

不同施氮水平对橡胶苗根系及根际真菌群落的影响

邱凌轩^{1,2#}, 陶均¹, 林清火^{2,3}, 张婧旻², 金东奇², 罗微^{2*}, 张培松^{2*}

(1. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737 中国; 2. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571101 中国; 3. 儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测站, 海南儋州 571737 中国)

摘要: 本研究旨在探究不同施氮水平对橡胶苗根系生长以及根系与根际真菌群落结构的影响, 明确适宜的施氮浓度, 为橡胶苗健康生长及壮苗提供参考依据。选用橡胶树热研 7-33-97 籽苗为试验材料, 开展室外盆栽试验。本试验以不施氮(CK)、低氮(LN, 0.32 g·kg⁻¹)、中氮(MN, 0.64 g·kg⁻¹)、高氮(HN, 1.28 g·kg⁻¹)为处理, 测量根系基本形态指标及根系与根际微生物真菌群落物种组成与多样性变化特征。研究结果表明: 不同施氮水平对橡胶苗根系与根际物种组成有显著影响。根系真菌方面, 低氮水平(LN)有利于维持担子菌门和糙孢孔目优势地位, 而高氮水平(HN)使子囊菌门与粪壳菌目显著提高。根际真菌方面, 低中氮水平(LN-MN)增加了未分类真菌与肉座菌目的相对丰度, 高氮水平则显著抑制了担子菌门与环囊菌目的丰度。LN 处理(0.32 g·kg⁻¹)显著提升了根系及根际真菌 α 多样性, 其根系真菌的 Shannon 指数和 Simpson 指数分别达到 3.22 和 0.904, 较 CK 显著提高了 15.84% 和 12.26%。LN 处理根际真菌 Shannon(3.13)和 Simpson(0.914)指数最大, 较 CK 提升了 18.11% 和 16.46%。LN 处理的根系真菌 Chao1(385.97)和 ACE(391.43)指数均达峰值, 较 CK 显著增加了 1.16 倍和 1.27 倍。根际真菌 Chao1 和 ACE 指数在 LN 处理后仍较 N0 显著提高了 72.01% 和 68.61%。不同施氮水平和不同区域位置对橡胶苗根系与根际真菌 β 多样性均存在极显著差异, 且不同施氮水平影响更显著; 不同施氮水平导致根系与根际真菌 β 多样性均存在极显著差异, 且在根际真菌中的影响大于根系真菌。主坐标分析表明, 施氮处理(LN-HN)的菌群呈现趋同性聚类, 而不施氮对照处理(CK)形成独立分支; 根际真菌群落对氮素响应敏感性高于根系真菌, 表现为 R^2 差值达 6.07%。本研究推荐 LN 处理(0.32 g·kg⁻¹), 有助于提高根系与根际真菌群落多样性与丰富度, 以优化橡胶苗根际真菌群落结构。

关键词: 施氮水平; 橡胶苗; 根系与根际真菌; 物种组成; 群落多样性

中图分类号: S714.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)03-0439-12

邱凌轩, 陶均, 林清火, 等. 不同施氮水平对橡胶苗根系及根际真菌群落的影响[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(3): 439–450. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250098 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20250098



天然橡胶是重要的战略资源和工业原料^[1]。目前全国橡胶树(*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.)种植面积达 116.1 万 hm², 位居世界第四^[2], 海南岛是中国天然橡胶核心种植区。天然橡胶是橡胶树体内合成的一种天然高分子化合物, 因为其卓越的耐磨、耐腐蚀、耐热等特性, 被广泛应用于高端科技、国防和民用领域, 对海南经济发展乃至国防建设中具有不可替代的战略地位^[3-5]。而橡胶树的苗期管理影响后续橡胶树的生长和产量^[6], 因此橡胶幼苗的培育是天然橡胶产业发展的基础^[7]。橡胶幼苗的生长状态直接决定橡胶苗移栽的存活率和

开割后的产胶潜力^[8]。

氮是植物生长的必需元素^[9], 植物通过吸收氮素来合成体内所需的氨基酸和蛋白质, 以促进自身的生长^[10]。培养基质中氮素含量影响着橡胶树的生长^[11]。氮素的吸收、利用和分配显著影响橡胶树生长、养分吸收、物质代谢及胶乳品质与产量^[12-13]。已有研究证明, 合理施用氮肥可促进橡胶树生长发育、提高产胶量^[14-15], 而不施氮肥、氮肥施用量不足或过多, 都会影响橡胶幼苗的正常生长发育^[16]。因此合理施用氮肥对于促进作物优质高产具有重要意义^[17-18]。氮素除了可直接影响植



收稿日期: 2025-07-16

修回日期: 2025-09-02

基金项目: 中国热带农业科学院橡胶研究所省部重点实验室及科学观测实验站开放课题(No. RRI-KLOF202205)

*第一作者: 邱凌轩(1998—), 男, 海南大学热带农林学院 2021 级硕士研究生。E-mail: 928813945@qq.com

*通信作者: 罗微(1968—), 男, 研究员, 博士生导师。研究方向: 土壤肥料与植物营养。E-mail: rkylw@163.com
张培松(1983—), 男, 助理研究员。研究方向: 热带农业信息技术应用。E-mail: peisongzps@163.com

物生长发育外,还可以通过改变土壤微生态环境间接调控植物生长;微生物群落是土壤生态系统的重要组成部分,在调节生态系统功能中起关键作用^[19]。真菌作为微生物的重要组成部分,可以改变土壤内部养分情况,进而影响植物的生长^[20]。因此,研究不同施氮水平下橡胶苗根系与根际真菌群落特征差异及其与土壤养分的关系,探明不同施氮浓度下橡胶苗根系生长与根系及根际真菌变化是否存在显著相关性,将为橡胶苗合理施氮提供科学依据。

真菌群落对于植物根系发育与幼苗生长有重要影响,施氮可能改变真菌群落结构。有研究发现,与不施氮处理相比,中氮量处理提高了子囊菌门和担子菌门相对丰度,降低了被孢霉门的相对丰度^[21]。部分真菌能提高作物幼苗根系活力、根冠比及地上部生长指标,促进根系生长^[22]。也有研究发现,真菌显著促进作物幼苗叶片与根系生物量的积累,增强植物的光合作用,进而促进幼苗生长,提高其发展潜力^[23]。真菌群落多样性及物种组成的变化也直接或间接反映了土壤养分循环和生态系统平衡的实时状态^[24]。然而,目前的研究大多关注施氮对土壤微生物的影响规律,对于特定重要经济林木,如橡胶树根系及根际真菌微生物群落不同施氮水平下的响应机制尚不明晰,有待深入研究。本研究通过室外盆栽试验,设置4个不同氮素浓度梯度处理,分析随着施氮水平的提升,橡胶苗根系与根际真菌群落多样性、物种组成变化情况,阐明基质中养分含量及根系生长与微生物群落之间的相关性,探究橡胶苗在椰糠基质培养下的适宜氮素浓度,为橡胶苗健康生长及壮苗提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

1.1.1 试验地点 本研究试验于2023年4月20日至2023年7月20日在海南岛儋州市那大镇中国热带农业科学院试验场橡胶树籽苗芽接示范基地(19°30'8" N, 109°29'40" E)进行。

1.1.2 试验材料 供试材料为橡胶树籽苗芽接示范基地内温室砂床生长3个月龄、炼苗完成且长势一致的橡胶树幼苗,品系为‘热研7-33-97’,采用盆栽培育方式,使用基质为椰糠(广州启信环境科

