

不同施肥处理对橡胶园土壤肥力、酶活性及微生物群落结构的影响

张淑娟^{1,3}, 黄艳艳^{2,3}, 刘海林^{2,3}, 杨红竹^{2,3}, 李建宏^{2,3}, 蒙盼盼^{2,3}, 陈善帅^{1*}, 林清火^{2,3*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737; 2. 中国热带农业科学院橡胶研究所/海口市土壤健康与养分资源高效利用重点实验室, 海南海口 571101; 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

摘要: 本研究系统探讨了不同施肥处理对橡胶园土壤肥力、酶活性及微生物群落结构的综合影响, 以期为橡胶园土壤可持续养分管理提供理论依据。以橡胶品系热研 7-33-97 为研究对象, 设置不施肥 (CK)、常规化肥 (CF)、有机无机复混肥 (OF) 以及 2 种控释比例的缓释肥 (SF 25%、SF 50%) 共 5 种处理, 通过测定土壤化学性质、酶活性及微生物群落结构, 系统探究三者之间的关联性。结果表明: 与 CF 相比, OF 处理显著提高了土壤有机质含量 (35.40%)、有效磷含量 (40.00%)、pH (10.86%) 和脲酶活性 (54.84%), SF 25% 显著提高了有效磷含量 (43.00%) 和过氧化氢酶活性 (19.23%)。SF 50% 处理的有效磷含量与 CF 无显著差异, 且显著低于 OF 和 SF 25% 处理。微生物群落分析结果显示, 各施肥处理间细菌和真菌 α 多样性差异均不显著, 但 β 多样性分析表明施肥处理对真菌群落结构产生了显著影响。此外, OF 与 SF 25% 处理均提高了酸杆菌门 (93.47%、64.58%)、朱氏杆菌属 (351.56%、222.53%)、真菌子囊菌门 (38.43%、11.13%) 的相对丰度, 并降低了罗兹菌门的相对丰度。而 SF 50% 处理降低了球囊菌门 (53.70%) 的相对丰度。综上, 有机无机复混肥 (OF) 与缓释肥 (SF 25%) 在提升土壤肥力、酶活性和微生物群落结构方面效果更优异, 可作为胶园土壤健康管理的推荐施肥策略。

关键词: 橡胶园; 不同施肥处理; 土壤肥力; 土壤酶活性; 微生物群落结构

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Effects of Different Fertilization Treatments on Soil Fertility, Enzyme Activity and Microbial Community Structure in Rubber Plantations

ZHANG Shujuan^{1,3}, HUANG Yanyan^{2,3}, LIU Hailin^{2,3}, YANG Hongzhu^{2,3}, LI Jianhong^{2,3}, MENG Panpan^{2,3}, CHEN Shanshuai^{1*}, LIN Qinghuo^{2,3*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Haikou Key Laboratory of Soil Health and Nutrient Utilization, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Danzhou Soil Environment of Rubber Plantation, Hainan Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: The comprehensive effects of different fertilization treatments on soil fertility, enzyme activity and microbial community structure in rubber plantations were systematically investigated to provide a theoretical basis for sustainable nutrient management of rubber plantation soils. Using the rubber clone Reyan 7-33-97 as the research subject, five treatments were set, no fertilization (CK), conventional chemical fertilizer (CF), organic-inorganic compound fertilizer

收稿日期 2025-11-13; 接受日期 2025-12-07

基金项目 国家天然橡胶产业技术体系项目 (No. CARS-33-ZP2); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目 (No. CATASCXTD202303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630022025002)。

作者简介 张淑娟 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农业资源与利用。*通信作者 (Corresponding author): 陈善帅 (CHEN Shanshuai), E-mail: chenss92@hainan.edu.cn; 林清火 (LIN Qinghuo), E-mail: qinghuo@catas.cn。

(OF), and two slow-release fertilizers with different release ratios (SF 25% and SF 50%). Soil chemical properties, enzyme activity and microbial community structure were measured to systematically explore the relationships among the factors. Compared with CF, OF treatment significantly increased soil organic matter (35.40%), available phosphorus (40.00%), pH (10.86%) and urease activity (54.84%). SF 25% significantly increased available phosphorus (43.00%) and catalase activity (19.23%). The available phosphorus content in SF 50% treatment showed no significant difference from CF, but was significantly lower than that in OF and SF 25% treatments. Microbial community analysis revealed that there were no significant differences in bacterial and fungal α -diversity across the treatments, but β -diversity analysis showed that fertilization treatments had a significant effect on the fungal community structure. Furthermore, both OF and SF 25% treatments significantly increased the relative abundance of Acidobacteria (93.47%, 64.58%), Chujaibacter (351.56%, 222.53%) and Ascomycota (38.43%, 11.13%) while decreasing the relative abundance of Rozellomycota. The SF 50% treatment significantly decreased the relative abundance of Glomeromycota (53.70%). In conclusion, organic-inorganic compound fertilizer (OF) and slow-release fertilizer (SF 25%) were more effective in improving soil fertility, enzyme activity and microbial community structure, and can be recommended as fertilization strategies for soil health management in rubber plantations.

Keywords: rubber plantation; different fertilization treatments; soil fertility; soil enzyme activities; microbial community structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.009

巴西橡胶树 (*Hevea brasiliensis* Willd. ex A. Juss) 是热带地区重要的经济作物, 其产出的天然橡胶是全球工业体系中不可或缺的战略资源^[1-2]。然而, 橡胶树生长与持续割胶过程不断消耗土壤养分, 导致胶园土壤肥力显著退化^[3]。为提升橡胶产量, 化学肥料在生产中被广泛施用, 但长期过量施用化肥易导致土壤酸化、土壤有机质 (SOM) 降低和生物多样性显著减少等一系列生态环境问题^[4]。为缓解传统化肥使用带来的负面影响, 推行环境友好型的肥料已成为橡胶产业绿色发展的重要方向, 其中包括有机无机复混肥和缓释肥料^[5-6]。有机无机复混肥通过提高土壤碳、氮等养分含量, 改善土壤养分状况, 减少养分淋失, 进而提升土壤肥力^[7]。对桃树和水稻等作物的研究表明, 有机无机复混肥对土壤健康和作物生产力具有积极影响^[8-9]。缓释肥通过养分缓慢释放, 为土壤提供稳定且持续的养分供给, 从而提高产量和生态可持续性^[10]。研究表明, 缓释肥可以促进土壤有机质转化, 改变土壤养分状况, 进而影响土壤微生物群落结构与多样性^[11-12]。

土壤微生物是评价土壤健康的关键指标, 在土壤结构形成、有机质分解和养分转化中发挥重要作用^[13]。土壤养分周转主要通过微生物驱动分解土壤有机质, 从而影响土壤酶的分泌。同时, 土壤酶活性也能反映微生物群落在能量获取与养分吸收方面的投入状态。因此, 了解土壤养分含量、酶活性和微生物群落之间的关系, 是评估土壤微生物的养分状况和代谢能量输出的重要

步骤^[14]。施肥作为调控土壤养分库的重要措施, 其种类与施用量可通过改变土壤有机质含量、pH 及养分有效性等, 进一步影响微生物群落结构、多样性与酶活性的协同作用机制^[15]。目前, 关于施肥对农田、森林及果园土壤酶活性和微生物群落的影响已有较多报道^[8-9, 16], 证实了化肥配施有机肥、缓释肥等施肥模式对土壤生物学特性具有积极效应。橡胶园作为特殊的人工林生态系统, 长期单一种植及其独特的养分需求特征, 导致其土壤理化性质与微生物环境呈现出明显的特殊性^[17]。然而, 目前关于橡胶园系统中有机无机复混肥与缓释肥如何通过调控土壤养分-酶活性-微生物群落的协同作用来改善土壤健康的研究尚不系统, 尤其缺乏对幼龄橡胶树施肥策略的优化依据。

