon sugarcane in the second year under different fertilization levels, and provide a theoretical basis for the application of AM fungi in sugarcane. In this study, sugarcane varieties GT29 and GT58 were used as the materials. Four fertilization levels were set: 0.0 kg/hm² (A), 562.5 kg/hm² (B), 1125.0 kg/hm² (C), 2250.0 kg/hm² (D). The results showed that different fertilization levels had significant effects on the root mycorrhizal infection rate of GT29, but had no significant effect on GT58. With the increase of fertilization level, the diversity and richness of AM fungi decreased significantly. With the increase of fertilization level, the diversity and richness of AM fungi decreased significantly. A total of 185 AM fungi OTUs were detected in GT29 and 175 in GT58. The dominant AM fungi in the rhizosphere soil of the two varieties under different fertilization levels were *Glomus*. The species diversity of AM fungal community in rhizosphere soil under different fertilization levels was analyzed at the OTU level. It was found that the two species of

收稿日期 2024-09-27; 修回日期 2024-11-07

基金项目 广西自然科学基金重点项目 (No. 2019GXNSFDA245013); 广西农业科学院基本科研业务专项 (No. 2023YM96, No. 2021YT097)。

作者简介 王 晟 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土壤微生物。*通信作者 (Corresponding author): 招礼军 (ZHAO Lijun), E-mail: zhjlj-70@163.com; 张金莲 (ZHANG Jinlian), E-mail: zhangjinlian@126.com。

GT29 belonged to the genus *Glomus*, while the three species of GT58 belonged to the genus *Claroidoglomus*. Mantel test showed that the contents of Ca and Mg in soil were significantly positively correlated with the four genera, and the soil pH was also significantly positively correlated with the three genera. Therefore, excessive fertilization will significantly reduce the yield increase effect, cause soil acidification and excess phosphorus, and change the composition, diversity and richness of AM fungi community in sugarcane rhizosphere soil, but the varieties are different; Proper fertilization was helpful to enrich the diversity of soil AM fungi and promote the sustainable development of sugarcane yield.

Keywords: sugarcane; ratoon sugarcane; rhizosphere soil; arbuscular mycorrhizae fungi; diversity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.02.020

甘蔗是最主要的糖料和经济作物，作为 C4 植物，因其高效的光合作用能力而被广泛栽培于热带和亚热带地区^[1]。目前，全球约有 110 个国家和地区种植甘蔗，全球约 80% 的糖和 35% 的乙醇以其为原料，是发展中国家重要的支柱产业之一。我国是世界第三大甘蔗生产国，甘蔗主要种植区分布在广西、云南、广东等地^[2]，其中广西的甘蔗种植面积多达 84.8 万 hm²，占全国甘蔗总种植面积的 65.8% (《中国统计年鉴 2023》)。目前，广西甘蔗生产中存在的主要问题有机械化程度低、健康种苗应用率低、过量施肥、宿根年限短等^[3]。在这些问题中，不合理施肥导致的生产问题越来越突出，不仅造成土壤营养元素失衡^[4]，还破坏了甘蔗根围微环境，严重影响甘蔗产量^[5]。

丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌是一类普遍存在于土壤环境中的微生物，能够与超过 80% 的高等植物的根系形成共生关系^[6]。AM 真菌可以提高宿主植物的抗逆性^[7]，改善土壤团粒结构，修复土壤退化^[8]。广西甘蔗根围土壤有丰富的 AM 真菌资源，目前已经在甘蔗根围土壤中鉴定出 7 科 12 属 24 种 AM 真菌^[9]。土壤中 AM 真菌的孢子密度受土壤环境因子的影响^[10]。研究表明，常规施肥使土壤 AM 真菌的侵染率降低^[11]，而合理施肥可以提高土壤微生物群落的稳定性，并使深层土壤的无机氮积累有效降低^[12]；接种 AM 真菌可以显著促进甘蔗的生长，接种 AM 真菌的甘蔗植株在株高、绿叶数、茎径和根系发达度等方面均表现出明显的优势^[13]；大田甘蔗接种 AM 真菌可以提高土壤 pH，促进甘蔗根系对土壤养分的吸收，使甘蔗增产 10%~24%，同时减少 30% 以上化肥施用量^[14-16]。这为可持续农业生产提供了一种有效的生物技术手段，有助于提高甘蔗产量和质量，减少对化肥的依赖。

在农业生产过程中，AM 真菌易受耕作方式、施肥等因素的影响^[17-18]，但有关宿根蔗根围土壤 AM 真菌与施肥水平关系的研究较少，缺乏长期

合理的施肥指导。因此，本研究旨在探究不同施肥水平对甘蔗根围土壤 AM 真菌多样性的影响，为解决过量施肥造成的养分资源浪费和防治面源污染问题，推动蔗糖产业的可持续发展，利用菌根技术在甘蔗生产方面的应用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘蔗品种为甘蔗优良品种桂糖 58 号 (GT58) 和桂糖 29 号 (GT29)。试验在广西农业科学院科学研究基地试验地 (23°14'N, 108°33'E) 进行。供试土壤基本理化性质：pH 为 5.1，有机质为 32.3 g/kg，全氮为 2.3 g/kg，全磷为 1.8 g/kg，全钾为 10.9 g/kg，水解氮为 52.0 mg/kg，有效磷为 73.2 mg/kg，速效钾为 110 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 田间试验设计采用随机区组设计，设置 6 次重复；5 行小区，行长为 7 m，行距为 1.2 m；不同小区间种植同一品种 3 行甘蔗作为隔离区。由于不同甘蔗品种的分蘖有差异，特别是 GT29 的分蘖非常强，按品种特性，GT58 的下种量为 120 000 芽/hm²，GT29 的下种量为 75 000 芽/hm²。

按广西种植甘蔗普遍采用的施肥量为 1500 kg/hm²，参考近年来甘蔗菌根的大田研究结果^[14-16, 19-21]，设置 4 个不同的施肥水平 (表 1)：0.0 kg/hm²，0% (A)；562.5 kg/hm²，25% (B)；1125.0 kg/hm²，50% (C)；2250.0 kg/hm²，100% (D)。缓释复合肥 N : P : K=17 : 7 : 17 (河北天人化工股份有限公司)。

表 1 试验设置及其编号
Tab. 1 Experimental setup and its No.

品种 Variety	施肥量 Fertilization amount/(kg·hm ⁻²)			
	0	562.5	1125.0	2250.0
GT29	A29	B29	C29	D29
GT58	A58	B58	C58	D58

于2020年1月8日种植新植蔗,研究数据来源于2022年甘蔗种植第3年,即第2年宿根蔗田间试验。宿根蔗管理措施与常规种植相同,2022年3月15日苗期复合肥用量40%,2022年5月18日培土追肥用量60%。

1.2.2 甘蔗农艺性状测定 于2022年4月10日统计甘蔗出芽数,计算出芽率;5月26日调查甘蔗分蘖数,11月26日调查甘蔗有效茎数,12月15日采收甘蔗称重,并从中选3行选取20株长势相近的甘蔗测量株高、茎径和锤度。

1.2.3 土壤和根系样品采集 参考 KANG 等^[21]的甘蔗土壤和根系采样方法,于2022年12月27日以五点取样法采集0~30 cm土层的甘蔗根系及根围土壤。

1.2.4 土壤理化性质测定 参照《土壤农化分析》^[22]测定土壤pH、有机质(SOM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、钙(Ca)、速效钾(AK)、镁(Mg)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)含量等甘蔗根围土壤的理化性质。

1.2.5 甘蔗根系菌根侵染率测定 对甘蔗根系染色,观察AM真菌在侵染甘蔗根系后形成的定殖结构。参考廖楠等^[23]的甘蔗根系菌根检测方法对根系菌根进行染色。在显微镜下观察染色的根系,并记录根系AM真菌菌丝、丛枝、泡囊等定殖结构,对照菌根侵染与泡囊丰度分级标准,参考TROVELOT等^[24]的方法,利用Mycocale软件计算菌根侵染率、侵染强度、相对侵染强度、相对丛枝丰度和丛枝丰度。