技有限公司),每盆中含干椰糠0.5 kg,椰糠的全氮、全磷和全钾含量分别为0.62%、0.03%、0.66%。缓苗1个月后进行试验处理。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 早期研究发现,当土壤施氮量高于0.08 g·kg⁻¹时,侧根数开始增加,当施氮量在0.64~1.28 g·kg⁻¹时,侧根数达到最大量,但高于此质量浓度侧根数量则迅速下降^[25]。鉴于椰糠基质作为1种有机栽培基质,其物理结构(如孔隙度、持水性)和化学性质(如阳离子交换量CEC、本底养分矿化速率)与传统土壤存在一定差异,但目前鲜有针对椰糠基质氮肥施用的研究。因此,本研究在设计施氮量时,参考在土壤栽培体系中研究同类作物氮素需求的文献范围,采用单因素4水平设计,以不施氮肥为对照(CK),另设3个施氮水平处理,分别为低氮(LN, 0.32 g·kg⁻¹)、中氮(MN, 0.64 g·kg⁻¹)、高氮(HN, 1.28 g·kg⁻¹)。采用水肥方式施肥,氮肥用尿素(N≥46%,海洋石油富岛有限公司),磷肥和钾肥用磷酸二氢钾(P₂O₅≥52%, K₂O≥34%,海南儋州),每个处理磷钾肥施用量相同,均为0.5 g·kg⁻¹;每个处理3次重复,每个重复10盆,共30株橡胶苗;每株苗每2天浇水100 mL。

1.2.2 样品采集与处理 施肥处理后第90天进行整株橡胶苗及根际椰糠基质的采集,每个氮素梯度处理随机采集3株橡胶苗,使用灭菌不锈钢剪刀沿茎基部切断植株,通过抖落法收集距根系表面0~3 mm的根际基质,将5 g新鲜根际基质及部分根系分装至无菌冻存管,立即用液氮速冻,之后转移至-80℃超低温冰箱存放,用于测量微生物指标。盆栽所用的椰糠基质是将同一处理的3株苗培养基质混匀,按四分法取500 g椰糠样品装入自封袋带回实验室。

(1)根系形态指标:利用纯水清洗干净根系表面的附着椰糠基质,用吸水纸吸干表面水分,利用WinRHIZO(杭州万深检测科技有限公司,浙江)图形分析软件测定橡胶幼苗根系根长、根体积、根表面积等根系形态指标,具体操作如下:将橡胶苗根系均匀铺在装有少量纯水的根系扫描仪扫描盘中,避免橡胶根系交叉及重叠,扫描图片设定分辨率为300 ppi,扫描面积长宽分别为50、30 cm,扫描完成图片用WinRHIZO图形分析软件测量根系形态指标。

(2)将椰糠基质 70 °C 恒温烘干至恒重后用磨样机磨成粉末,用于养分含量的测量。磨好的粉末称取 0.06 ~ 0.07 g 利用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法+AA3 流动注射分析仪法测定样品的氮、磷含量, H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法+火焰光度计法测量样品的钾含量^[26]。

(3)根际微生物样品处理: 将上述处理后的无菌冻存管中, 挑出橡胶苗根系放入保温盒中进行保存, 去除椰糠基质中的其他植物根系、动物残骸及杂质, 20 目筛网(孔径 0.85 mm)过筛处理, 然后将样品混合均匀, 全部保存在无菌离心管中。低温运至实验室置入干冰后送至上海生工生物工程股份有限公司进行测序, 通过 Illumina Mi Seq 平台进行等摩尔和配对测序。

(4)根系微生物样品处理: 将上一步处理的橡胶苗根系在实验室用无菌刷轻轻刷去根系表层附着的椰糠基质, 将根系置于无菌离心管中, 浸没于无菌 PBS 溶液, 180 r·min⁻¹ 清洗 20 min; 用无菌镊子取出根系组织, 将根系再次置于无菌离心管中加入无菌 PBS 溶液, 180 r·min⁻¹ 清洗 20 min; 取出根系组织, 将根系再次置入无菌离心管中加入无菌 PBS 溶液, 超声波洗涤 10 min (160 W, 30 s/30 s)。将 3 次洗涤液置于无菌离心管中, 用 12 000 g 离心 10 min, 收集沉淀并置于-80 °C 冰箱保存, 将根表微生物取样后的根系用无菌棉吸干水分, 放入离心管中; 后将保存沉淀及根系无菌离心管放入保温盒中并置入干冰后送至上海生工生物工程股份有限公司进行测序, 通过 Illumina MiSeq 平台进行等摩尔配对测序。

1.3 数据处理 采用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据统计, 运用统计软件 R v3.4.2 中“vagen”包的 Bray-Curtis 距离算法对细化后的 OTU 数据进行主坐标分析(PCoA)、置换多元方差分析(PERMANOVA) ($P < 0.001$), 确定不同施氮水平下根系及根际真菌 β 多样性, 揭示不同氮水平和不同区域对橡胶苗真菌落差异的解释度及显著性。应用 R 中“vagen”包进行 Mantel 分析不同氮水平真菌群落与橡胶苗根系形态指标及椰糠基质养分的关系, 确定对根系及根际真菌群落有较大影响的指标。橡胶苗根系及根际真菌 α 多样性指标(香农指数等)通过 SPSS v17.0 中用 Duncan 检验进行方差分析 ($P < 0.05$) 检验处理效果。最后用 R 中“ggplot2”包进行数据可视化作图。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对椰糠培养橡胶苗根系基本形态指标的影响 不同施氮水平对橡胶苗根系形态指标影响较大(表 1), 其中 CK 处理根长最长, 达 823.30 cm, 较 HN 处理增加 18.51%。根系表面积在 CK 处理最大, 达 176.09 cm², 较 HN 处理提升 26.36%。根体积随着施氮量增加, 根体积持续下降, 在 CK 处理最大(9.38 cm³), 其中 LN、MN、HN 处理较 CK 处理分别显著下降 28.15%、34.89%、40.91%。综上所述, 不同施氮水平显著影响橡胶苗根系形态, 随着施氮水平的增大, 根系形态指标均呈下降趋势, 其中高氮处理对根系生长产生强烈抑制作用。

表 1 不同施氮水平下橡胶苗根系基本形态指标

Tab. 1 Effects of different nitrogen treatments on basic morphological traits of the root system in rubber budded seedlings

处理 Treatments	根长/cm Root length	根表面积/cm ² Root surface area	根体积/cm ³ Root volume
CK	(823.30±99.97) ^a	(176.09±13.82) ^a	(9.38±0.60) ^a
LN	(819.97±103.21) ^a	(149.53±17.58) ^a	(6.74±1.13) ^b
MN	(811.32±168.54) ^a	(165.54±22.25) ^a	(6.11±0.45) ^b
HN	(694.72±93.28) ^a	(139.36±12.67) ^a	(5.54±0.59) ^b

注: 同一列中字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters within the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), similarly hereinafter.

2.2 不同施氮水平对椰糠培养橡胶苗椰糠基质养分含量的影响 由表 2 可知, 椰糠的钾含量受施氮水平的影响较小, 椰糠的氮含量随施氮水平的增大而上升, 在 HN 处理最大(1.12%), 分别较 CK、LN、MN 处理显著增加 51.35%、45.46% 和 12%。椰糠的磷含量随施氮水平的增加呈不断下降趋势, 在 CK 处理最高(0.07%), CK 较 HN 显著提升 40%。因此, 随施氮水平的增大, 氮含量不断提高, 磷含量逐渐降低。

2.3 不同施氮水平对椰糠培养橡胶苗根系与根际真菌群落特征的影响

2.3.1 不同施氮水平下椰糠培养橡胶苗根系真菌群落组成 对根系和根际椰糠样品进行高通量测序, 根系和根际的真菌样品共有 1018 个 OTUs。

表 2 不同施氮水平下橡胶苗椰糠基质氮、磷、钾含量

Tab. 2 NPK content in the coconut coir dust substrate in rubber budded seedlings under different nitrogen application levels

处理 Treatments	氮含量/% N content	磷含量/% P content	钾含量/% K content
CK	(0.74±0.02) ^c	(0.07±0.01) ^a	(0.47±0.00) ^a
LN	(0.77±0.01) ^c	(0.07±0.00) ^a	(0.43±0.01) ^b
MN	(1.00±0.05) ^b	(0.06±0.01) ^a	(0.46±0.00) ^a
HN	(1.12±0.01) ^a	(0.05±0.00) ^b	(0.42±0.02) ^b