本研究以典型幼龄橡胶园为对象, 设置传统化肥、有机无机复混肥、缓释肥等不同施肥处理, 通过测定土壤养分含量和酶活性, 结合高通量测序解析细菌与真菌群落结构特征, 系统探究不同类型肥料对三者的调控效应及内在关联。研究结果旨在优化我国橡胶园施肥管理策略, 提升土壤健康水平, 进而为推动橡胶产业可持续发展提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样地概况 试验在海南省儋州市中国热带农业科学院试验场六队 (19°32'N, 109°14'E)

进行，面积为 1.8 hm²。试验地表层（0~20 cm）土壤的基本理化性质为：pH 5.11，有机质含量为 13.56 g/kg，全氮含量为 0.76 g/kg，有效磷含量为 12.84 mg/kg，速效钾含量为 42.79 mg/kg。

1.1.2 试验材料 以橡胶品系热研 7-33-97 为研究对象，橡胶树于 2014 年定植，施肥试验开始于 2019 年。有机无机复混肥（氮磷钾总养分为 25%，有机质含量为 15%，N：P₂O₅：K₂O 养分配比为 12：6：7 和 7：6：12）为洋浦绿宝丰农资有限公司生产；缓释配方肥由包膜尿素（43% N）、尿素（46% N）、磷酸二铵（18% N、46% P₂O₅）和氯化钾（60% K₂O）掺混制备；普通肥料由尿素、

磷酸二铵、氯化钾掺混制备。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设 5 个处理（表 1），分别为不施肥（CK）、常规肥料（CF）、有机无机复混肥（OF）、缓释配方肥 1-控氮 25%（SF 25%）和缓释配方肥 2-控氮 50%（SF 50%），各施肥处理养分投入总量相等。各处理肥料分别在 3、9 月施入施肥穴中；3 月单株施用量为氮 90.0 g、磷（P₂O₅）45.0 g、钾（K₂O）52.5 g，9 月单株施用量为氮 52.5 g、磷（P₂O₅）45.0 g、钾（K₂O）90.0 g。每个处理重复 3 次，采用随机区组排列，各小区包含 20 株长势一致的橡胶树。

表 1 各处理的施肥类型及用量
Tab. 1 Types and amount of fertilization with each treatment

处理 Treatment	3 月单株施用量 Fertilizer application amount per plant in March/g					9 月单株施用量 Fertilizer application amount per plant in September/g				
	包膜 尿素 Coated urea	尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	氯化钾 Potassium chloride	有机无机复混 肥（12：6：7） Organic-inorganic compound fertilizer（12：6：7）	包膜 尿素 Coated urea	尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	氯化钾 Potassium chloride	有机无机复混 肥（7：6：12） Organic-inorganic compound fertilizer（7：6：12）
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	157.37	97.83	87.50	0	0	75.85	97.83	150	0
OF	0	0	0	0	750	0	0	0	0	750
SF 25%	52.33	108.46	97.83	87.50	0	30.52	47.32	97.83	150	0
SF 50%	104.65	59.55	97.83	87.50	0	61.05	18.78	97.83	150	0

1.2.2 样品采集 橡胶园土壤样品于 2020 年 3 月施肥前采集，采样时以施肥穴肥料施用位置为取样点，土壤采集深度为 0~20 cm，每个试验处理区采用“S”型采集 5 个点，采集土壤约 1000 g，除杂质后充分混合，然后将混合样过 2 mm 筛后分为 2 份，一份保存于-80 ℃，用于提取土壤 DNA 和 PCR 扩增；另一份室内自然风干后进行土壤理化性质测定。

1.2.3 测试项目 （1）土壤基本理化性质和土壤酶活指标测定。土壤基本理化指标[全氮（TN）、全磷（TP）、全钾（TK）、有机质（OM）、碱解氮（AN）、速效磷（AP）、有效钾（AK）、过氧化氢酶（CAT）、蔗糖酶（Inv）、脲酶（Urea）、硝酸还原酶（NR）、酸性磷酸酶（ACP）]测定参照《土壤农业化学分析方法》^[18]；土壤 pH 采用土水比浸提法，水土比为 2.5：1，有机质采用重铬酸钾容量法，碱解氮采用凯氏定氮法，全氮和有效磷采用连续流动分析法，速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收火焰光度法。蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基

水杨酸比色法，脲酶活性采用靛酚比色法，磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法，过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法，硝酸还原酶活性采用酚二黄酸比色法^[19]。

（2）土壤微生物 DNA 提取与高通量测序。新鲜土样送至上海欧易生物医学科技有限公司完成测序。土壤样品使用试剂盒提取土壤微生物总 DNA，以 343F：5'-TACGGRAGGCAGCAG-3'和 798R：5'-AGGGTATCTAATCCT-3'为引物扩增细菌 16S rRNA 基因 V3~V4 区域序列。以 ITS1F：5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3'和 ITS2：5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'为引物扩增真菌 ITS 序列。首轮 PCR 体系：2×Gflex PCR Buffer 15 μL，正向和反向引物各 1 μL，DNA 模板 1 μL，Tks Gflex DNA Polymerase（1.25 U/μL）0.6 μL，最后用无菌水（ddH₂O）补足至 30 μL。扩增程序：94 ℃预变性 5 min；94 ℃变性 30 s，56 ℃退火 30 s，72 ℃延伸 20 s，共进行 26 个循环；72 ℃最终延伸 5 min；4 ℃保存。第二轮的

PCR 以第一轮 PCR 的纯化产物为模板(取 50 ng), 第二轮 PCR 体系: 2×Gflex PCR Buffer 15 μL, Tks Gflex DNA Polymerase (1.25 U/μL) 0.6 μL, Adapter I5 和 Adapter I7 各 1 μL, 用无菌水(ddH₂O)补足至 30 μL。扩增程序: 94 °C 预变性 5 min; 94 °C 变性 30 s, 56 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 20 s, 共进行 7 个循环; 72 °C 最终延伸 5 min; 4 °C 保存。扩增产物经过纯化后, 由 Illumina MiSeq 高通量测序平台进行测序, 使用 Greengenes 和 Unite 数据库比对进行个性化分析。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 软件进行统计分析, 采用 SPSS 27.0 软件对土壤理化性质、 α 多样性指数进行单因素方差分析(ANOVA)和邓肯检验(Duncan's test)多重比较分析。使用联川生物云平台完成柱状图、多样性等相关分析与绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 不同施肥处理显著改变了胶园土壤的理化性质。与 CK 相比, 所有施肥处理均

提高了土壤全磷和有效磷含量, 同时有机质、全氮、碱解氮、全钾、速效钾含量也有所提升, 表明施肥是改善土壤养分供给的重要措施。与 CF 相比, OF 处理显著提高了土壤有机质和有效磷含量, 分别提高了 35.40% 和 40.00%。缓释肥 SF 25% 处理的有效磷含量为 292.28 mg/kg, 较 CF 显著提升 43.00%, SF 50% 处理的全钾含量最高, 但其有效磷含量与 CF 无显著差异, 且显著低于 OF 和 SF 25% 处理。OF 处理相比 CK 和 CF 处理显著提高了土壤 pH, 而 2 种控释比例的缓释肥对土壤 pH 有所改善, 但与 CK 和 CF 相比未表现出显著差异。