1.2.6 土壤AM真菌高通量测序 参考KANG等^[21]的方法对土壤AM真菌进行高通量测序。

1.3 数据处理

使用Trimmomatic 0.38软件对原始测序序列进行质控,使用Flash 1.2.11序列进行双端拼接,采用UPARSE 11工具根据97%相似度聚类成不同的操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU),获得的OTU代表序列在MaarjAM数据库中进行比对,以RDP Classifier法对OTUs进行注释,分类置信度阈值设为0.7。剔除在门水平上未分类的序列,按最小样本序列数抽平,使用抽平后的OTU表进行后续数据分析。使用Mothur软件进行 α 多样性分析,以Shannon指数和Simpson指数表征物种多样性,以Ace指数和Chao1指数表征物种丰富度;使用Bray-Curtis距离计算 β 多

样性距离矩阵,以偏最小二乘法判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)反映不同施肥处理对甘蔗根围AM真菌群落的影响,以Adonis检验不同施肥处理之间AM真菌群落的差异显著性;采用单因素方差分析与Duncan's法比较各处理间农艺性状的差异显著性;采用Mantel方法分析土壤理化性质与不同AM真菌属之间的相关性,采用Pearson相关性分析土壤因子间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同施肥水平对宿根蔗根围土壤理化性质的影响

不同施肥水平显著影响GT29和GT58的根围土壤pH,各处理间均存在显著差异($P<0.05$),随着施肥量的增多,GT29根围土壤pH由7.57(A29)逐渐降至4.47(D58),GT58根围土壤pH由6.97(A58)逐渐降至4.18(D58)。不同施肥水平对GT29和GT58根围土壤的Ca含量均有显著影响,在GT29中,D29与B29间无显著差异,而D29分别比A29和C29显著降低62.10%和44.49%;在GT58中,B58、C58、D58分别比A58显著降低36.74%、39.79%和50.68%。不同施肥水平显著影响GT29和GT58根围土壤的Mg含量,在GT29中,A29与C29间无显著差异,B29和D29分别比A29显著降低29.70%和51.75%;在GT58中,B58、C58、D58分别比A58显著降低31.54%、32.06%和43.42%。不同施肥水平显著影响GT29根围土壤的碱解氮、速效钾和Mn含量,D29的碱解氮含量比A29显著提高97.29%,C29的速效钾含量比B29显著提高56.50%,C29、D29的速效钾含量分别比B29显著降低52.99%和60.76%;而不同施肥水平对GT58碱解氮、速效钾含量无显著影响。不同施肥水平对GT58根围土壤的有效磷、Cu和Fe的影响显著,D58的有效磷含量分别比A58、B58、C58显著提高387.39%、318.64%和151.82%,C58的Cu含量比A58显著降低4.32%,D58的Fe含量分别比A58、B58、C58显著提高56.11%、36.78%和50.50%;而不同施肥水平对GT29有效磷、Cu、Fe含量无显著影响。不同施肥水平对GT29和GT58根围土壤的有机质、Zn含量无显著影响(表2)。总体而言,过量施肥使甘蔗土壤pH降低,Ca和Mg含量显著降低,有效磷含量严重过剩。

表 2 不同施肥水平 GT29 与 GT58 根围土壤的理化性质
Tab. 2 Soil physical and chemical properties of GT29 and GT58 at different fertilization levels

品种 Variety	编号 No.	pH	含量 Content									
			有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	钙 Ca /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	镁 Mg /(mg·kg ⁻¹)	铜 Cu /(mg·kg ⁻¹)	铁 Fe /(mg·kg ⁻¹)	锰 Mn /(mg·kg ⁻¹)	锌 Zn /(mg·kg ⁻¹)
GT29	A29	7.57 ^a	27.67 ^a	129.50 ^b	3.69 ^a	563.60 ^a	139.51 ^{ab}	36.93 ^a	0.71 ^a	37.55 ^a	18.94 ^{ab}	0.89 ^a
	B29	6.18 ^b	30.01 ^a	230.13 ^{ab}	5.00 ^a	384.79 ^{ab}	108.09 ^b	25.96 ^{bc}	0.71 ^a	43.74 ^a	25.46 ^a	1.02 ^a
	C29	5.08 ^c	26.30 ^a	217.88 ^{ab}	8.20 ^a	484.05 ^a	169.16 ^a	30.24 ^{ab}	0.55 ^a	38.13 ^a	11.97 ^b	0.86 ^a
	D29	4.47 ^d	27.48 ^a	255.50 ^a	17.56 ^a	213.61 ^b	140.14 ^{ab}	17.82 ^c	0.77 ^a	52.59 ^a	9.99 ^b	0.91 ^a
GT58	A58	6.97 ^a	26.15 ^a	138.25 ^a	3.41 ^b	643.23 ^a	127.18 ^a	48.00 ^a	0.74 ^a	32.47 ^b	27.12 ^a	0.86 ^a
	B58	5.47 ^b	33.62 ^a	164.50 ^a	3.97 ^b	406.88 ^b	101.61 ^a	32.86 ^b	0.59 ^{ab}	37.06 ^b	23.28 ^a	0.83 ^a
	C58	4.41 ^c	28.90 ^a	173.25 ^a	6.60 ^b	387.36 ^b	128.05 ^a	32.61 ^b	0.56 ^b	33.67 ^b	16.44 ^a	0.80 ^a
	D58	4.18 ^d	28.48 ^a	183.75 ^a	16.62 ^a	317.26 ^b	148.71 ^a	27.16 ^b	0.63 ^{ab}	50.69 ^a	17.54 ^a	0.97 ^a

注：同列不同小写字母表示同一品种间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in the same variety ($P<0.05$).

2.2 不同施肥水平对宿根蔗农艺性状和产量的影响

施肥水平的提高能够在一定程度上增加甘蔗产量和有效茎数，但当过量施肥（D 处理）时，与 C 处理相比甘蔗产量增加不显著，即 D29（99.86 t/hm²）与 C29（94.93 t/hm²）、D58（120.12 t/hm²）与 C58（110.44 t/hm²）间的甘蔗产量均无显著差异；不同施肥水平显著影响 GT58

的茎径，C58 的茎径比 B58 降低 6.01%，而 C58 与 A58、D58 间无显著差异；施肥处理（B、C、D）的甘蔗分蘖数显著高于未施肥（A）甘蔗的分蘖数；不同施肥水平对 GT29 和 GT58 的出芽率、株高、锤度无显著影响（表 3）。因此，适当施肥可以提高甘蔗产量，但是过量施肥（D）使生产的投入产出比大幅降低，不适宜甘蔗的可持续生产。

表 3 不同施肥水平 GT29 与 GT58 的农艺性状
Tab. 3 Agronomic traits of GT29 and GT58 at different fertilization levels

品种 Variety	编号 No.	出芽率 Sprouting rate/%	分蘖数 Number of tillers	每公顷有效茎数 Effective stems per hectare	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	株高 Plant height/cm	茎径 Stalk diameter/mm	锤度 Brix/°BX
GT29	A29	84.17 ^a	130.56 ^b	18 425.79 ^c	62.34 ^c	279.43 ^{ab}	26.32 ^a	28.33 ^a
	B29	89.83 ^a	172.00 ^a	22 235.71 ^b	84.18 ^b	297.39 ^a	26.14 ^a	28.22 ^a
	C29	92.45 ^a	177.22 ^a	22 314.68 ^b	94.93 ^{ab}	303.30 ^a	26.82 ^a	29.62 ^a
	D29	93.78 ^a	188.83 ^a	26 296.43 ^a	99.86 ^a	290.71 ^{ab}	27.43 ^a	27.67 ^a
GT58	A58	53.22 ^a	96.22 ^b	13 081.75 ^c	78.79 ^c	287.00 ^a	28.38 ^{ab}	27.16 ^a
	B58	54.45 ^a	111.94 ^a	16 732.94 ^b	99.92 ^b	301.41 ^a	29.28 ^a	27.38 ^a
	C58	59.78 ^a	112.89 ^a	17 301.59 ^{ab}	110.44 ^{ab}	304.43 ^a	27.52 ^b	27.32 ^a
	D58	60.00 ^a	126.17 ^a	18 955.16 ^a	120.12 ^a	298.08 ^a	28.80 ^{ab}	26.70 ^a

注：同列不同小写字母表示同一品种间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in the same variety ($P<0.05$).