由图 1-A 可知, 各氮水平橡胶根系样本门水平优势菌门均包括: 子囊菌门(Ascomycota, 82.34%~90.84%)、未分类的真菌(unclassified-Fungi, 6.60%~9.88%)、担子菌门(Basidiomycota, 1.91%~9.04%)。其中, 子囊菌门群落组成随着施氮水平的上升呈现先减少后增加的趋势, 在 HN 处理物种丰度达到最大(90.84%), HN 处理较 LN 处理丰度显著增长 10.32%($P<0.05$)。担子菌门随着施氮水平的上升

呈现先增加后减少的趋势, 且在 LN 最高(9.04%), LN 处理较 MN、HN 处理分别提高 2.84 倍、3.73 倍($P<0.05$)。球囊菌门(Glomeromycota, 0.0033%~0.25%)在 CK 处理最大(0.25%), LN、MN 与 HN 较 CK 处理显著降低 98.69%、98.17%、98.05% ($P<0.05$)。

在目水平方面(图 1-B), 各施氮水平橡胶根系样本中优势菌目包括: 肉座菌目(Hypocreales, 28.77%~52.14%)、粪壳菌目(Sordariales, 8.24%~56.76%)、未分类的真菌(unclassified-Fungi, 6.60%~9.88%)、糙孢孔目(Trechisporales, 0.40%~8.01%)、酵母菌目(Saccharomycetales, 0.68%~5.17%)。其中, 肉座菌目相对丰度随着施氮增加总体呈下降的趋势, CK 处理最大(52.14%), 且 CK 处理与 LN、HN 处理有极显著差异($P<0.01$)、与 MN 处理有显著差异($P<0.05$), CK 处理较其他处理显著提升 29.00%~81.20%。粪壳菌目相对丰度随着氮水平的增加呈上升趋势, 在 HN 达到最大(56.76%), 且 HN 与 CK、LN、MN 有极显著差异, HN 较 CK、

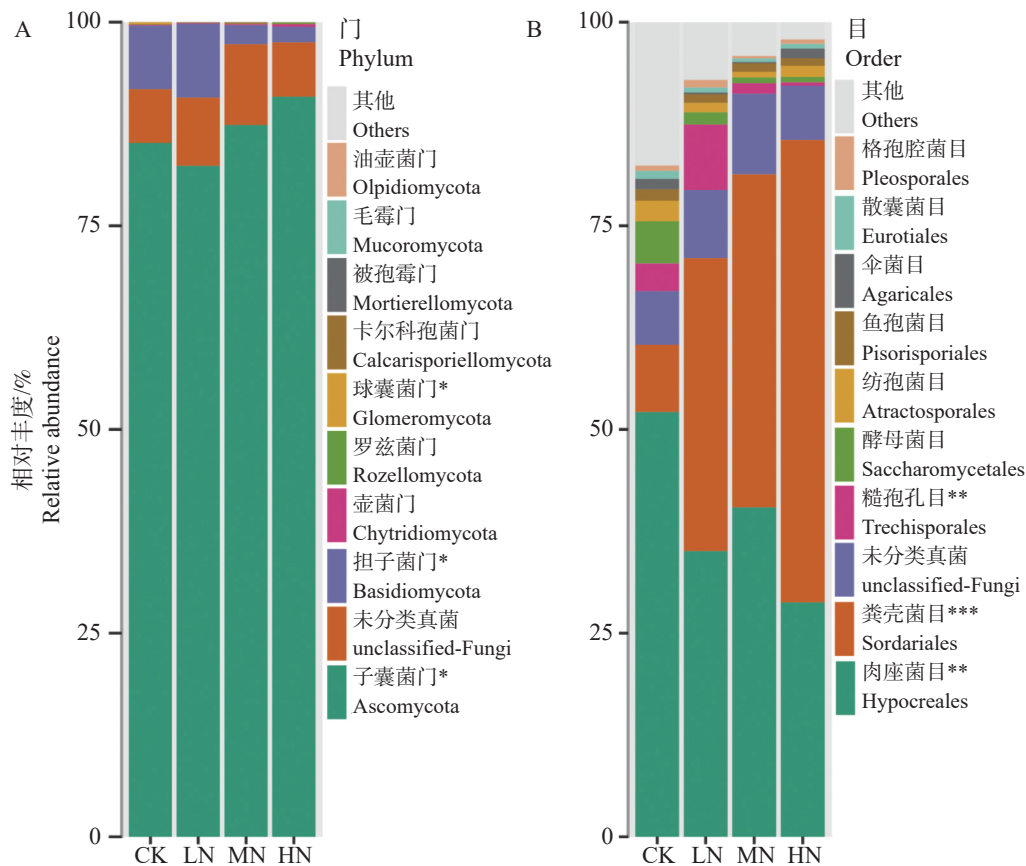


图 1 不同施氮水平下橡胶苗在门(A)和目水平(B)根系真菌群落组成

Fig. 1 Fungal community composition at the phylum (A) and order (B) level in the roots of rubber budded seedlings under varied nitrogen treatments

注: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$; 下同。

Note: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$; similarly hereinafter.

LN、MN 显著增长 589%、57.93%、38.79% ($P < 0.01$)。糙孢孔目相对丰度随着施氮水平的增加呈先增加后减少的趋势, 在 LN 取得最大(8.01%), 且 LN 处理与其他处理有极显著差异 ($P < 0.01$), LN 处理较其他处理增大 1.36 ~ 19.00 倍。综上所述可以看出, 中低氮水平(LN)维持担子菌门和糙孢孔目优势地位, 而高氮处理(HN)使子囊菌门与粪壳菌目显著提高。

2.3.2 不同施氮水平下椰糠培养橡胶苗根际真菌群落组成 不同施氮水平对橡胶苗根际真菌群落组成也有较大影响(图 2)。如图 2-A 所示, 各施氮水平橡胶苗根际样本中优势菌门均包括: 子囊菌门(Ascomycota, 79.57% ~ 90.89%)、未分类的真菌

(unclassified-Fungi, 3.72% ~ 18.54%)、担子菌门(Basidiomycota, 0.94% ~ 5.09%)。其中, 子囊菌门丰度随着施氮浓度的增加呈现先减少后增加的趋势, 但各处理间无显著差异。随着施氮浓度的增加, 未分类的真菌丰度呈先上升后降低的趋势, 在 LN 处理达到最大(18.54%), LN 较 CK 处理增长了 3.99 倍 ($P < 0.05$)。而担子菌门丰度随着氮水平的增加呈不断减少的趋势, 在 CK 处理最高(5.09%)且与 MN 处理存在显著性差异, MN 较 CK 处理减少 81.46% ($P < 0.05$)。球囊菌门(Glomeromycota, 0.0017% ~ 0.14%)在 CK 处理最大(0.14%), LN、MN 与 HN 较 CK 处理显著降低 86.01%、94.09%、98.80% ($P < 0.05$)。