2.2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

由表 3 可知, 土壤酶活性对不同施肥处理的响应具有显著特异性。SF 25% 处理的蔗糖酶和脲酶活性为所有施肥处理中最高, 较 CF 处理分别增加了 8.02% 和 74.19%。与 CF 处理相比, OF 处理显著提高了酸性磷酸酶和脲酶活性, 增幅分别为 42.31% 和 54.84%。此外, 缓释肥(SF 25%、SF 50%)处理显著提高了过氧化氢酶的活性。所有施肥处理均提高了土壤硝酸还原酶活性, 但不同施肥处理之间无显著差异。

表 2 不同施肥处理土壤基本理化性质的比较

Tab. 2 Comparison of basic chemical properties of soil under different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alk.-hydr. N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
CK	4.97±0.01 ^b	16.31±0.65 ^b	0.86±0.02 ^a	0.46±0.01 ^c	28.00±1.28 ^c	60.26±8.38 ^b	106.71±1.49 ^c	133.61±0.76 ^b
CF	4.88±0.05 ^b	17.14±1.18 ^b	0.98±0.10 ^a	1.73±0.10 ^a	29.32±1.33 ^{bc}	64.36±6.69 ^{ab}	204.58±27.74 ^b	233.26±66.97 ^a
OF	5.41±0.23 ^a	23.21±1.08 ^a	0.92±0.07 ^a	0.73±0.08 ^b	28.63±0.71 ^c	68.86±4.73 ^a	285.65±18.52 ^a	205.47±28.62 ^{ab}
SF 25%	5.01±0.16 ^b	17.34±1.72 ^b	1.05±0.20 ^a	1.87±0.12 ^a	30.24±0.55 ^{ab}	69.20±0.74 ^a	292.28±15.70 ^a	197.27±47.49 ^{ab}
SF 50%	5.21±0.44 ^{ab}	17.75±2.45 ^b	0.98±0.26 ^a	1.79±0.21 ^a	31.28±0.61 ^a	65.20±0.90 ^{ab}	163.76±48.71 ^b	166.10±48.14 ^{ab}

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

表 3 不同施肥处理对橡胶园土壤酶活性的影响

Tab. 3 Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activity in rubber plantations

mg/(g·d)

处理 Treatment	蔗糖酶 Invertase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	硝酸还原酶 Nitrate reductase
CK	2.09±0.17 ^c	0.95±0.20 ^{ab}	0.79±0.19 ^{bc}	1.24±0.07 ^d	1.93±0.30 ^b
CF	3.49±0.23 ^{ab}	0.78±0.15 ^b	0.62±0.08 ^c	1.56±0.10 ^b	2.56±0.19 ^a
OF	2.55±0.24 ^{bc}	1.11±0.12 ^a	0.96±0.06 ^{ab}	1.39±0.05 ^c	2.16±0.35 ^{ab}
SF 25%	3.77±1.19 ^a	0.56±0.10 ^c	1.08±0.06 ^a	1.86±0.03 ^a	2.32±0.26 ^{ab}
SF 50%	3.28±0.64 ^{ab}	1.13±0.11 ^a	0.88±0.19 ^{ab}	1.92±0.09 ^a	2.51±0.18 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 不同施肥处理对土壤微生物群落丰富度和 α 多样性的影响

由表 4 可知，各施肥处理对橡胶园土壤微生物 α 多样性无显著影响，但可看出，细菌群落稳定性较强，真菌群落对施肥更敏感。在细菌群落中，与 CK 相比，CF、OF 和 SF 50%处理的 Chao1 指数和辛普森指数均呈下降趋势，只有 SF 25%处理的香农指数略有提升。在真菌群落中，CK 的 α 多样性指数均为所有处理中最高，表明自然状态

下土壤真菌群落的物种丰富度和结构稳定性最佳；而 CF 和 SF 50%处理的 α 多样性指数相对较低，可能对真菌群落的多样性产生一定的抑制作用。OF 和 SF 25%处理的 α 多样性指数介于 CK、CF 和 SF 50%之间，且其 Chao1 指数和香农指数略高于 CF，表明这 2 种施肥模式对真菌群落的潜在抑制效应较弱。可见，SF 25%和 OF 处理对细菌和真菌群落的影响较为温和，而 CF 和 SF 50%处理则可能导致真菌多样性下降。

表 4 不同施肥处理土壤微生物 α 多样性分析
Tab. 4 Analysis of soil microbial diversity of different fertilization treatments

处理 Treatment	Chao 1 指数 Chao 1 index		辛普森指数 Simpson index		香农指数 Shannon index	
	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	细菌 Bacteria	真菌 Fungi
CK	3216.65±87.61 ^a	1217.72±116.73 ^a	0.9966±0.0004 ^a	0.9772±0.0145 ^a	9.51±0.20 ^a	7.15±0.55 ^a
CF	3122.44±190.47 ^a	918.45±157.21 ^{ab}	0.9957±0.0005 ^a	0.9053±0.0917 ^a	9.33±0.32 ^a	5.88±1.15 ^a
OF	3117.76±270.36 ^a	954.70±143.25 ^a	0.9948±0.0018 ^a	0.9610±0.0297 ^a	9.42±0.32 ^a	6.47±0.64 ^a
SF 25%	3204.91±188.49 ^a	1082.88±143.99 ^a	0.9961±0.0007 ^a	0.9105±0.0857 ^a	9.53±0.37 ^a	6.15±1.13 ^a
SF 50%	3084.94±103.38 ^a	997.04±29.78 ^a	0.9958±0.0003 ^a	0.8985±0.0853 ^a	9.31±0.11 ^a	5.64±1.00 ^a

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

2.4 不同施肥处理对土壤微生物群落 β 多样性的影响

为明确各施肥处理与对照土壤群落结构的变化，对土壤细菌和真菌群落的 β 多样性指数进行了 PCoA 分析 (图 1)。如图 1A 所示，PCo1 和 PCo2 分别解释了细菌群落结构整体变化的 34.27%和 10.34%，OF 和 SF 25%处理土壤微生物物种组成结构相似，CK、CF 和 SF 50%处理未发

生分离，这说明各组间差异不显著，表明不同施肥处理对细菌群落的影响不大。在真菌群落方面，PCo1 和 PCo2 对真菌群落结构整体变化的解释度分别为 15.78%和 10.95% (图 1B)；其中 CK 样本集中于负方向，OF 样本分布于中部，而 CF、SF 25%和 SF 50%样本则分别朝不同方向分散，凸显施肥的差异性，表明施肥处理对真菌群落组成具有显著影响。