2.3 不同施肥水平对宿根蔗根系 AM 真菌感染情况的影响

不同施肥水平显著影响 GT29 的根系菌根感染率，B29、C29 比 A29 和 D29 显著提高 5.00%；不同施肥水平对 GT29 和 GT58 的根系菌根感染强度、相对感染强度、相对丛枝丰度和丛枝丰度均无显著影响（表 4）。说明施肥量对不同甘蔗品种根系 AM 真菌的影响有一定差异。

2.4 不同施肥水平对宿根蔗根际土壤 AM 真菌群落结构的影响

对第 2 年宿根蔗土壤根围样品进行测序并初步筛选，共获得 1 512 798 条序列，各样本序列数在 36 391~74 687 之间，平均长度为 217 bp。以序列数 34 561 进行抽平，各样本稀释曲线均达到平台期，表明各处理的土壤样本测序数据合理。以抽平后的序列划分 OTUs，第 2 年宿根蔗土壤根

围 AM 真菌隶属 11 科 13 属 34 种。其中，在属水平主要为球囊霉属（*Glomus*）、近明球囊霉属（*Claroideoglomus*）、无梗囊霉属（*Acaulospora*）、盾巨孢囊霉属（*Scutellospora*）（图 1）。在 2 个甘

蔗品种的不同施肥水平中，优势属均为球囊霉属，并且随着施肥水平的提高，球囊霉属的丰度不断增加，在 D29 和 D58 水平下的丰度最高，分别达 95.11%和 97.39%。

表 4 不同施肥水平 GT29 和 GT58 根系菌根的侵染情况
Tab. 4 Mycorrhizal colonization in sugarcane roots at different fertilization levels %

品种 Variety	编号 No.	侵染率 Colonization rate	侵染强度 Colonization intensity	相对侵染强度 Relative colonization intensity	相对丛枝丰度 Relative arbuscular abundance	丛枝丰度 Arbuscular abundance
GT29	A29	94.17 ^b	41.62 ^a	43.84 ^a	19.38 ^a	9.45 ^a
	B29	99.17 ^a	48.04 ^a	48.23 ^a	28.52 ^a	14.81 ^a
	C29	99.17 ^a	41.19 ^a	41.54 ^a	32.28 ^a	13.79 ^a
	D29	94.17 ^b	31.09 ^a	32.74 ^a	20.73 ^a	7.04 ^a
GT58	A58	96.67 ^a	34.11 ^a	35.21 ^a	9.72 ^a	3.28 ^a
	B58	96.67 ^a	37.03 ^a	38.33 ^a	5.22 ^a	1.88 ^a
	C58	94.17 ^a	33.09 ^a	35.42 ^a	8.20 ^a	2.56 ^a
	D58	89.17 ^a	32.81 ^a	36.23 ^a	12.77 ^a	4.17 ^a

注：同列不同小写字母表示同一品种间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in the same variety ($P<0.05$).

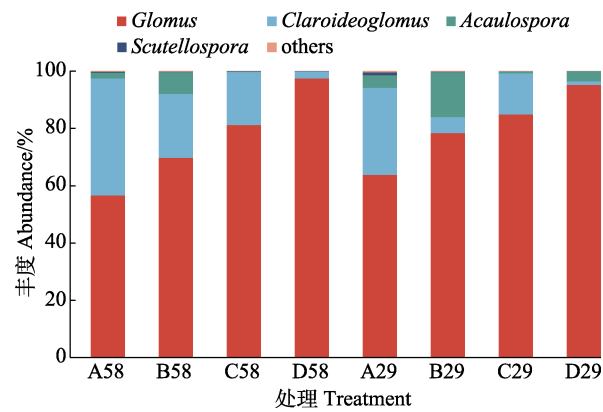


图 1 不同施肥水平 AM 真菌群落属水平的相对丰度
Fig. 1 Relative abundance of AM fungal communities at genus level at different fertilization levels

2.5 不同施肥水平对宿根蔗根围土壤 OTUs 分布的影响

不同施肥水平的 GT29 根围土壤中，共获得 185 个 OTUs，所有处理共有 OTUs 数量为 49 个，占总数的 26.49%，A29、B29、C29 和 D29 各处理独有的 OTU 数量分别 60、6、5、4 个（图 2A）。不同施肥水平的 GT58 根围土壤中，共获得 175 个 OTUs，所有处理共有的 OTUs 数量为 51 个，占总数的 29.14%，A58、B58、C58 和 D58 各处理独有的 OTUs 数量分别 32、8、12、12 个（图 2B）。

2.6 不同施肥水平对宿根蔗根围土壤 AM 真菌多样性的影响

不同施肥水平显著影响甘蔗根围土壤 AM 真菌群落的 α 多样性。在 GT29 中，C29、D29 水平

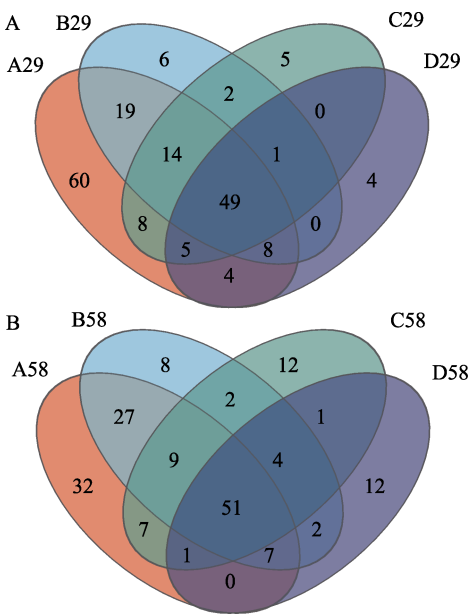


图 2 不同施肥水平 GT29 (A) 和 GT58 (B) 根围土壤的 OTUs 分布

Fig. 2 Distribution of OTUs in GT29 (A) and GT58 (B) rhizosphere soil at different fertilization levels

下 Ace 指数、Chao1 指数均极显著低于 A29，C29 水平下 Shannon 指数显著低于 A29，D29 水平下 Shannon 指数极显著低于 A29，而不同施肥水平下 Simpson 指数差异不显著（图 3）；在 GT58 中，D58 处理的 Ace 指数、Chao1 指数均显著低于 A58，C58 处理的 Ace 指数也显著低于 A58，而不同施肥水平的 Shannon 指数和 Simpson 指数均差异不显著（图 4）。总之，甘蔗未施肥处理的 AM