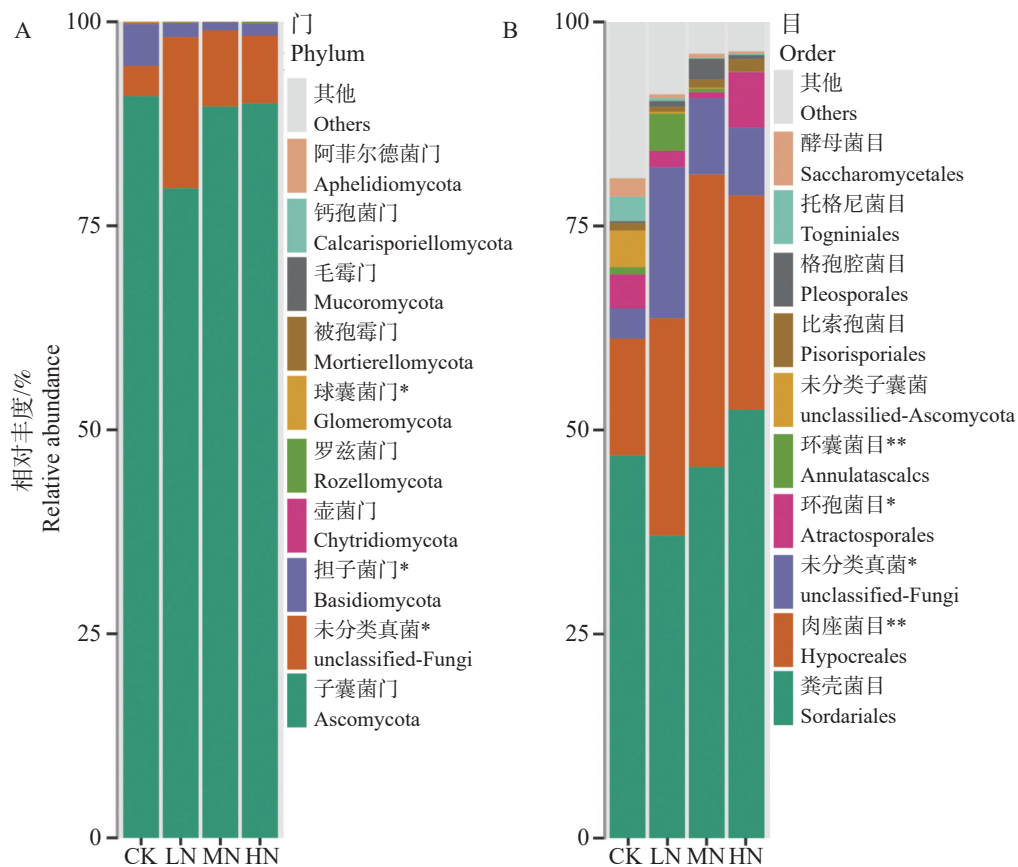


图 2 不同施氮水平下橡胶苗在门(A)和目水平(B)根际真菌群落组成

Fig. 2 Fungal community composition at the phylum (A) and order (B) level in the rhizospheres of rubber budded seedlings under varied nitrogen treatments

在目水平方面(图 2-B), 各根际样品目水平优势菌目包括: 粪壳菌目(Sordariales, 37.03% ~ 52.50%)、肉座菌目(Hypocreales, 14.32% ~ 35.82%)、未分类的真菌(unclassified-Fungi, 3.72% ~ 18.54%)、环孢菌目(Atractosporales, 0.75% ~ 6.82%)、环囊菌目(Annulatascales, 0.05% ~ 4.55%)。其中, 随着

施氮水平的提高, 粪壳菌目丰度先减少后增加, 但无显著性差异。肉座菌目丰度呈先增加后减小趋势, 且在 MN 处理最高(35.82%)。CK 与 LN、MN、HN 处理存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中 MN 与 CK 存在极显著差异 ($P < 0.01$), LN、MN、HN 较 CK 处理分别显著增长 86.07%、150.18% 和 83.21%。

未分类的真菌丰度随着氮水平的增加呈现先增加后减少,在LN处理下达到最大(18.54%),LN处理与CK有显著性差异($P < 0.05$),LN较CK处理增长3.99倍。环孢菌目相对丰度随着氮水平的增加呈现先减少后增加,在HN处理下达到最大为6.82%,HN处理与MN存在显著差异,HN较MN处理增长8.13倍。环囊菌目丰度随氮水平的增加呈现先增加后减少,在LN处理下取得最大(4.55%),LN与MN处理有极显著差异($P < 0.01$),MN较LN处理减少91.09%。综上所述,中低氮处理(LN-MN)促进根际未分类真菌与肉座菌目的相对丰度,高氮则显著抑制担子菌门与环囊菌目的丰度。

2.4 不同施氮水平对椰糠培养橡胶苗根系与根际真菌群落多样性的影响

2.4.1 不同施氮水平下椰糠培养橡胶苗根系与根际真菌 α 多样性分析

不同施氮水平对橡胶根系与根际真菌 α 多样性有较大影响。其中香农(Shannon)指数和辛普森(Simpson)指数代表真菌多样性,其数值越大真菌多样性越高。在香农指数方面(图3),橡胶苗根系真菌的香农指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,在LN处理最高(3.22),LN较CK、MN、HN处理显著提升18.82%、12.13%、14.82%($P < 0.05$,下同)。橡胶苗根际真菌的香农指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,在LN处理最大(3.13),但各处理间无显著性差异,LN较CK处理增长了18.11%。

在辛普森指数方面(图4),橡胶苗根系及根际真菌的辛普森指数随着施氮水平的增加呈现先增

加后减少的趋势,橡胶苗根系真菌的辛普森指数在LN处理最大(0.904),LN、MN、HN分别较CK处理显著增长了12.26%、9.01%、8.42%。橡胶苗根际真菌的辛普森指数在LN处理最高(0.914),LN较CK处理的辛普森指数增长了16.46%。综上所述,橡胶苗根系与根际真菌的香农和辛普森指数都随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,而且都是在LN处理下达到峰值。

Chao1指数与ACE指数代表真菌丰富度,其数值越大物种丰富度越高。根系真菌的Chao1指数受氮素影响较大(图5)。橡胶苗根系真菌的Chao1指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,在LN处理最大(385.97)。LN、MN、HN处理橡胶苗根系真菌Chao1指数分别较CK处理显著增大了1.16、1.01、1.03倍。橡胶苗根际真菌的Chao1指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,在MN处理最高(393.65),LN、MN、HN处理橡胶苗根际真菌Chao1指数较CK处理显著增大了72.01%、85.70%、76.15%。

ACE指数随施氮水平的提升变化明显(图6),橡胶苗根系真菌的ACE指数随着施氮水平的增加呈现先增大后减少的趋势,在LN处理达到峰值(391.43),LN、MN、HN处理根系真菌ACE指数较CK处理分别显著增大1.27、1.14、1.13倍。橡胶苗根际真菌的ACE指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势,在MN处理最大(379.90),LN、MN、HN处理根际真菌ACE指数较CK处理分别显著增大68.61%、78.02%、77.49%。

综上所述,橡胶苗根系与根际真菌的Chao1

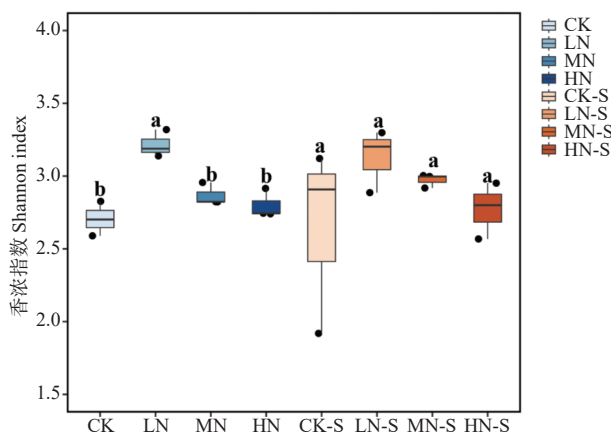


图3 不同施氮水平下根系与根际真菌的香农指数
Fig. 3 Shannon index of fungi in roots and rhizosphere under different nitrogen treatments

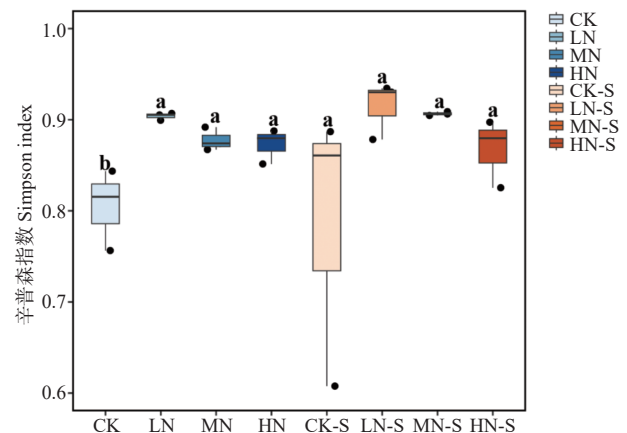


图4 不同施氮水平下根系与根际真菌的辛普森指数
Fig. 4 Simpson index of root and rhizosphere fungi under different nitrogen treatments