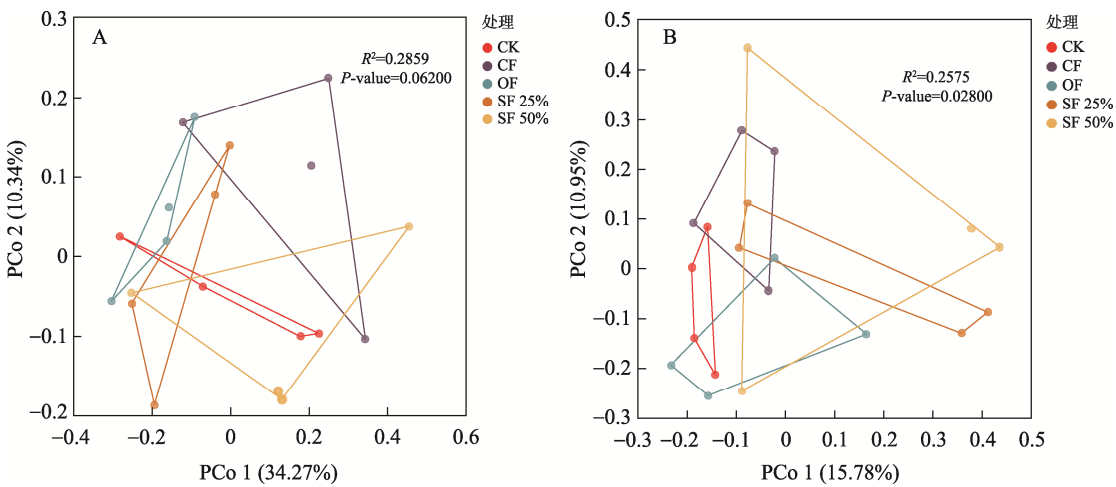


图 1 不同施肥处理下细菌 (A) 和真菌 (B) 的主坐标 (PCoA) 分析
Fig. 1 PCoA (principal coordinate analysis) of bacterial (A) and fungal (B) communities under different fertilization treatments

2.5 不同施肥处理对土壤细菌群落结构的影响

不同施肥处理下,土壤细菌群落在门水平上的组成基本相似,但各处理间优势菌门相对丰度占比不同。相对丰度大于 1% 的优势细菌门包括变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、放线菌门 (Actinobacteria) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes), 占总细菌群落数的 95.83% 以上。较 CF 相比, OF 和 SF 25% 处理增加了酸杆菌门丰度,增幅分别为 93.47% 和 64.58%; 此外, SF 25% 处理放线菌门和芽单胞菌门的丰度在所有施肥处理中最高, 但各处理间无显著差异, 且相较于 CF

处理有上升趋势。在属水平上, 相对丰度前十占比从大到小排列顺序依次为酸杆菌属 (*Acidibacter*)、朱氏杆菌属 (*Chujaibacter*)、酸热菌属 (*Acidothermus*)、罗河杆菌属 (*Rhodanobacter*)、哈良菌属 (*Haliangium*)、*Candidatus_Solibacter*、苔藓杆菌属 (*Bryobacter*)、*Ellin6067*、黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、东秀珠菌属 (*Dongia*)。与 CF 相比, OF 和 SF 25% 处理显著提高了朱氏杆菌属的相对丰度, 增幅分别为 351.56% 和 222.53%; SF 25% 处理的酸热菌属的相对丰度较 CF 显著提升, 增幅为 186.50%; OF 和 SF 25% 处理的苔藓杆菌属相对丰度高于其他处理组, 但处理间差异未达到显著水平 (图 2、图 3)。

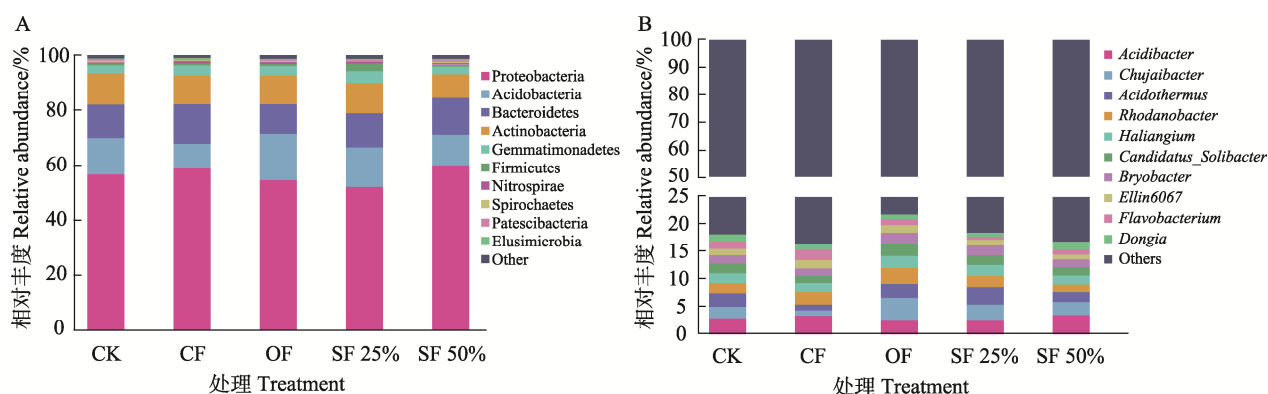
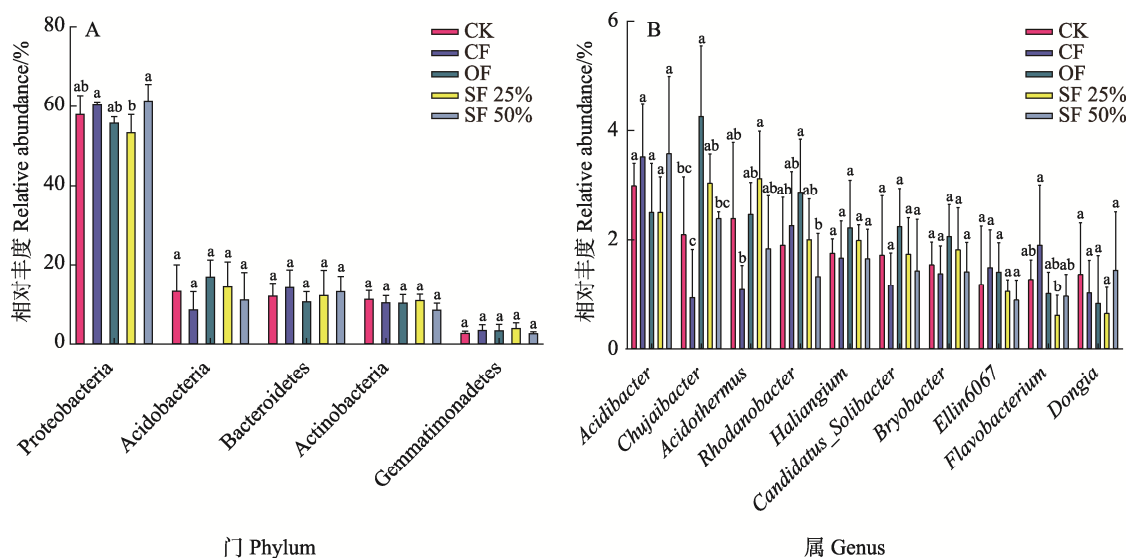


图 2 不同施肥处理下细菌门 (A) 和属 (B) 群落分布和组成

Fig. 2 Community distribution and composition of bacteria phyla (A) and genus (B) under different fertilization treatments



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 不同施肥处理下细菌优势菌门 (A) 和属 (B) 相对丰度差异

Fig. 3 Differences in the relative abundance of dominant bacteria phyla (A) and genus (B) under different fertilization treatments

2.6 不同施肥处理对土壤真菌群落结构的影响

对于土壤真菌群落,不同施肥处理下相对丰度大于 1%的菌门为子囊菌门 (Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、球囊菌门(Glomeromycota)、接合菌门 (Zygomycota) 和罗兹菌门 (Rozellomycota)。与 CF 相比, OF 和 SF 25%处理提高了子囊菌门的丰度,增幅分别为 38.43%和 11.13%,且二者均降低了罗兹菌门的丰度。OF 处理的球囊菌门丰度显著高于其他处理组。而 SF 50%处理虽整体优势菌群丰度有所提升,但球囊菌门的丰度较 CF 处理减少了 53.70%,且罗兹