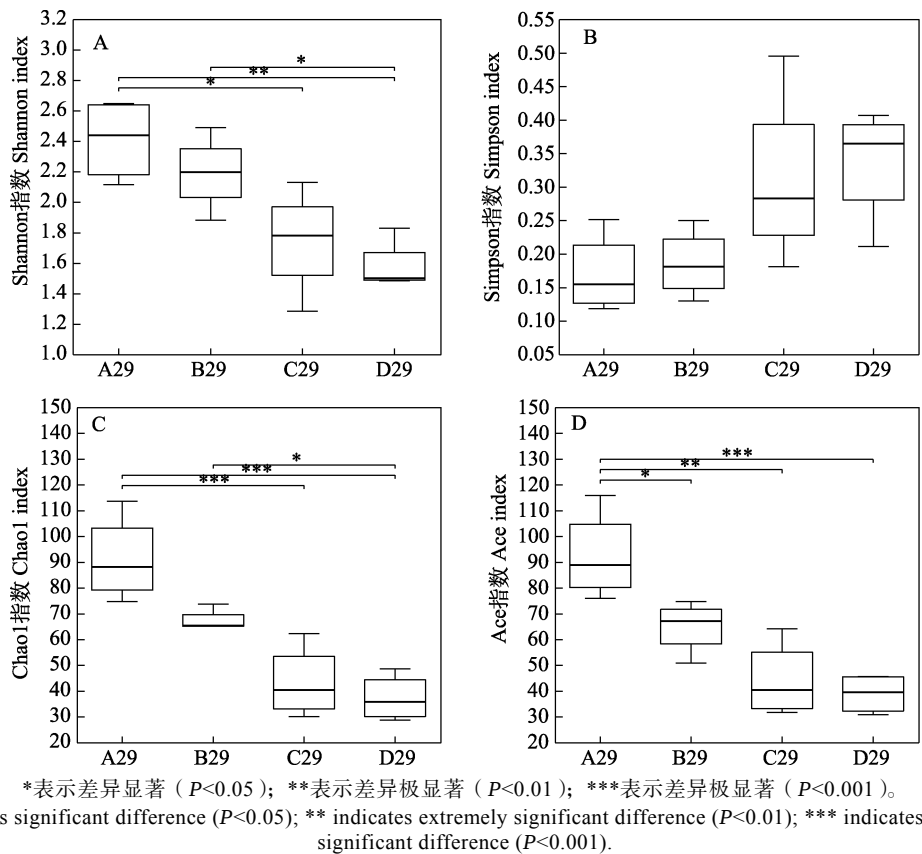


图 3 不同施肥水平 GT29 根围土壤 AM 真菌群落多样性

Fig. 3 Diversity of AM fungal in GT29 rhizosphere soil at different fertilization levels

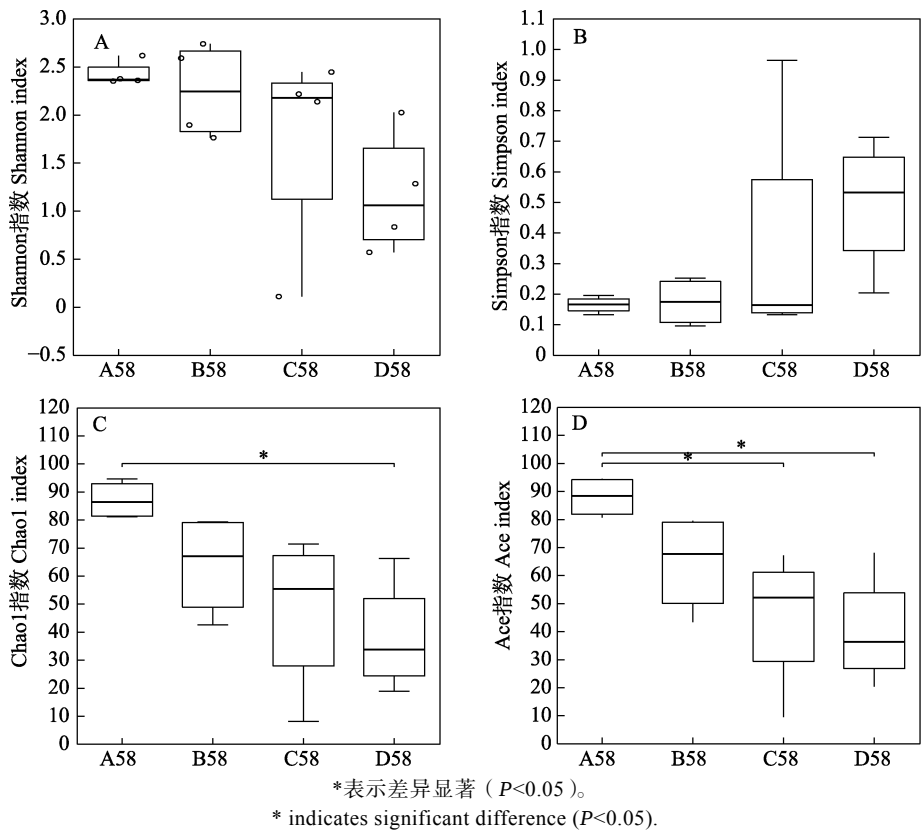


图 4 不同施肥水平 GT58 根围土壤 AM 真菌多样性

Fig. 4 Diversity of AM fungal in GT58 rhizosphere soil at different fertilization levels

真菌多样性和丰富度最高,且随着施肥水平的提高,多样性与丰富度呈逐渐下降的趋势,过量施肥使2个品种甘蔗根围土壤的AM真菌多样性和丰富度均显著降低。

2.7 不同施肥水平对宿根蔗根围土壤AM真菌群落组成的影响

对GT29根围土壤AM真菌群落进行PLS-DA分析表明,第1主成分(COMP1)解释了变量方差的23.92%,第2主成分(COMP2)解释了变量方差的11.36%;A29组内AM真菌物种组成差异较大,B29、C29与D29组内AM真菌物种组成较相似;A29的4个重复在X轴与Y轴上均有

较大偏移,表明该组内各样本间物种组成存在差异,而C29与D29组间差异较小(图5A)。

对GT58根围土壤AM真菌群落进行PLS-DA分析表明,第1主成分(COMP1)解释了变量方差的16.65%,第2主成分(COMP2)解释了变量方差的11.61%;A58与B58组内AM真菌物种组成差异较大,C58与D58组内AM真菌物种组成相似;A58有1个重复在X轴和Y轴上与其余3个重复出现偏移,表明出现偏移的重复与组内的其他3个重复之间的物种组成存在差异;B58的4个重复均出现偏移,表明该组内物种组成存在差异;C58与D58组间差异也较小(图5B)。

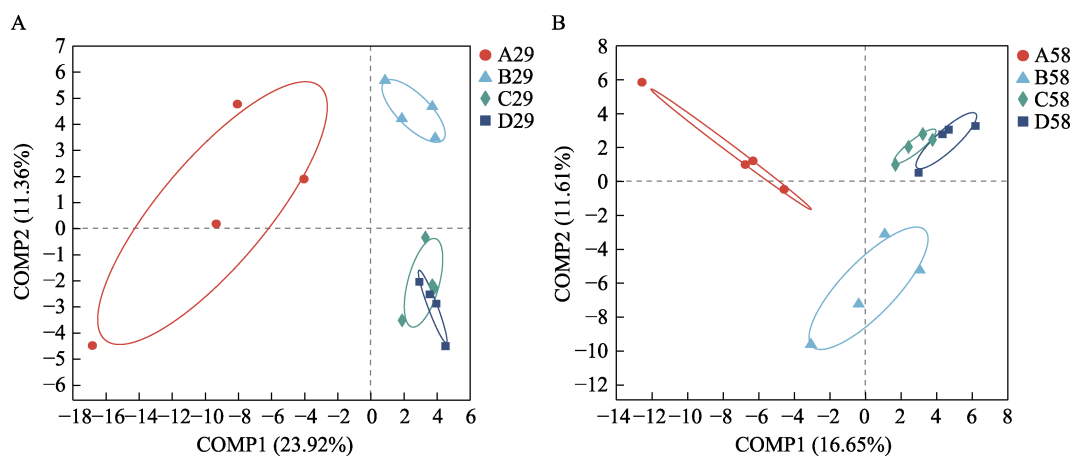


图5 不同施肥水平GT29(A)和GT58(B)根围土壤AM真菌群落的PLS-DA图

Fig. 5 PLS-DA plot of AM fungal community in GT29 (A) and GT58 (B) rhizosphere soil at different fertilization levels

2.8 不同施肥水平宿根蔗根围土壤差异物种分析

对不同施肥水平下GT29与GT58第2年宿根蔗的根围AM真菌群落从门水平到OTU水平上进行线性判别分析,寻找不同处理中与造成AM真菌群落差异显著相关的物种。结果表明,不同施肥水平下GT29的根围AM真菌群落在OTU水平上的2个差异物种为OTU139、OTU177(图6),均属于球囊霉属。在OTU139中,A29(0.20%)与B29(1.76%)间呈显著差异($P<0.05$);在OTU177中,A29(5.71%)与C29(49.14%)、D29(49.14%)间呈极显著差异($P<0.01$)。不同施肥水平下GT58的根围AM真菌群落在OTU水平上的3个差异物种为OTU94、OTU175和OTU193,均属于近明球囊霉属。OTU94仅存在于A58(2.08%)中;在OTU175中,A58(25.97%)与D58(1.19%)间呈显著差异($P<0.05$);在