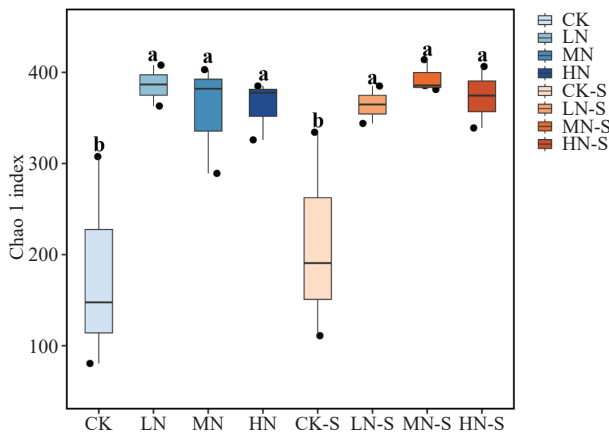


图 5 不同施氮水平下根系与根际真菌的 Chao1 指数
Fig. 5 Chao1 index of fungi in roots and rhizosphere under different nitrogen treatments

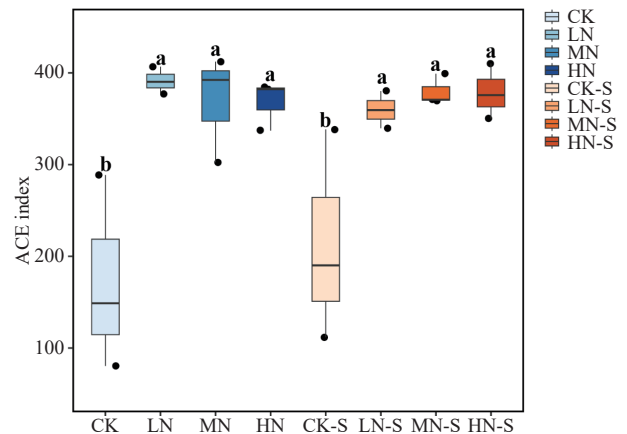


图 6 不同施氮水平下根系与根际真菌的 ACE 指数
Fig. 6 ACE index of fungi in roots and rhizosphere under different nitrogen treatments

和 ACE 指数随着施氮水平的增加呈现先增加后减少的趋势, CK 处理都显著低于其他施氮处理, 中氮水平(LN)处理显著提升橡胶苗根系与根际真菌群落丰富度, 其 Chao1 与 ACE 指数较 CK 处理增幅达 68.61%~127%。

2.4.2 不同施氮水平下椰糠培养橡胶苗根系与根际真菌 β 多样性分析 距离矩阵与主坐标分析结果显示坐标轴所能解释的样本差异数据(距离矩阵)的比例为 60.04%。不同施氮水平处理的根系及根际真菌分开聚集, 其中 LN、MN、HN 处理聚集的更加明显, 可见这 3 个处理的根系与根际真

菌 β 多样性更加相似, CK 与其他 3 个处理的相较远(图 7)。置换多元方差分析(PERMANOVA)结果显示, 不同施氮处理之间 β 多样性有极显著差异($P<0.001$, $R^2=49.10\%$), 根系与根际真菌 β 多样性也存在极显著差异($P<0.001$, $R^2=16.65\%$)。不同施氮水平 R^2 值大于不同区域的 R^2 值, 可以推测出橡胶苗根系及根际真菌 β 多样性受不同施氮量影响大于不同区域的影响。不同施氮水平对根系和根际真菌 β 多样性都有极显著差异($P<0.001$), 根系真菌 R^2 值为 67.94%, 根际真菌 R^2 值为 74.01%, 根际真菌的 R^2 值更大, 说明不同的施氮水平对根际

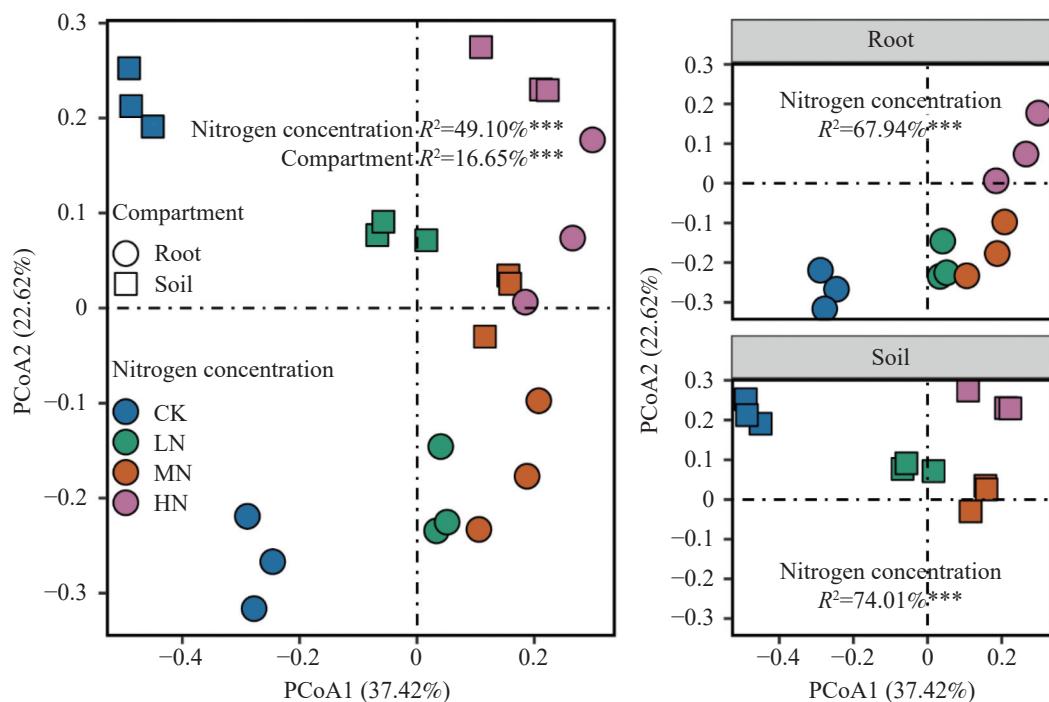


图 7 不同施氮水平橡胶根系及根际真菌 β 多样性分析
Fig. 7 Beta diversity analysis of fungi in root and rhizosphere of rubber budded seedlings under different nitrogen treatments

真菌 β 多样性的影响比对根系真菌的影响要更大。综上所述,不同施氮水平和不同区域位置对橡胶根系与根际真菌 β 多样性都存在极显著差异,且不同施氮水平影响更大;不同施氮水平使根系与根际真菌 β 多样性均存在极显著差异,且在根际真菌中的影响大于在根系真菌中。主成分分析表明,施氮处理(LN-HN)的菌群呈现趋同性聚类,而缺氮对照处理(CK)形成独立分支;根际真菌群落对氮素响应敏感性高于根系真菌,表现为 R^2 差值达 6.07%。

2.5 不同施氮水平下橡胶苗根系及根际真菌群落与根系形态、椰糠基质养分含量的相关性分析

2.5.1 不同施氮水平下橡胶苗根系及根际门水平真菌群落与根系形态、椰糠基质养分含量的相关性分析

通过不同施氮水平下橡胶苗根系真菌门水平与根系形态、椰糠基质养分含量的相关性分析可以看出(图 8),球囊菌门与根积极显著正相关;担子菌门与椰糠基质氮含量极显著负相关,随着施氮水平的提升担子菌门相对丰度呈下降趋势;被孢霉门与椰糠基质钾含量呈显著负相关。在根际真菌门水平方面(图 9),壶菌门与椰糠基质氮含量显著负相关;担子菌门与根积极显著正相