菌门丰度的降幅最小。在属水平上,相对丰度前十占比从大到小排列顺序依次为粗糙孔菌属 (Trechispora)、柄孢壳菌属 (Podospora)、被孢霉属 (Mortierella)、镰孢菌属 (Fusarium)、Schizangiella、木霉属 (Trichoderma)、Leptodiscella、Mycoleptodiscus、拟鬼伞属(Coprinopsis)、赭霉属(Ochroconis)。与 CF 相比, OF 和 SF 25%处理显著提高了粗糙孔菌属的相对丰度,同时降低了镰孢菌属的相对丰度; OF 处理下, Leptodiscella 的相对丰度显著高于其他处理组 (图 4、图 5)。

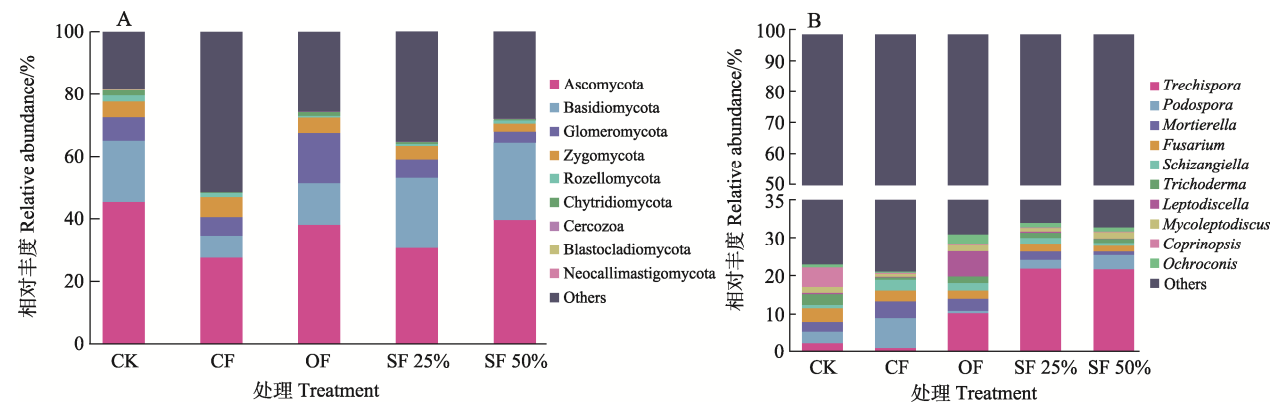
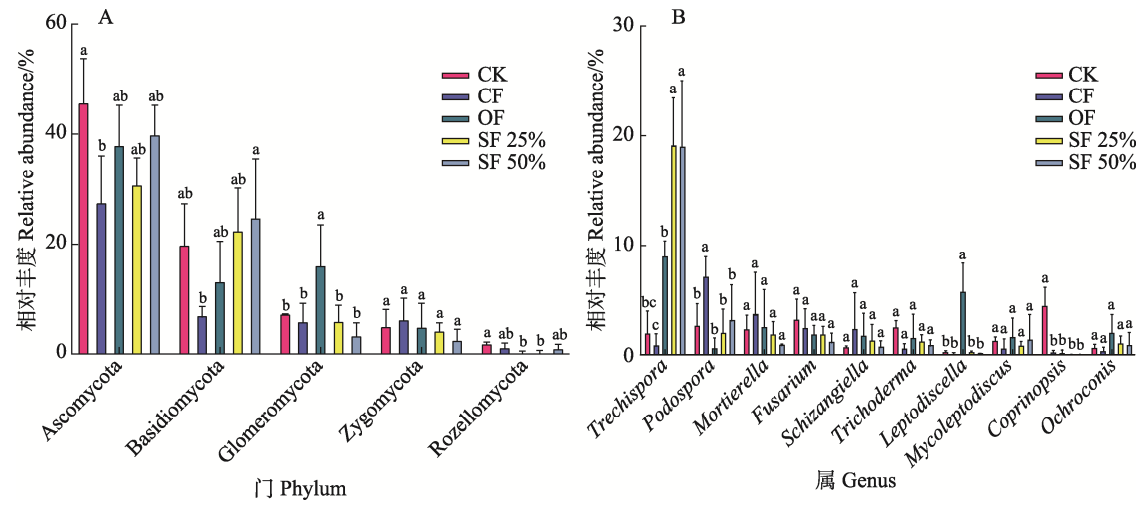


图 4 不同施肥处理下真菌门 (A) 和属 (B) 群落分布和组成

Fig. 4 Community distribution and composition of fungi phyla (A) and genus (B) under different fertilization treatments



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 5 不同施肥处理下真菌门 (A) 和属 (B) 相对丰度差异

Fig. 5 Differences in the relative abundance of dominant fungi phylum (A) and genus (B) under different fertilization treatments

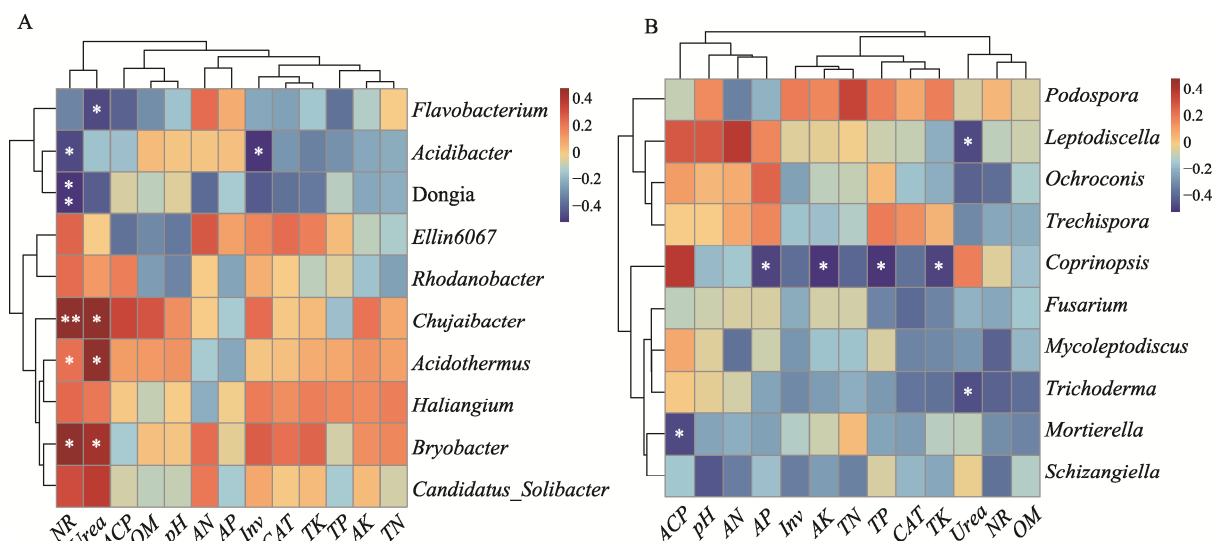
2.7 土壤理化性质、酶活性与土壤微生物群落结构的相关性分析

为探讨土壤微生物群落与土壤理化性质之间的关系,对细菌和真菌相对丰度前十的属与土壤

理化指标和酶活性进行 Spearman 相关性分析。结果表明,在细菌群落中,脲酶与酸热菌属 (Acidothermus)、朱氏杆菌属 (Chujaibacter) 和苔藓杆菌属 (Bryobacter) 呈显著正相关,与黄杆