OTU193中,A58(6.13%)与D58(0.51%)间呈显著差异(图7)。

2.9 土壤环境因子与AM真菌群落的相关性分析

将根围土壤AM真菌群落中的4个属(球囊霉属、近明球囊霉属、盾巨孢囊霉属、梗囊霉属)与所有土壤环境因子进行Mantel检验(图8),结果表明,土壤中的Ca、Mg含量与4个AM真菌属之间均呈极显著正相关,土壤pH与3个AM真菌属间呈显著正相关。其中,球囊霉属与土壤pH、Ca、Mg、Fe含量呈极显著正相关($P<0.01$);近明球囊霉属与土壤有机质和Fe含量呈显著正相关($P<0.05$),与土壤Ca、Mg、Mn含量呈极显著正相关($P<0.01$);盾巨孢囊霉属和无梗囊霉属与土壤pH、AP、Fe含量呈显著正相关($P<0.05$),与土壤Ca、Mg、Mn含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

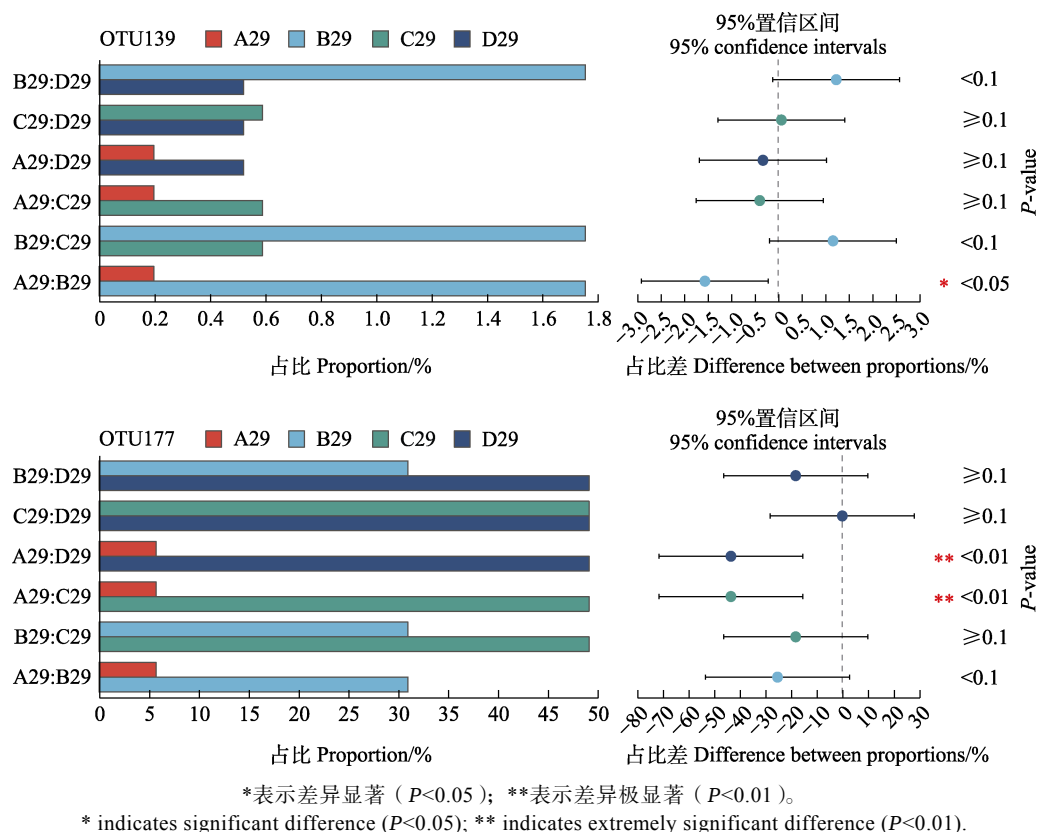


图 6 不同施肥水平 GT29 根围土壤 AM 真菌群落差异物种

Fig. 6 Differential species of AM fungal community in GT29 rhizosphere soil at different fertilization levels

3 讨论

由于甘蔗具有生长周期长、营养需求量大的特点,合理施肥对甘蔗的生长至关重要。肥料中适当的氮、磷、钾比例可以促进甘蔗的光合作用,从而促进糖分的积累^[25]。在前期的新植甘蔗研究中,GT29 在不同施肥水平下的产量无明显差异,而 GT58 在 C58 和 D58 处理的产量显著高于 A58, C58 与 D58 处理间的产量无显著差异^[20]。已有研究表明,肥料达到最佳配比前,每增加 1 kg 肥料,甘蔗产量可增加 62.7 kg,但过量施肥后增产效果明显降低^[26],与本研究结果一致。本研究发现随着施肥水平的提高,GT29 和 GT58 的产量均表现出不同程度的增长, B29 和 C29 处理的产量分别为 84.18 t/hm² 和 94.93 t/hm², C58 和 D58 处理的产量分别为 110.44 t/hm² 和 120.12 t/hm²,但当施肥量超过一定限度后,即使显著增加施肥量,甘蔗产量并无显著性差异,这说明过量施肥后甘蔗对肥料的利用率大幅下降,同时过量的营养元素无法被充分利用,不仅浪费了资源,还造成了土壤酸化、环境污染。孔垂豹等^[27]研究表明,当施肥量减半时,AM 真菌对甘蔗的促生作用显著提

高。综上,由于甘蔗对营养元素的利用率不同,长期过量施用复合肥,造成田间土壤营养元素比例失衡^[28],从而使甘蔗产量不及预期。

不同施肥水平显著影响土壤理化性质,从而间接影响土壤 AM 真菌群落^[29]。本研究发现,不同施肥水平影响 GT29 的根系菌根侵染率, B29 和 C29 处理的菌根侵染率显著高于 A29 和 D29 处理,而对 GT58 的菌根侵染率却无显著影响,说明不同施肥水平对甘蔗根系菌根侵染率的影响程度因品种而异。本研究中随着施肥量的增加,2 个甘蔗品种根围土壤 AM 真菌多样性和丰富度均呈逐渐下降的趋势,最高施肥水平 (D29, D58) 的 AM 真菌多样性和丰富度显著低于未施肥水平 (A29, A58),表明不同施肥量可以改变土壤 AM 真菌的多样性,长期施用复合肥能够显著降低 AM 真菌的多样性^[30-31]。此外,与 GT29 相比,GT58 在 B58 和 A58 处理的 AM 真菌多样性和丰富度并无显著性差异,说明这种变化趋势也会因甘蔗品种而不同。这种差异可能是由于宿主植物不同,引起 AM 真菌对施肥水平表现出不同的敏感程度^[32]。