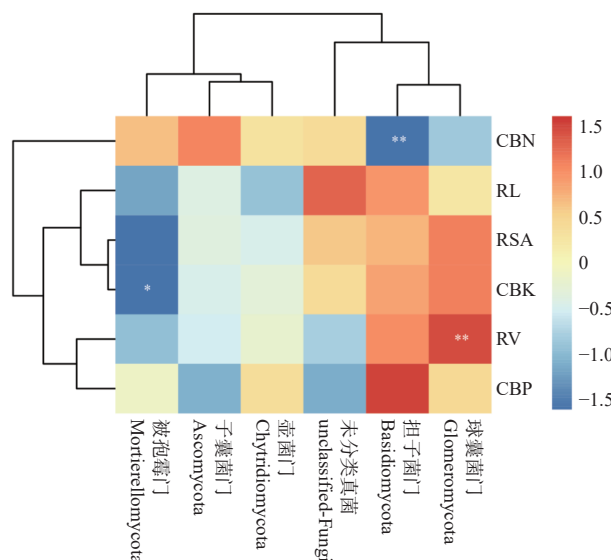


图 8 不同施氮水平下根系真菌门水平与根系形态及椰糠基质养分指标相关性分析

Fig. 8 Correlations of root fungal phyla with root morphology and coir dust substrate nutrients under varied N application levels

注: RL, 根长; RSA, 根表面积; RV, 根体积; CBN, 椰糠基质氮含量; CBP, 椰糠基质磷含量; CBK, 椰糠基质钾含量; 下同。

Note: RL, Root length; RSA, Root surface area; RV, Root volume; CBN, Nitrogen content in coir dust substrate; CBP, Phosphorus content in coir dust substrate; CBK, Potassium content in coir dust substrate; similarly hereinafter.

关;球囊菌门与椰糠基质钾及磷含量、根体积显著正相关,与椰糠基质氮含量极显著负相关。氮是影响根系及根际门水平真菌群落的重要因素,显著影响担子菌门、壶菌门与球囊菌门。

2.5.2 不同施氮水平下橡胶苗根系及根际目水平真菌群落与根系形态、椰糠基质养分含量的相关性分析

通过不同施氮水平下橡胶苗根系真菌目水平与根系形态、椰糠基质养分含量的相关性分析可以看出(图 10),糙孢孔菌目与椰糠基质氮含量极显著负相关;肉座菌目与基质钾含量极显著正相关,与根体积显著正相关,与基质氮含量显著负相关;粪壳菌目与椰糠基质氮含量极显著正相关,与基质钾含量极显著负相关,与根体积显著负相关。在根际真菌目水平方面(图 11),比索孢菌目与椰糠基质磷含量显著负相关;肉座菌目与椰糠基质氮含量显著正相关;环囊菌目与椰糠基质磷含量显著正相关,与椰糠基质氮含量显著负相关。

3 讨论

3.1 不同施氮水平对橡胶苗根系及根际真菌群落组成的影响

影响真菌群落组成的因素很多,如土壤类型^[27]、土壤理化性质和植被类型^[28]等。施氮可以改变根系与根际真菌的多样性、丰度和群落结构^[29],导致特定真菌富集,从而改变真菌群落的结构^[30]。本研究中不同施氮水平下橡胶苗根系

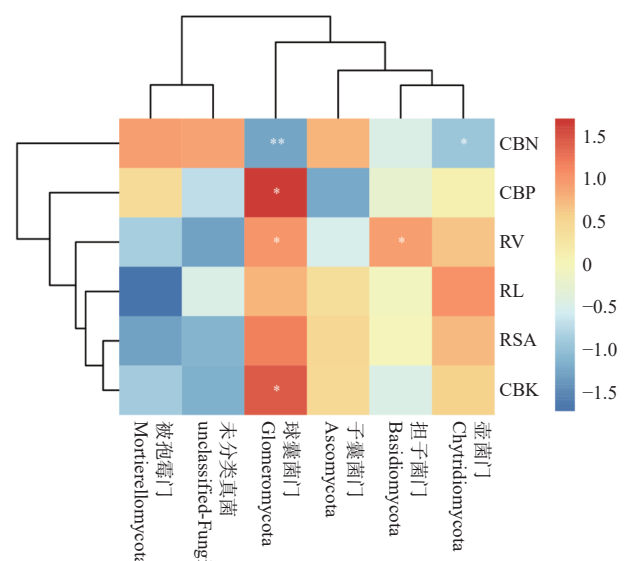


图 9 不同施氮水平下根际真菌门水平与根系形态及椰糠基质养分指标相关性分析

Fig. 9 Correlations of fungal phyla in the rhizosphere with root morphology and coir dust substrate nutrients under different N treatments

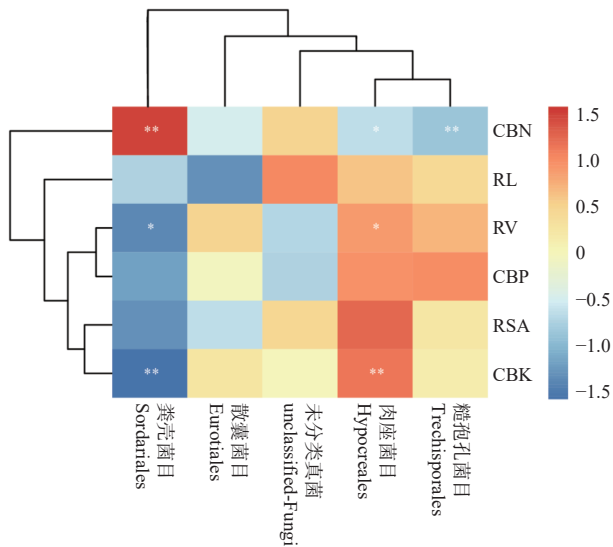


图 10 不同施氮水平下根系真菌目水平与根系形态及椰糠基质养分指标相关性分析

Fig. 10 Correlations of root fungal orders with root morphology and coir dust substrate nutrients under different N treatments

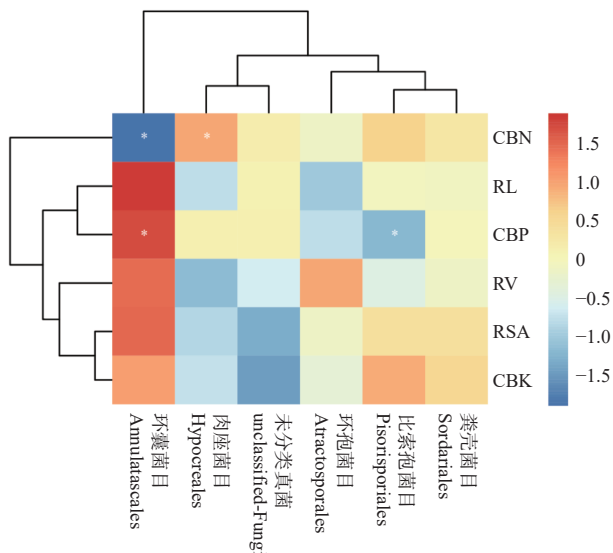


图 11 不同施氮水平下根际真菌目水平与根系形态及椰糠基质养分指标相关性分析

Fig. 11 Correlations between rhizosphere fungal orders, root morphology, and coir dust substrate nutrients under different N treatments

与根际真菌群落组成存在显著性差异; 在门水平上, 在根系与根际均检测到 2 个优势菌门, 即子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota), 分别占根系与根际真菌总丰富度的 89.74%~92.96% 和 81.29%~95.98%。这与前人在对土壤真菌微生物的研究结果一致^[31-32]。这可能是由于以上主要菌门是土壤真菌群落的核心优势类群, 具有极强的环境适应性, 施氮引起的环境变化可能更有利于这两大类群中特定耐受性或偏好性菌株的生长