菌属 (*Flavobacterium*) 呈显著负相关; 硝酸还原酶与朱氏杆菌属 (*Chujaibacter*) 和苔藓杆菌属 (*Bryobacter*) 呈显著正相关, 与酸杆菌属 (*Acidibacter*) 和东秀珠菌属 (*Dongia*) 呈显著负相关 (图 6A)。在真菌群落中, 酸性磷酸酶与

拟鬼伞属 (*Coprinopsis*) 呈正相关, 与被孢霉属 (*Mortierella*) 呈显著负相关; AP、AK、TP 和 TK 与拟鬼伞属呈显著负相关; 脲酶与 *Leptodiscella* 和木霉属 (*Trichoderma*) 呈显著负相关 (图 6B)。



A: 细菌; B: 真菌。*表示显著相关 ($P < 0.05$); **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

A: Bacteria; B: Fungi. * indicates significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

图 6 不同施肥处理属水平下丰度前十物种与土壤理化性质和酶活的相关性

Fig. 6 Correlations between top 10 genera with highest relative abundance under different fertilization treatments and soil physicochemical properties and enzyme activities

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤养分和酶活性的影响

土壤理化性质评价是土壤质量评估的核心基础, 其状况直接影响环境健康与农业生产力水平^[20]。本研究表明, 有机无机复混肥 (OF) 对橡胶园土壤化学性质的改善效果最为突出, 显著提高了土壤有机质含量和 pH, 这与 YANG 等^[21-22]的研究结果一致。有机肥替代氮肥能提升土壤养分水平, 这源于有机肥本身富含有机质和缓释性养分, 通过微生物分解作用持续释放碳源和矿质元素, 且其中的高浓度碱基阳离子能有效中和化肥引起的土壤酸化^[23-24]。相比之下, 缓释肥处理 (SF 25%、SF 50%) 对全氮、速效钾等指标未产生显著影响, 但 SF 25% 处理的有效磷含量显著增加, 这也与 NIU 等^[11]的研究结果相符。

土壤酶作为土壤生态系统的生物催化剂和代谢动力, 与土壤理化性质及农业管理措施密切相关, 在物质循环和能量转化中起重要作用。本研究中, 有机无机复混肥 (OF) 的施用提高了酸性

磷酸酶和脲酶的活性, 这与已有研究^[25-26]结论一致。脲酶活性的增强源于 OF 提供的有机质作为酶促反应底物, 进而刺激微生物分泌脲酶加速尿素水解, 从而提升氮素有效性; 而酸性磷酸酶活性的提升则与土壤有效磷含量提高有关, 通过补充丰富的有机碳源和磷底物, 促进微生物合成酸性磷酸酶, 进而加速有机磷矿化, 最终提高有效磷供应水平^[27]。缓释肥 (SF) 处理下, 过氧化氢酶活性较高, 可能是缓释控氮下能够保持氮素的持续供应^[28], 提高了过氧化氢酶的活性, 进而促进了土壤氮素利用效率^[29]。

3.2 不同施肥处理对土壤微生物多样性及群落结构的影响

细菌群落的多样性指数和丰富度指数是衡量群落多样性的核心指标, 其指数越高, 则表示微生物群落的丰富度和多样性越大^[30]。本研究表明, OF 和 SF 25% 处理的香农指数较 CF 处理均有所提高, 但差异未达到显著水平, 该结果与 WANG 等^[31]的研究结论一致, 表明细菌菌落对施肥干扰具有较强的抵抗能力。与之相比, 真菌群

落对施肥较为敏感。季凌飞等^[32]研究发现,施用化肥会降低土壤真菌群落的多样性,这与本研究结果一致,这可能与施用化肥造成的酸化及养分失衡密切相关,同时也受限于微生物适宜生长的pH范围^[33],但各处理间不存在显著差异性,说明不同施肥处理对土壤微生物群落多样性和物种丰富度产生影响相对有限。

不同施肥处理下,土壤细菌中的变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、芽单胞菌门等为优势菌门,这一结果与韩亚飞等^[34]关于土壤微生物群落组成的报道一致,其丰度变化与土壤碳、氮养分供应密切相关。本研究中,OF处理显著提高了酸杆菌门丰度,这与原慧芳等^[35]的研究结果一致,酸杆菌门参与复杂有机质的分解,其丰度提升可能是由于OF较高的碳含量,而酸杆菌门更适应碳源种类丰富的环境^[36]。NAVARRETE等^[37]研究也证实了pH升高或土壤有机质增加可能会提高酸杆菌门的丰度。SF 25%处理的放线菌门、芽单胞杆菌门丰度有上升趋势,放线菌门能够产生抗生素预防多数土传病害,增加养分供应,是潜在的生物防治来源^[38],而芽单胞杆菌门对有机质的分解具有重要作用^[39]。真菌群落分析表明,与CF相比,施用有机无机复混肥(OF)和缓释肥均提高了子囊菌门的相对丰度,其次为担子菌门和球囊菌门,这与杞美军等^[40]在胶园中药材根系内生真菌中的优势菌门一致。OF与CF相比,提升了子囊菌门且显著降低了罗兹菌门的丰度。子囊菌门作为农业生态系统中的重要优势真菌类群,是土壤有机质的主要分解者,在养分循环和碳循环中发挥着关键作用^[41]。而罗兹菌门中的大多数真菌属于寡营养菌,在养分贫瘠的土壤中更具适应性。因此,土壤养分条件的改善会导致其相对丰度下降^[42]。而SF 50%处理下降低了球囊菌门的丰度,球囊菌门是丛枝菌根真菌(AMF)的主要类群,其丰度降低将直接导致植物磷营养效率下降。综上所述,不同施肥对橡胶园土壤微生物群落结构的调控存在显著差异:OF通过提升土壤碳含量和有机质水平,富集了酸杆菌门、子囊菌门等分解型功能菌群,强化了土壤养分循环能力,同时抑制了寡营养型罗兹菌门的生长,整体优化了微生物群落功能;SF 25%通过富集放线菌门、芽单胞菌门等有益菌群,在提升土壤抗病性和养分供应方面表现突出。这种群落结构差异与OF处理提升脲酶和SF 25%处理的高有效磷含量相互印

证,进一步支撑OF和SF 25%作为优化胶园土壤健康的有效策略。

3.3 橡胶园土壤养分、酶活性和微生物群落的交互作用

土壤养分、酶活性和微生物群落是维持土壤微生态环境的重要因素,三者之间相互作用、相互制约^[43]。本研究通过相关性分析发现,朱氏杆菌属和苔藓杆菌属与硝酸还原酶、脲酶活性均呈显著正相关,同时酸热菌属与脲酶活性也呈显著正相关。脲酶作为一种催化尿素水解成氨与二氧化碳的关键酶,可将植物和微生物无法直接利用的有机氮转化成植物易于吸收的氮源^[44],表明这些细菌优势属可能通过积极参与土壤氮素转化过程而适应环境,并在土壤氮循环中发挥重要作用。相关研究也表明,朱氏杆菌属和酸热菌属是土壤氮循环中较为活跃的细菌属,可能与土壤氮素积累过程密切相关^[45]。真菌拟鬼伞属与土壤磷、钾相关指标(AP、AK、TP、TK)呈显著负相关,与酸性磷酸酶活性呈正相关,说明该属可能通过分泌酸性磷酸酶降解土壤有机磷,以适应低磷钾的土壤环境。此外,*Leptodiscella*和木霉属与脲酶活性呈显著负相关,被孢霉属与酸性磷酸酶活性呈显著负相关,表明真菌优势属对氮磷代谢酶活性的调控与细菌存在明显分化。