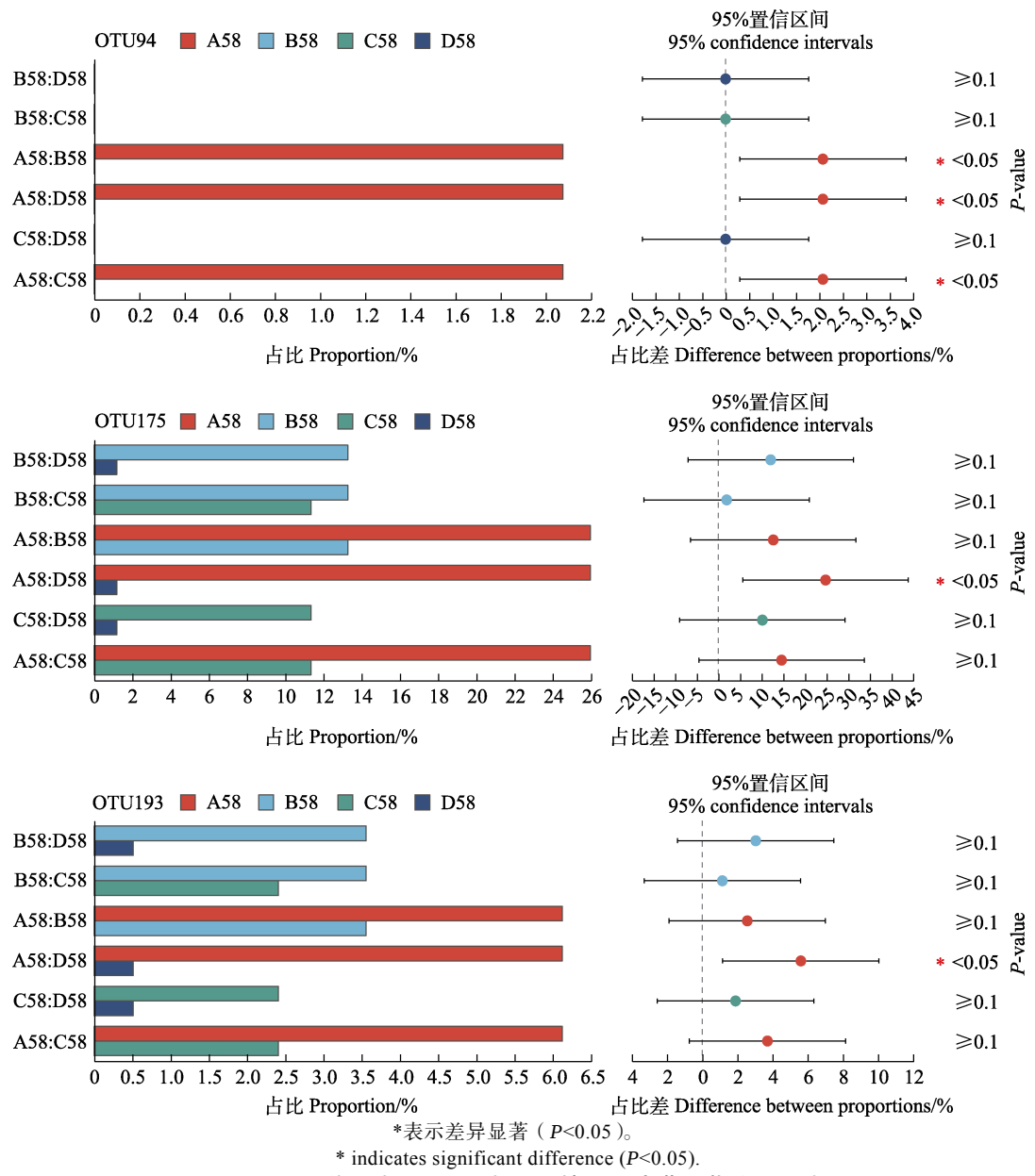


图 7 不同施肥水平 GT58 根围土壤 AM 真菌群落差异物种

Fig. 7 Differential species of AM fungal community in GT58 rhizosphere soil at different fertilization levels

土壤 AM 真菌群落组成会因施肥水平的不同而发生改变。本研究通过物种组成分析发现，不同施肥水平下 2 个甘蔗品种根围土壤 AM 真菌群落的优势菌属均为球囊霉属。试验前期研究的新植甘蔗根围土壤 AM 真菌群落的优势属也为球囊霉属，相对丰度均达 93% 以上^[21]。李锦婷^[33]的研究也同样发现，在喀斯特 53 个土壤样品中，AM 真菌的优势属均为球囊霉属。球囊霉属能够在农田土壤的 AM 真菌群落中占据优势，是因为其可以从菌丝体碎片或菌根中定殖，能够适应多变的外界环境，且产孢率高于其他属，在竞争中具有优势^[34-35]。本研究还发现，随着施肥水平的提高，

球囊霉属在 AM 真菌群落中的占比也逐渐增加，在最高施肥水平 D29 和 D58 中分别达到 95.11% 和 97.39%。球囊霉属占比的这种变化趋势与冯重阳^[11]的研究结果相同，是因为与其他 AM 真菌相比，球囊霉属对土壤养分的提高更加敏感。土壤中的球囊霉属真菌能够促进植物对氮、磷的吸收，其分泌的球囊霉素还可以增加土壤有机质含量，并改善土壤孔隙水气情况^[36]，这可能受球囊霉属真菌占比提高的影响，增强了甘蔗对土壤中氮、磷养分的吸收，促进了甘蔗的增产。本研究对不同施肥水平下甘蔗根围土壤 AM 真菌的差异物种进行分析，发现 GT29 中的差异物种均为球囊霉

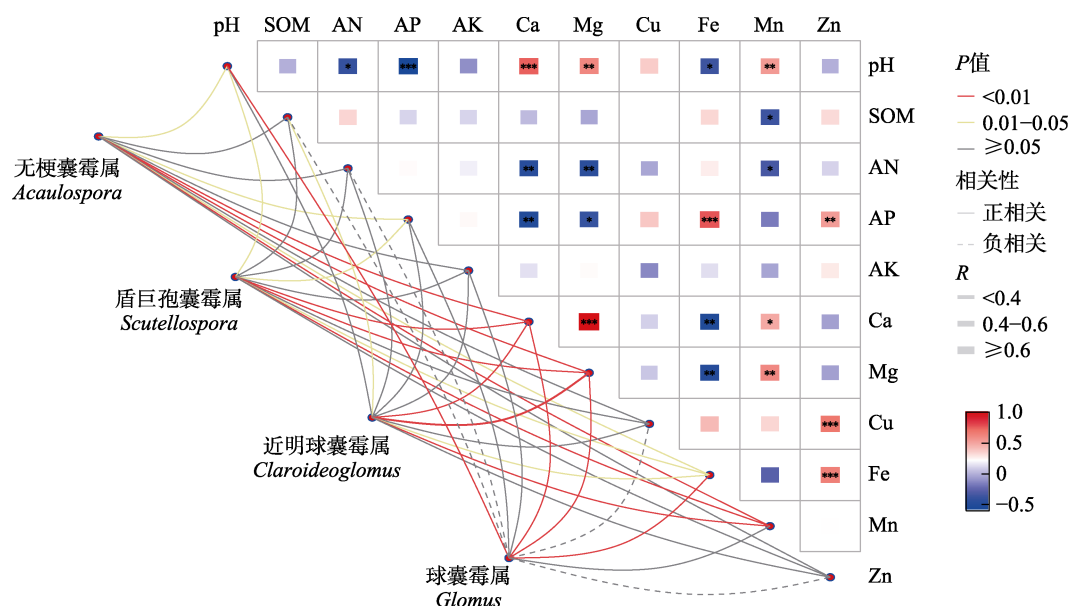


图 8 土壤环境因子与 AM 真菌属群落的相关性

Fig. 8 Correlation between soil environmental factors and AM fungal community

属, 而 GT58 中的差异物种均为近明球囊霉属, 说明不同品种甘蔗也会对 AM 真菌群落组成产生不同的影响。

通过对甘蔗根围土壤和 AM 真菌群落的相关性分析发现, 土壤中的 Ca、Mg 含量与 AM 真菌的 4 个优势属之间均呈极显著正相关, 说明土壤中的 Ca、Mg 含量很大程度上决定着优势属的占比, 从而对 AM 真菌群落组成产生影响。刘忆等^[37]也研究发现, 接种 AM 真菌能够显著增加植物对 Ca、Mg 的吸收。此外, 本研究中的土壤 pH 与 AM 真菌的优势属间也呈显著正相关, 与李佳雨等^[38]的研究结果一致。广西大部分蔗区经过 30 多年的连作, 由于南方红壤普遍为酸性, 加之甘蔗种植过程中存在过量施用化肥, 大部分蔗区土壤 pH 在 4.0~5.5 之间^[39]。本研究施肥处理前的土壤 pH 为 7.0~7.5 (预试验测定), 而过量施化肥处理 (D 处理), 在经过 3 a 的种植后, D29 和 D58 的 pH 分别降至 4.47 和 4.18, 说明连续过量施化肥使土壤酸化。相关研究还发现, AM 真菌可以通过多种途径调节土壤 pH, 使酸性土壤 pH 提高^[40]。说明土壤 pH 的降低, 是由增加化肥施用量和减少土壤 AM 真菌多样性与丰富度共同作用引起的。