与竞争, 使其在群落中占据绝对主导地位, 而非优势菌门则受到抑制。

有研究表明子囊菌门的丰度主要受土壤中氮含量的调节^[33], 与低施氮水平相比, 高施氮水平增加了子囊菌门的相对丰度^[34], 但该结果与本试验结果存在差异。在本研究中, 随着施氮水平的增加橡胶苗根系与根际中子囊菌门的相对丰度均呈现先减少后增加的趋势, 一方面可能是少量氮素的输入刺激部分竞争性更强的腐生真菌(如担子菌门 Basidiomycota)的生长, 导致子囊菌的相对丰度被稀释; 另一方面可能是在低氮水平下, 橡胶苗根系分泌物会富集担子菌门, 而土壤中微生物间的竞争排斥作用导致子囊菌门的相对丰度降低^[35]。本实验结果显示, 随着氮素水平的增加, 根系真菌担子菌门的相对丰度呈现先增加后减少的趋势, 与子囊菌门变化趋势正好相反, 这与上述竞争作用相一致。也有研究发现, 高产橡胶林中担子菌门的相对丰度高达 82.92%, 显著高于其他橡胶林, 而子囊菌门和被孢霉门的相对丰度则显著降低, 这在一定程度上有利于橡胶树的生长和胶乳产量^[36]。本研究试验中低氮处理时根系与根际真菌担子菌门最高, 而子囊菌门最低。因此, 低氮处理的幼苗可能有高产潜力。

3.2 不同施氮水平对橡胶苗根系与根际真菌多样性的影响 土壤微生物多样性在维持土壤功能方面起着至关重要的作用。微生物多样性的丧失会对土壤肥力、有机质含量和生物防治产生不利影响, 从而降低土壤的多功能性^[19, 37]。研究表明, 作物土壤微生物群落的差异可能与土壤的理化性质、作物的品种和栽培方式有关^[38], 不同管理措施、植被类型、土壤肥力、pH、温度和降水等综合因素的改变会对真菌群落组成及其多样性产生一定的影响^[39]。Sun 等^[40]关于长期施用化肥对土壤真菌群落影响的研究发现, 施肥会增加土壤真菌多样性, 这与本研究结果存在一定的差异。本研究真菌群落的多样性指数(如香农指数等)呈现先增大加后减少的趋势, 这可能是由于本试验周期仅有 3 个月, 试验处理时间较短, 真菌群落变化在短期内不稳定, 存在波动的情况。 α 多样性主要受两个方面的因素影响: 其一是种类数目, 即种群的丰富度; 而另一个是多样性, 其反映了群落中个体分配的均匀性。与群落丰富度相关的指数主要包

括 Chao1 指数和 ACE 指数。群落多样性的指数包括香农指数和辛普森指数。其中, Chao1 和 ACE 指数越大, 代表群落的丰富度越高。香农和辛普森指数越高, 说明群落的多样性越高。施氮对根系与根际真菌多样性有显著影响, 施氮显著增大了 Ace 和 Chao1 指数, 表明施氮增加了群落丰富度^[41], Liao 等^[42]发现, 适量施氮使土壤真菌 Chao1 指数最高, 与本研究结果相同, 这一方面可能是由于低氮土壤中, 真菌群落受氮饥饿抑制, 适量施氮解除营养限制, 激活更多稀有和休眠真菌(如子囊菌门等), 显著提升丰富度, 另一方面, 可能由于氮素的输入促进橡胶苗根系生长, 使根系分泌物增多, 使更多种类的真菌富集, 增加了群落丰富度。本研究表明, 随着施氮水平的提高, 根系及根际真菌的香农指数和辛普森指数呈现先增加后减少的趋势, LN 处理显著高于 CK 处理, 且都是在 LN 处理最高。这说明不施氮肥和过量施氮肥都会降低橡胶苗根系与根际的真菌群落物种多样性。这与刘思博等^[43]在不同浓度氮肥对首年紫花苜蓿产量及其根际土壤真菌群落结构的影响研究中的结果一致。出现该现象的原因可能是由于少量氮输入缓解绝对氮饥饿状态, 激活更多寡营养型真菌(如 AMF、部分子囊菌等); 另一方面, 可能在低营养压力下无单一菌群垄断资源, 竞争排斥减弱, 允许稀有菌种共存。综上所述, 适量施氮(LN)可以增加橡胶苗根系与根际真菌群落的多样性, 使橡胶苗根系生长环境更加适宜, 促进根系生长, 进而促进橡胶苗对土壤养分的吸收, 加强地上部分的生长, 增强光合作用, 最终导致橡胶苗养分吸收与积累增加, 起到橡胶苗壮苗的目的, 使其有更高的发展潜力。

4 结 论

施氮水平显著影响橡胶苗根系与根际真菌群落的组成及多样性。在根系真菌方面, 施氮水平提升显著增大子囊菌门相对丰度; 而担子菌门在低氮处理($0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)达到峰值。同时, 橡胶苗根系与根际真菌群落多样性均在低氮处理最大, 真菌群落丰富度也是施氮处理显著高于不施氮处理。不同施氮水平对根系真菌与根际真菌 β 多样性都存在极显著差异, 且受不同施氮水平影响大于在不同区域的影响, 不同的施氮水平对根际真

菌 β 多样性的影响比对根系真菌的影响更大。相关性分析表明基质氮含量是影响根系及根际门水平与目水平真菌群落的重要因素。因此, 在椰糠基质盆栽培育橡胶苗的生长初期(3—6月)采用低氮处理对提高根系与根际真菌多样性均有较好的效果。本研究的结论在一定程度上受到以下因素的限制: 试验周期短、试验品种单一, 以及环境因子(如温湿度)波动对微生物群落的潜在影响。同时, 本研究基于椰糠基质自身养分特性进行的施肥设计尚有优化空间。因此, 后续应开展长期、多品种的研究, 并结合环境因子监控与动态施肥策略, 以获得更普适的结论。

参考文献:

- [1] 何康, 黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培[M]. 广州: 广东科技出版社, 1987.
- [2] 卫晋瑶, 郑红裕, 石钰欣. 2024 年我国天然橡胶产业形势分析及未来展望[J]. *中国热带农业*, 2025(2): 17–22. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-0658.2025.02.004>
- [3] Li S N, Zou F S, Zhang Q, et al. Species richness and guild composition in rubber plantations compared to secondary forest on Hainan Island, China [J]. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(5): 1117–1128. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9624-y>
- [4] Singh A K, Liu W J, Zakari S, et al. A global review of rubber plantations: impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148948>
- [5] Wang J C, Ren C Q, Cheng H T, et al. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: consequences for soil phosphorus forms and microbial community [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.012>
- [6] 桂明春, 邱彦芬, 唐敏, 等. 育苗措施对橡胶树小苗芽接苗生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(5): 1387–1393. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2021.05.026>
- [7] 谢瑾, 李朝丽, 李永梅, 等. 纳板河流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3169–3176. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2011.0443>
- [8] 郑伟. 植物幼苗生长对策研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [9] 唐菁, 杨承栋, 康红梅. 植物营养诊断方法研究进展[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(6): 45–48. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4241.2005.06.007>
- [10] 解淑贞. 蔬菜营养及其诊断[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [11] 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1211–1216.