然而,土壤和微生物群落作为一个复杂的生态系统,土壤肥力、酶活性与微生物群落的交互作用是一个动态过程^[22],且在不同施肥模式下的长期响应机制仍需深入研究。因此,未来应进一步探讨不同施肥处理对土壤肥力、酶活性和微生物群落的长期影响,以及它们之间的协同效应,以优化土壤健康管理策略。

4 结论

本研究通过分析不同施肥处理对橡胶园土壤肥力、酶活性及微生物群落结构的影响,得出结论:有机无机复混肥(OF)处理显著提升土壤有机质、有效磷含量及pH,同时增强脲酶和酸性磷酸酶活性;缓释肥SF 25%(控氮25%)处理提高了有效磷含量、过氧化氢酶活性及富集有益微生物(酸杆菌门、朱氏杆菌属、担子菌门);缓释肥SF 50%(控氮50%)处理对土壤肥力和微生物群落的改善效果有限,甚至降低球囊菌门相对丰度;施肥对真菌群落结构影响显著,对细菌 α 多样性无显著影响,但OF和SF 25%处理可缓解

化肥对真菌多样性的抑制。综上, 有机无机复混肥 (OF) 和缓释肥 SF 25% 可作为橡胶园土壤健康管理的推荐施肥策略, 本研究结果为橡胶产业可持续发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] HUANG Y Y, JING Y D, BEI M R, YANG H Z, CHA Z Z, LIN Q H, LUO W. Short-term effects of organic amendments on soil fertility and root growth of rubber trees on Hainan Island, China[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(6): 2137-2144.
- [2] 华元刚, 刘海林, 贝美容, 杨红竹, 林清火, 茶正早. 施肥对天然橡胶胶乳及生胶性能的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(8): 1471-1475.
HUA Y G, LIU H L, BEI M R, YANG H Z, LIN Q H, CHA Z Z. Effects of fertilizing on properties of natural rubber latex and raw rubber[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(8): 1471-1475. (in Chinese)
- [3] 王大鹏, 罗雪华, 郭澎涛, 陈传洋, 张永发, 薛欣欣, 赵春梅, 吴小平, 茶正早. 橡胶林氮肥施用后在土壤中的残留、累积和迁移[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1361-1368.
WANG D P, LUO X H, GUO P T, CHEN C Y, ZHANG Y F, XUE X X, ZHAO C M, WU X P, CHA Z Z. Residue, accumulation and translocation of nitrogen fertilizer in soil of rubber plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(7): 1361-1368. (in Chinese)
- [4] JIN N, JIN L, WANG S Y, LI J W, LIU F H, LIU Z C, LUO S L, WU Y, LV J, YU J H. Reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer affects the soil microbial community and yield and quality of lettuce[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 863325.
- [5] LIU J, SHU A P, SONG W F, SHI W C, LI M C, ZHANG W X, LI Z Z, LIU G R, YUAN F S, ZHANG S X, LIU Z B, ZHENG G. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [6] JIN X, CAI J W, YANG S Y, LI S P, FU C M, LI C Z, DENG Y, HUANG J Q, RUAN Y Z, LI C J. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer and slow-release fertilizer benefits soil microbial diversity and pineapple fruit yield in the tropics[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 189: 104974.
- [7] BEI S K, ZHANG Y L, LI T T, CHRISTIE P, LI X L, ZHANG J L. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 260: 58-69.
- [8] LIU C Y, HAN D F, YANG H Q, LIU Z L, GAO C D, LIU Y P. Effects of peach branch organic fertilizer on the soil microbial community in peach orchards[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1223420.
- [9] QASWAR M, HUANG J, AHMED W, LI D C, LIU S J, ZHANG L, CAI A D, LIU L S, XU Y M, GAO J S, ZHANG H M. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: 104569.
- [10] NI B, LIU M Z, LYU S Y, XIE L H, WANG Y F. Multi-functional slow-release organic-inorganic compound fertilizer[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(23): 12373-12378.
- [11] NIU T H, XIE J M, LI J, ZHANG J, ZHANG X D, MA H Y, WANG C. Response of rhizosphere microbial community of Chinese chives under different fertilization treatments[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1031624.
- [12] YIN J, LI Y, W Z, LIU H L, DUAN Y L, JIAO Y Q, ZHU Z Q, LUO J L, XIE C, ZHANG H X, ZHANG X, ZHANG K L, LI D. Using slow-release fertilizers ensures the maintenance of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) production by enhancing soil nutrient supply and optimizing microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 195: 105265.
- [13] 邱亚娟, 李艳蕊, 陈莺宇, 黄钰芳, 邵晓龄, 杨扶德, 安志刚, 陈林杰, 谢田朋, 高健. 连作对纹党根际土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(3): 806-816.
QIU Y J, LI Y R, CHEN Y Y, HUANG Y F, SHAO X L, YANG F D, AN Z G, CHEN L J, XIE T P, GAO J. Effects of continuous cropping on enzyme activities and microbial community structure in the rhizosphere soil of *Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(3): 806-816. (in Chinese)
- [14] GONG X W, LIU C J, LI J, LUO Y, YANG Q H, ZHANG W L, YANG P, FENG B L. Responses of rhizosphere soil properties, enzyme activities and microbial diversity to intercropping patterns on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104355.
- [15] 方海瑞. 不同施肥措施对土壤微生物群落及生态功能的影响[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
FANG H R. The effects of different fertilization measures on soil microbial communities and ecological functions[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2024. (in Chinese)
- [16] MORÓN-CRUZ J A, GARCÍA-OLIVA F, TAPIA-TORRES Y. Land use change and type of fertilization affect the stability and microbial activity, stoichiometry, and nutrient dynamics in agricultural and forest soils in Avándaro, México