试验前期对新植甘蔗的研究结果表明, 无梗囊霉属和盾巨孢囊霉属能够对甘蔗的农艺性状产生积极影响, GT29 在不同施肥水平下的产量和根围土壤 AM 真菌多样性与丰富度并未表现出显著差异^[21], 而 GT29 宿根二年蔗的上述指标均表现

出显著差异。说明 GT29 的根围土壤 AM 真菌在试验初期还能够一定水平下保持稳定, 但随着施肥年限的增加, 土壤环境发生较大变化后, 这种维持稳定的能力受到破坏, 从而影响群落结构, 进而对甘蔗产量产生影响。具体的作用机制还需要进一步研究。

综上所述, 不同施肥量通过影响土壤的理化性质, 进而对土壤微生物群落产生影响。过量施用化肥使土壤酸化, pH 大幅降低, 土壤磷元素累积过剩, 影响根围土壤 AM 真菌丰度占比, 降低 AM 真菌多样性和丰富度, 不利于甘蔗生长。因此, 甘蔗生产上适当施用化肥不仅可以提高产量, 还可以在保证甘蔗产量的前提下, 维持根围土壤环境和 AM 真菌群落的相对稳定, 有利于甘蔗产业的可持续发展。

致谢 感谢广西农业科学院甘蔗研究所杨荣仲研究员和周会研究员对文稿的修改。

参考文献

- [1] 李杨瑞, 杨丽涛. 20 世纪 90 年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展[J]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1469-1476.
LI Y R, YANG L T. New developments in sugarcane industry and technologies in China since 1990s[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(5): 1469-1476. (in Chinese)
- [2] 王学清, 张静. 中国甘蔗产业支持政策及相关发展思路[J]. 农业展望, 2018, 14(1): 43-48, 53.

- WANG X Q, ZHANG J. Support policy and relevant development ideas of China's sugarcane industry[J]. *Agricultural Outlook*, 2018, 14(1): 43-48, 53. (in Chinese)
- [3] 李杨瑞. 广西甘蔗生产中的主要问题及几点建议[J]. *广西糖业*, 2020(4): 3-7.
- LI Y R. The main problems in the sugarcane production in Guangxi and a few suggestions[J]. *Guangxi Sugar Industry*, 2020(4): 3-7. (in Chinese)
- [4] 杨承礼. 甘蔗需肥特点与施肥技术分析[J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(12): 46-48.
- YANG C L. Analysis of fertilizer requirements and fertilization techniques for sugarcane[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, 13(12): 46-48. (in Chinese)
- [5] 易芬远, 赖开平, 叶一强, 韦茂春, 马就庆. 甘蔗的营养生理与肥料施用研究现状[J]. *化工技术与开发*, 2014, 43(2): 25-28, 31.
- YI F Y, LAI K P, YE Y Q, WEI M C, MA J Q. Nutrition physiology of sugarcane and fertilizer application research status[J]. *Technology & Development of Chemical*, 2014, 43(2): 25-28, 31. (in Chinese)
- [6] 刘润进, 陈应龙. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- LIU R J, CHEN Y L. *Mycorrhizology*[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [7] MATHUR S, SHARMA M P, JAJOO A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 2018, 180: 149-154.
- [8] 任义芳, 贾明强, 刘润进. 菌根真菌与其他生物联合修复污染与退化土壤的效应与机制[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(4): 235-241.
- LER Y F, JIA M Q, LIU R J. Effects and mechanisms of combined remediating polluted and degraded soil with mycorrhizal fungi and other living organisms[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2014, 31(4): 235-241. (in Chinese)
- [9] 陈廷速, 李松, 张金莲, 覃晓娟, 刘红坚, 谭裕模, 袁照年, 李杨瑞. 丛枝菌根(AM)真菌对甘蔗根系侵染研究[J]. *西南农业学报*, 2011, 24(5): 1757-1760.
- CHEN T S, LI S, ZHANG J L, QIN X J, LIU H J, TAN Y M, YUAN Z N, LI Y R. Research on the formation of arbuscular mycorrhizae in sugarcane[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(5): 1757-1760. (in Chinese)
- [10] 陶光耀, 聂鲜钰, 吉皮马黎, 刘锡. 三种自然土壤下 AM 真菌物种组成及其与土壤因子的关系研究[J]. *山地农业生物学报*, 2024, 43(5): 58-63.
- TAO G Y, NIE X Y, JIPI M L, LIU X. The study of relationship between AM fungi composition and soil factors in three different natural soil types[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2024, 43(5): 58-63. (in Chinese)
- [11] 冯重阳. 培土和施肥水平对甘蔗根围土壤丛枝菌根真菌群落的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- FENG C Y. The influence of hilling and fertilizer levels on arbuscular mycorrhiza fungi community of sugarcane rhizosphere soils[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [12] 李婷, 葛安辉, 孙志梅, 刘四义, 张丽梅, 韩雪梅. 山药不同施肥管理下土壤碳氮养分和微生物群落分异特征[J/OL]. *农业环境科学学报*, 1-15. (2024-05-08)[2024-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240508.1858.006.html>.
- LI T, GE A H, SUN Z M, LIU S Y, ZHANG L M, HAN X M. Differential characteristics of soil carbon and nitrogen nutrients and microbial community in yam fields under different fertilization practices[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1-15. (2024-05-08)[2024-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240508.1858.006.html>. (in Chinese)
- [13] 陈廷速, 张金莲, 李松, 覃晓娟, 汪茜, 王灿琴, 吴圣进, 谭裕模, 杨荣仲, 李杨瑞. 广西东南沿海蔗区根际土壤 AM 真菌多样性研究[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(1): 57-61.
- CHEN T S, ZHANG J L, LI S, QIN X J, WANG Q, WANG C Q, WU S J, TAN Y M, YANG R Z, LI Y R. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in sugarcane fields of south-eastern Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(1): 57-61. (in Chinese)
- [14] 陈廷速, 李松, 王维赞, 邢颖, 张金莲, 黄玉溢, 卢文祥, 谭裕模. 甘蔗大田接种 AM 菌剂效应研究[J]. *甘蔗糖业*, 2013(3): 6-10.
- CHEN T S, LI S, WANG W Z, XING Y, ZHANG J L, HUANG Y Y, LU W X, TAN Y M. Influence of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi on sugarcane grown in field[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2013(3): 6-10. (in Chinese)
- [15] 伍荣冬, 谭彩丽, 李廷化, 雷崇华, 韦金凡, 余凤良, 汪茜, 谭裕模, 陈廷速. 大田接种丛枝菌根真菌对甘蔗品种“福农41号”生长的影响[J]. *甘蔗糖业*, 2015(4): 20-23.
- WU R D, TAN C L, LI T H, LEI C H, WEI J F, YU F L, WANG Q, TAN Y M, CHEN T S. Influence of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi on sugarcane variety Funong 41 grown in field[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2015(4): 20-23. (in Chinese)
- [16] 卢李威, 卢文祥, 汪茜, 伍荣冬, 谭裕模, 韦勤丽, 张金莲, 陈廷速. AM 菌剂对甘蔗新品系“柳城07-500”的大田生长效应分析[J]. *中国糖料*, 2016, 38(2): 5-7.
- LU L W, LU W X, WANG Q, WU R D, TAN Y M, WEI Q