- [12] 陈艳彬, 张永发, 王文斌, 等. 橡胶树叶片氮素营养特性及其对施氮量的响应[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(5): 831–838. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2019.05.001>
- [13] Ge S F, Xu H G, Ji M M, et al. Characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio in Chinese apple orchards [J]. *Open Journal of Soil Science*, 2013, 3(5): 213–217. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.35025>
- [14] 张凌霄, 李云, 赵家连, 等. 不同施肥措施对天然生胶性能的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(12): 158–164. <https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.22749>
- [15] 罗雪华, 邹碧霞, 吴菊群, 等. 氮水平和形态配比对巴西橡胶树花药苗生长及氮代谢、光合作用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 693–701. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2011.0259>
- [16] 赵春梅, 蒋菊生, 曹建华. 橡胶林氮素研究进展[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(3): 44–50. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-2196.2009.03.011>
- [17] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- [18] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1170261>
- [19] Delgado-baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10541. <https://doi.org/10.1038/ncomms10541>
- [20] 白欣荣, 杨钧, 马巧蓉, 等. 宁夏南华山草地造林林龄对土壤真菌群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2025, 31(10): 1561–1571. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.09014>
- [21] 刘东海, 张智, 梅亮贤, 等. 不同施氮水平对冬油菜根际微生物群落特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(10): 1898–1908. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2024110>
- [22] 杜超, 陈德, 张园莉, 等. 接种 AM 真菌对蓝莓苔藓苗生长发育及生理特性的影响[J]. *耕作与栽培*, 2025, 45(4): 7–10. <https://doi.org/10.13605/j.cnki.52-1065/s.2025.04.002>
- [23] 宫丽丹, 马静, 吴超, 等. 丛枝菌根真菌对澳洲坚果幼苗生长及光合特性的影响[J]. *热带农业科技*, 2025, 48(2): 25–29. <https://doi.org/10.16005/j.cnki.tast.2025.02.005>
- [24] 姜圆圆, 郑毅, 汤利, 等. 豆科禾本科作物间作的根际生物过程研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(05): 407–415. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0121>
- [25] 华元刚, 林清火, 罗微, 等. 氮素供应对橡胶树根系生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 421–424. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6850.2006.06.107>
- [26] 贝美容, 罗雪华, 杨红竹. AA3型连续流动分析仪(CFA)同时测定橡胶叶全氮、全磷、全钾的方法研究[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(7): 1258–1264. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2011.07.015>
- [27] 曾维军, 刘燕, 罗文敏, 等. 土壤利用类型和海拔对油茶根围土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(10): 227–236. <https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2023.10.031>
- [28] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 植被恢复对黄土高原矿区重构土壤理化性质、酶活性以及真菌群落的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 1–7. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.001>
- [29] 张叶. 不同施氮水平对土壤微生物及油菜生育后期氮素代谢的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27136/d.cnki.ghunu.2021.000105>
- [30] Guo J J, Liu W B, Zhu C, et al. Bacterial rather than fungal community composition is associated with microbial activities and nutrient-use efficiencies in a paddy soil with short-term organic amendments [J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(1): 335–349. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3547-8>
- [31] 杜昊楠, 陈伟, 兰国玉, 等. 海南热带雨林土壤真菌时空分布格局[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2450–2459. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202108.002>
- [32] Shi Y W, Niu X X, Chen B Z, et al. Chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer affects the soil microbial community and diversity and yield of cotton [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1295722. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1295722>
- [33] Fontaine S, Hénault C, Amor A, et al. Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.017>
- [34] Paungfoo-Ionhienne C, Yeoh Y K, Kasinadhuni N R P, et al. Nitrogen fertilizer dose alters fungal communities in sugarcane soil and rhizosphere [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8678. <https://doi.org/10.1038/srep08678>
- [35] Eldridge D J, Delgado - baquerizo M, Travers S K, et al. Competition drives the response of soil microbial diversity to increased grazing by vertebrate herbivores [J]. *Ecology*, 2017, 98(7): 1922–1931. <https://doi.org/10.1002/ecy.1879>
- [36] 詹杉, 吴敏, 马海洋, 等. 不同产量水平橡胶林土壤微生物群落组成及多样性研究[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(12): 2646–2658. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2024.12.017>
- [37] Kennedy A C, Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils [J]. *Plant and Soil*, 1995, 170(1): 75–86. <https://doi.org/10.1007/BF02183056>
- [38] 许姗姗, 杨光柱, 阚望, 等. 应用高通量测序分析云南昭通不同栽培模式苹果园根际土壤微生物种群[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(7): 1512–1517. <https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2019.7.009>
- [39] ANDERSON I C, CAIRNEY J W G. Diversity and ecology of soil fungal communities: increased understanding through the application of molecular techniques [J]. *Environmental Microbiology*, 2004, 6(8): 769–779. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2004.00675.x>
- [40] Sun R B, Dsouza M, Gilbert J A, et al. Fungal community composition in soils subjected to long - term

- chemical fertilization is most influenced by the type of organic matter [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(12): 5137–5150. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13512>
- [41] Zhang Y Y, Zhao F Y, Feng C, et al. Effects of maize/peanut intercropping and nitrogen fertilizer application on soil fungal community structure [J]. *Agro-nomy*, 2024, 14(5): 1053. <https://doi.org/10.3390/agro-nomy14051053>
- [42] Liao L R, Wang X T, Wang J, et al. Nitrogen fertilization increases fungal diversity and abundance of saprotrophs while reducing nitrogen fixation potential in a semiarid grassland [J]. *Plant and Soil*, 2021, 465(1/2): 515–532. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05012-w>
- [43] 刘思博, 殷国梅, 冀超, 等. 不同浓度氮肥对首年紫花苜蓿产量及其根际土壤真菌群落结构的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023(1): 1–12. <https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.21652>

Effects of different nitrogen treatments on the fungal community in the root system and rhizosphere of the budded seedlings of rubber tree

Qiu Lingxuan^{1,2#}, Tao Jun¹, Lin Qinghuo^{2,3}, Zhang Jingmin²,
Jin Dongqi², Luo Wei^{2*}, Zhang Peisong^{2*}

(1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Haikou Key Laboratory of Soil Health and Nutrient Utilization/Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Rubber Tree, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Danzhou Soil Environment of Rubber Plantation, Hainan Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: The effects of different nitrogen treatments on root growth and fungal community structures in both the roots and rhizosphere of budded seedling of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) were investigated to determine optimal nitrogen application rate for robust growth of the budded seedlings. Mini-seedling buddings of Clone Reyan 7-33-97 of rubber tree at the age of 3 months old were selected as budded seedlings for experiment and applied with nitrogen fertilizer at different rates. An outdoor pot experiment was conducted with four treatments, control (CK, no nitrogen), low nitrogen (LN, 0.32 g·kg⁻¹), medium nitrogen (MN, 0.64 g·kg⁻¹), and high nitrogen (HN, 1.28 g·kg⁻¹), and root morphological parameters and compositional and diversity shifts in fungal communities in the roots and rhizosphere were determined and analyzed. Results revealed significant effect of different nitrogen treatments on species composition in the roots and rhizosphere of the mini-seedling buddings. For root fungi, the LN treatment maintained dominance of *Basidiomycota* and *Thelephorales*, whereas the HN treatment substantially increased *Ascomycota* and *Sordariales*; in the rhizosphere, the LN and MN treatments elevated unclassified fungi and *Hypocreales*, while HN significantly suppressed *Basidiomycota* and *Annulatascales*. The LN treatment (0.32 g·kg⁻¹) maximized alpha diversity, with root fungal Shannon (3.22) and Simpson (0.904) indices increasing by 15.84% and 12.26% respectively as against the CK, while rhizosphere Shannon (3.13) and Simpson (0.914) indices rose by 18.11% and 16.46%, respectively. Root Chao1 (385.97) and ACE (391.43) indices peaked in the LN treatment, 1.16-fold and 1.27-fold higher than that of CK; rhizosphere Chao1 and ACE indices in the LN treatment still elevated significantly, 72.01% and 68.61% higher than those of CK. Beta diversity exhibited highly significant differences in the roots and rhizosphere among nitrogen treatments and application location, with higher difference in the rhizosphere than in the roots among the nitrogen treatments. Principal Co-ordinates Analysis demonstrated convergent clustering among nitrogen treatments (LN-HN), which was distinctly separated from CK, and higher nitrogen sensitivity in rhizosphere fungi than in the root fungi (R^2 difference: 6.07%). The LN treatment (0.32 g·kg⁻¹) was hence recommended as it helps enhance the diversity and richness of the fungal community in both the root system and the rhizosphere, thereby optimizing the fungal community structure in the rhizosphere of mini-seedling buddings.

Keywords: nitrogen application level; rubber plant; root and rhizosphere fungi; species composition; community diversity