- co[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 204: 105668.
- [17] 陈七双, 王坚, 李雪枫, 罗宇航, 杨舒萍. 根系分泌物和栽培基质对橡胶树幼苗生长与生理特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(6): 1363-1375.
- CHEN Q S, WANG J, LI X F, LUO Y H, YANG S P. Effects of root exudates and cultivation substrates on growth and physiological characteristics of *Hevea brasiliensis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(6): 1363-1375. (in Chinese)
- [18] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [19] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. *土壤通报*, 1980(5): 37-38.
- ZHOU L K, ZHANG Z M. Soil enzyme activity determination method[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980(5): 37-38. (in Chinese)
- [20] LI S, WU J C, WANG X Q, MA L. Economic and environmental sustainability of maize-wheat rotation production when substituting mineral fertilizers with manure in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 122683.
- [21] YANG Q, LI J L, XU W, WANG J J, JIANG Y M, ALI W, LIU W J. Substitution of inorganic fertilizer with organic fertilizer influences soil carbon and nitrogen content and enzyme activity under rubber plantation[J]. *Forests*, 2024, 15(5): 756.
- [22] 杨旭, 刘海林, 黄艳艳, 杨红竹, 贝美容, 林清火. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土微生物群落和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(4): 619-629.
- YANG X, LIU H L, HUANG Y Y, YANG H Z, BEI M R, LIN Q H. Effects of application of organic-inorganic compound fertilizers on microbial communities and enzyme activities in tropical paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 619-629. (in Chinese)
- [23] 宋震震, 李絮花, 李娟, 林治安, 赵秉强. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525-533.
- SONG Z Z, LI X H, LI J, LIN Z A, ZHAO B Q. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 525-533. (in Chinese)
- [24] ZHANG Z Y, ZHANG P S, LIN Q H, CHA Z Z, LUO W. Response of bacterial communities in rubber plantations to different fertilizer treatments[J]. *3 Biotech*, 2019, 9(8): 293.
- [25] 张传更, 高阳, 张立明, 司转运, 李双. 水分管理措施对施用有机肥麦田土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 38-44.
- ZHANG C G, GAO Y, ZHANG L M, SI Z Y, LI S. Effects of water management on soil enzyme activities and microbial community structure in wheat fields with organic fertilizer application[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 38-44. (in Chinese)
- [26] 李晨华, 贾仲君, 唐立松, 吴宇澄, 李彦. 不同施肥模式对绿洲农田土壤微生物群落丰度与酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 567-574.
- LI C H, JIA Z J, TANG L S, WU Y C, LI Y. Effect of model of fertilization on microbial abundance and enzyme activity in oasis farmland soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 567-574. (in Chinese)
- [27] CHANG E H, CHUNG R S, TSAI Y H. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 132-140.
- [28] 周媛, 李平, 郭魏, 齐学斌. 施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 268-273.
- ZHOU Y, LI P, GUO W, QI X B. Influence of nitrogen application and reclaimed wastewater irrigation on greenhouse soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 268-273. (in Chinese)
- [29] 高转琴, 王丹, 牛灵安, 郝晋珉. 冀南平原盐渍化改造区土壤过氧化氢酶活性变化研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1434-1441.
- GAO Z Q, WANG D, NIU L A, HAO J M. Soil catalase activities in salinized rehabilitation area of the southern Hebei plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1434-1441. (in Chinese)
- [30] LU L L, TONG C Q, LIU Y Y, YANG W B. Analysis of physicochemical properties, enzyme activity, microbial diversity in rhizosphere soil of coconut (*Cocos nucifera* L.) under organic and chemical fertilizers, irrigation conditions[J]. *Agriculture*, 2024, 14(11): 1937.
- [31] WANG J C, XUE C, SONG Y, WANG L, HUANG Q W, SHEN Q R. Wheat and rice growth stages and fertilization regimes alter soil bacterial community structure, but not diversity[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1207.
- [32] 季凌飞, 倪康, 马立锋, 陈兆杰, 赵远艳, 阮建云, 郭世伟. 不同施肥方式对酸性茶园土壤真菌群落的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 8158-8166.
- JI L F, NI K, MA L F, CHEN Z J, ZHAO Y Y, RUAN J Y, GUO S W. Effect of different fertilizer regimes on the fungal community of acidic tea-garden soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8158-8166. (in Chinese)

- [33] ZENG J, LIU X J, SONG L, LIN X G, ZHANG H Y, SHEN C C, CHU H Y. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 92: 41-49.
- [34] 韩亚飞, 伊文慧, 王文波, 王延平, 王华田. 基于高通量测序技术的连作杨树人工林土壤细菌多样性研究[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2014, 49(5): 1-6.
HAN Y F, YI W H, WANG W B, WANG Y P, WANG H T. Soil bacteria diversity in continuous cropping poplar plantation by high throughput sequencing[J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2014, 49(5): 1-6. (in Chinese)
- [35] 原慧芳, 李金威, 黄菁, 魏丽萍, 周会平, 岩香甩. 6 种施肥处理对山地胶园土壤细菌群落的影响[J]. *西南农业学报*, 2025, 38(8): 1714-1725.
YUAN H F, LI J W, HUANG J, WEI L P, ZHOU H P, YAN X S. Effect of six fertilization treatments on soil bacterial communities in mountainous rubber plantations[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 38(8): 1714-1725. (in Chinese)
- [36] XU M, XIAN Y, WU J, GU Y F, YANG G, ZHANG X H, PENG H, YU X Y, XIAO Y L, LI L. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2534-2542.
- [37] NAVARRETE A A, KURAMAE E E, DE HOLLANDER M, PIJL A S, VAN VEEN J A, TSAI S M. Acidobacterial community responses to agricultural management of soybean in Amazon forest soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, 83(3): 607-621.
- [38] YAO L L, KONG L, YANG Q L, NIAN H J, LIANG J P. Analysis of microbial diversity in rhizosphere soil of *Panax notoginseng* under different water and microbial fertilizer conditions[J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 922.
- [39] 许怡静. 西藏地区不同养殖方式及堆肥奶牛粪便中 ARGs 分布及影响因素的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
XU Y J. The distribution of antibiotic resistance genes (ARGs) in dairy cow manure and their influencing factors in composted dairy cow manure under different breeding methods in the Tibet region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)
- [40] 杞美军, 宋德晶, 董诗浪, 王步天, 杜华波, 曲鹏, 普天华, 施学东, 吕维香, 葛宇. 橡胶林下中药材根系内生真菌多样性及其与根际土壤理化性质的相关分析[J]. *南方农业学报*, 2025, 56(4): 1112-1123.
QI M J, SONG D J, DONG S L, WANG B T, DU H B, QU P, PU T H, SHI X D, LYU W X, GE Y. Diversity of endophytic fungi in the roots of traditional Chinese medicines under rubber forests and their correlation with the physico-chemical properties of rhizosphere soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2025, 56(4): 1112-1123. (in Chinese)
- [41] NING Q, CHEN L, JIA Z J, ZHANG C Z, MA D H, LI F, ZHANG J B, LI D M, HAN X R, CAI Z J, HUANG S M, LIU W Z, ZHU B, LI Y. Multiple long-term observations reveal a strategy for soil pH-dependent fertilization and fungal communities in support of agricultural production[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 293: 106837.
- [42] 高佩, 李鑫慧, 李成一, 柴瑜, 王朝慧, 马婧娟, 袁颖, 李希来, 张静. 黄河源区高寒草甸土壤微生物群落组成对地形生境的响应[J/OL]. *环境科学*, 1-19. (2025-06-04) [2025-12-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202503195>.
GAO P, LI X H, LI C Y, CHAI Y, WANG C H, MA J J, YUAN Y, LI X L, ZHANG J. Response of soil microbial community composition to topography in the Yellow River source basin[J/OL]. *Environmental Science*, 1-19. (2025-06-04)[2025-12-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202503195>. (in Chinese)
- [43] WANG Z R, LIU Y B, ZHAO L, ZHANG W L, LIU L C. Change of soil microbial community under long-term fertilization in a reclaimed sandy agricultural ecosystem[J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6497.
- [44] WU B B, WANG P, DEVLIN A T, XIAO S S, SHU W, ZHANG H, DING M J. Influence of soil and water conservation measures on soil microbial communities in a citrus orchard of southeast China[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(2): 319.
- [45] 黄思菁, 肖金讯, 杨磊, 肖楚文, 宋潇瑜, 朱丹丹, 杨友才. 四种复种模式对烟草黑胫病发生及土壤细菌群落多样性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(3): 9-15, 49.
HUANG S J, XIAO J X, YANG L, XIAO C W, SONG X Y, ZHU D D, YANG Y C. The effects of four multiple cropping modes on the occurrence of tobacco black shank and bacterial community diversity in soil[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2025, 51(3): 9-15, 49. (in Chinese)