- L, ZHANG J L, CHEN T S. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on sugarcane species "Liucheng 07-500" grown in field[J]. Sugar Crops of China, 2016, 38(2): 5-7. (in Chinese)
- [17] 田霞, 王媛, 张雨, 郭蓉, 马琨. 旱作区农田土壤AM真菌对长期有机无机施肥的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(2): 297-308.
- TIAN X, WANG Y, ZHANG Y, GUO R, MA K. Response of arbuscular mycorrhiza fungi to long-term organic and inorganic fertilization in agricultural soils in dry farming regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(2): 297-308. (in Chinese)
- [18] 高萍, 闫飞扬, 蒙程, 李芳, 段廷玉. 黄土高原不同耕作措施下 AM 真菌的多样性[J]. 草业科学, 2016, 33(10): 1917-1923.
- GAO P, YAN F Y, MENG C, LI F, DUAN T Y. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi under different agricultural practices in Loess Plateau in China[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 1917-1923. (in Chinese)
- [19] 冯重阳, 汪茜, 龙艳艳, 张金莲, 廖楠, 谭裕模, 黄京华, 陈廷速. 不同施肥水平对甘蔗生长及根际土壤微生物的影响[J]. 甘蔗糖业, 2016(3): 5-9.
- FENG C Y, WANG Q, LONG Y Y, ZHANG J L, LIAO N, TAN Y M, HUANG J H, CHEN T S. Influence of different fertilization levels on sugarcane growth and rhizosphere soil microbial[J]. Sugarcane and Canesugar, 2016(3): 5-9. (in Chinese)
- [20] 伍荣冬, 韦金凡, 龙艳艳, 雷崇华, 谭裕模, 李廷化, 陈廷速. 丛枝菌根真菌对宿根甘蔗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2648-2652.
- WU R D, WEI J F, LONG Y Y, LEI C H, TAN Y M, LI T H, CHEN T S. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi on ratoon sugarcane grown in field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(11): 2648-2652. (in Chinese)
- [21] KANG Y H, JIANG S T, NONG Y J, SONG J, LI D P, WEN Y Y, XU J, CHEN T S, ZHANG J L, LI Y R. Response of soil arbuscular mycorrhizal fungal community to chemical fertilization in sugarcane[J]. Peer Journal, 2024, 12: 17610.
- [22] 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 edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [23] 廖楠, 张金莲, 李冬萍, 汪茜, 龙艳艳, 谭裕模, 李松, 陆祖军, 陈廷速. 甘蔗根系内生真菌染色方法探讨[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 814-819.
- LIAO N, ZHANG J L, LI D P, WANG Q, LONG Y Y, TAN Y M, LI S, LU Z J, CHEN T S. Method to stain endophytic fungi in sugarcane roots[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(4): 814-819. (in Chinese)
- [24] TROVELOT A, KOUGH J L, GIANINAZZI-OEARSON V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un systeme racinaire. Recherche des methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle[A]. Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae, Paris: INRA Press, 1986: 217-221.
- [25] 周桂凤, 管弦, 刘朋朋, 查应惠, 和敏, 字文强, 王宇航, 刘修勇, YIN X H. 不同施肥量对甘蔗产量及品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(8): 1401-1405.
- ZHOU G S, GUAN X, LIU P P, ZHA Y H, HE M, ZI W Q, WANG Y H, LIU X Y, YIN X H. Effect of different fertilizers on sugarcane yield and quality[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(8): 1401-1405. (in Chinese)
- [26] 李国良, 何兆桓, 王继华, 苞梅, 顾艳, 胡伟芳, 杨少海. 甘蔗氮磷钾化肥效应研究[J]. 广东农业科学, 2020, 47(3): 75-80.
- LI G L, HE Z H, WANG J H, BAO M, GU Y, HU W F, YANG S H. Effects of application of N, P and K chemical fertilizers on sugarcane[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(3): 75-80. (in Chinese)
- [27] 孔垂豹, 庞孜钦, 张才芳, 刘强, 胡朝华, 肖以杰, 袁照年. 不同施肥水平下丛枝菌根真菌对甘蔗生长及养分相关基因共表达网络的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 860-872.
- KONG C B, PANG Z Q, ZHANG C F, LIU Q, HU C H, XIAO Y J, YUAN Z N. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on sugarcane growth and nutrient related gene co-expression network under different fertilization levels[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(4): 860-872. (in Chinese)
- [28] 李进, 段婷婷, 邓凯, 景占鑫, 蔺中, 梁燕秋, 邓焯楠, 高宇, 郑超. 不同品种甘蔗生长对氮肥的响应与利用[J]. 热带作物学报, 2019, 40(4): 649-656.
- LI J, DUAN T T, DENG K, JING Z X, LIN Z, LIANG Y Q, DENG Z N, GAO Y, ZHENG C. Responses of sugarcane varieties growth to nitrogen fertilizer application and related use efficiency[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(4): 649-656. (in Chinese)
- [29] ZENG H L, YU L L, LIU P, WANG Z G, CHEN Y, WANG J W. Nitrogen fertilization has a stronger influence than cropping pattern on AMF community in maize/soybean strip intercropping systems[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 167: 104034.
- [30] WILLIAMS A, MANOHARAN L, ROSENSTOCK N P, OLSSON P A, HEDLUND K. Long-term agricultural fertilization alters arbuscular mycorrhizal fungal community composition and barley (*Hordeum vulgare*) mycorrhizal carbon and phosphorus exchange[J]. New Phytologist, 2016,

- 213(2): 874-885.
- [31] BABALOLA B J, LI J, WILLING C E, ZHENG Y, WANG Y L, GAN H Y, LI X C, WANG C, ADAMS C A, GAO C, GUO L D. Nitrogen fertilisation disrupts the temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae but not spore density and community composition in a wheat field[J]. *New Phytologist*, 2022, 234(6): 2057-2072.
- [32] 胡静, 罗充, 吴涛. 刺梨丛枝菌根真菌的侵染特征及其种类鉴定[J]. *贵州农业科学*, 2015, 43(9): 82-86.
- HU J, LUO C, WU T. Infection characteristics and species identification of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Rosa roxburghii* Tratt[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43(9): 82-86. (in Chinese)
- [33] 李锦婷. 喀斯特土壤AM真菌多样性与土壤性质和植物功能性状的相关性[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- LI J T. The correlation between AM fungal diversity in karst soil and soil properties and plant functional traits[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023. (in Chinese)
- [34] 唐慧敏, 倪晓臻, 王颖超, 张雅洁, 朱元刚, 刘慧. 盐碱胁迫对染内生菌和不染菌苇状羊茅根系丛枝菌根真菌群落多样性和组成的影响[J]. *菌物学报*, 2022, 41(8): 1268-1278.
- TANG H M, NI X Z, WANG Y C, ZHANG Y J, ZHU Y G, LIU H. Effects of soil saline-alkali stress on arbuscular mycorrhizal fungal community diversity and composition of roots of endophyte-infected and endophyte-free tall fescue[J]. *Mycosystema*, 2022, 41(8): 1268-1278. (in Chinese)
- [35] 王玉丹. 松嫩盐碱草地鹅绒委陵菜根围AM真菌多样性及功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- WANG Y D. Research on diversity and function of AM fungi from the rhizosphere of *Potentilla anserine* in Songnen salt-alkali grassland[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [36] BEHIE S W, BIDOCHKA M J. Nutrient transfer in plant-fungal symbioses[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, 19(11): 734-740.
- [37] 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.
- LIU Y, YUAN L. Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on nodulation, yield and quality of medicago sativa[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1292-1298. (in Chinese)
- [38] 李佳雨, 林家怡, 裴晨羽, 黄林, 黄锐洲, 唐光大. 桉树种植对林地土壤丛枝菌根真菌群落结构及多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2723-2731.
- LI J Y, LIN J Y, FEI C Y, HUANG L, HUANG R Z, TANG G D. Diversity and structure of the soil arbuscular mycorrhizal fungal community are altered by *Eucalyptus* plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2723-2731. (in Chinese)
- [39] 陈廷速, 张金莲, 龙艳艳. 广西甘蔗根际土壤AM真菌形态图谱[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2015.
- CHEN T S, ZHANG J L, LONG Y Y. The morphologies of rhizosphere of arbuscular mycorrhizal fungi of sugarcane in Guangxi[M]. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishing House Co. Ltd., 2015. (in Chinese)
- [40] 李佳齐, 王晓慧, 何鑫, 宋福强. 丛枝菌根真菌提高植物耐酸碱能力及改善土壤pH应用潜力[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(34): 123-129.
- LI J Q, WANG X H, HE X, SONG F Q. Improvement of plant acid and alkali resistance and soil pH application potential by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(34): 123-129. (in Chinese)