

豆科绿肥对幼龄胶园土壤养分及叶片氮含量的影响及作用路径分析

张婧旻¹, 李彩兰², 薛欣欣^{1*}, 吴晓霜¹, 罗雪华¹, 王禹¹, 张永发¹, 任常琦¹, 赵春梅¹, 王文斌^{1*}

1. 中国热带农业科学院橡胶研究所/中国热带农业科学院土壤肥料研究中心/农业农村部橡胶树生物学与遗传资源利用重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地-海南省热带作物栽培生理学重点实验室, 海南海口 571101; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665099

摘要: 为明确不同豆科绿肥在幼龄胶园土壤改良效果及橡胶树氮素吸收的影响, 本研究选取柱花草、葛藤和山毛豆 3 种豆科绿肥进行间作种植, 分析其对土壤养分的影响作用; 采用 ^{15}N 自然丰度 ($\delta^{15}\text{N}$) 和偏最小二乘路径分析 (PLS-PM), 解析绿肥对土壤氮含量及橡胶树叶片氮素吸收的影响路径。结果表明: 与自然生草对照相比, 葛藤和柱花草处理显著提高土壤碱解氮含量, 增幅分别为 30.54% 和 31.25%, 但速效钾含量降低 8.40% 和 6.87%; 葛藤处理对土壤有机质和有效磷含量的提升效果最为明显, 增幅分别为 12.60% 和 30.94%。柱花草处理对橡胶树叶片全氮含量的提升效果相对较高 (增幅为 25.86%)。相关性分析和偏最小二乘路径分析进一步表明, 豆科绿肥与土壤碱解氮和全氮含量呈显著正相关, 且具有显著正向效应。综上所述, 在本研究条件下, 豆科绿肥主要通过提高土壤碱解氮含量来促进橡胶树叶片对氮素的吸收和积累。因此, 在幼龄胶园管理中, 合理选择或混种豆科绿肥, 可提升土壤和橡胶树氮含量, 有利于实现胶园生态系统的可持续生产。

关键词: 绿肥; 橡胶树; 土壤养分; 氮含量; ^{15}N 自然丰度

中图分类号: S794.1; S714.8 文献标志码: A

Influence of Soil Nutrients and Leaf Nitrogen Content in Young Rubber Plantations Intercropped with Different Leguminous Green Manures: A Pathway Analysis

ZHANG Jingmin¹, LI Cailan², XUE Xinxin^{1*}, WU Xiaoshuang¹, LUO Xuehua¹, WANG Yu¹, ZHANG Yongfa¹, REN Changqi¹, ZHAO Chunmei¹, WANG Wenbin^{1*}

1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences / Soil and Fertilizer Research Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Rubber Tree, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / State Key Laboratory Incubation Base for Cultivation & Physiology of Tropical Crops, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665099, China

Abstract: *Stylosanthes guianensis*, *Pueraria phaseoloides*, and *Tephrosia candida* were selected to investigate the impact mechanisms of green manures on soil physicochemical properties and nitrogen content in rubber tree leaves, through the analysis of natural abundance of ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) and partial least squares path analysis (PLS-PM) to elucidate the effects of different leguminous green manures on soil improvement and nitrogen uptake in young rubber plantations. Results showed that *P. phaseoloides* and *S. guianensis* treatments significantly increased soil alkaline nitrogen by

收稿日期 2025-02-10; 接受日期 2025-03-04

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630022023002, No. 1630022022002); 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFD1901403)。

作者简介 张婧旻 (1994—), 女, 博士, 研究实习员, 研究方向: 作物营养与地力提升。*通信作者 (Corresponding author): 薛欣欣 (XUE Xinxin), E-mail: xuexinxin_2010@163.com; 王文斌 (WANG Wenbin), E-mail: mywwb@163.com。

30.54% and 31.25%, respectively, while reducing available potassium by 8.40% and 6.87%, compared to natural grass cover. *P. phaseoloides* treatment had the strongest effect on increasing soil organic matter and available phosphorus content, with increases of 12.60% and 30.94%, respectively. *S. guianensis* treatment had the strongest effect on increasing the total nitrogen content in rubber trees leaves (an increase of 25.86%). Correlation analysis and PLS-PM indicated a significant positive correlation between leguminous green manures and soil alkaline nitrogen and total nitrogen content, with a significant positive effect. In conclusion, under the conditions of this study, leguminous green manures promoted the absorption and accumulation of nitrogen in rubber tree leaves by increasing soil alkaline nitrogen content. The rational selection or mixed planting of leguminous green manures can improve the nutrient absorption efficiency of rubber trees and contribute to the sustainable production of rubber plantations.

Keywords: green manure; rubber tree; soil nutrients; nitrogen content; ^{15}N natural abundance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.008

天然橡胶作为国家重要的战略物资和热带地区农业经济的支柱产业,其可持续生产对保障国家经济安全具有重要意义^[1]。橡胶树(*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)是天然橡胶的主要来源,其生长和产量不仅取决于遗传特性,更与土壤肥力状况和养分管理水平密切相关^[2-4]。在众多营养元素中,氮素作为植物生长发育的关键限制因子,对橡胶树的生物量积累和胶乳合成具有显著的调控作用^[5-6]。特别是在幼龄胶园阶段,由于橡胶树根系尚未完全发育,其养分吸收能力相对有限,这使得土壤改良措施的实施尤为重要。

种植豆科绿肥作为一种环境友好型的土壤改良措施,在农业生态系统中的应用价值日益凸显^[7-9]。其独特的生物固氮能力不仅能够提高土壤氮素含量,还能通过根系分泌和残体分解等途径改善土壤理化性质^[10-11]。在胶园生态系统中,间作豆科绿肥能够有效促进橡胶树根系发育,提高土壤有机质和有效氮含量^[12]。已有研究显示,胶园-柱花草间作系统可显著增加土壤全氮和碱解氮含量^[13],间种葛藤可调节土壤酸碱度,提高土壤肥力^[14-16]。然而,现有研究多集中于单一豆科绿肥品种的效应评估,对不同豆科绿肥的作用机制缺乏系统性比较。特别是豆科绿肥影响幼龄胶园“土壤—植物”系统氮素循环的作用路径尚不清楚。

基于此,本研究选取柱花草、葛藤和山毛豆3种典型豆科绿肥,利用 ^{15}N 自然丰度($\delta^{15}\text{N}$)和偏最小二乘路径分析,系统分析不同豆科绿肥对土壤养分和橡胶树叶片氮含量的影响及其作用路径,评估其在胶园土壤改良中的潜力,旨在为胶园土壤改良和绿色可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在海南省儋州市中国热带农业科学院试验场红城队进行。该地区属于典型的热带海洋性季风气候,年均气温21.5~28.5℃,年均日照时数2100 h,年均降水量约1600 mm,其中7—9月的降雨量占全年总降雨量的70%。试验地为幼龄胶园,于2021年11月开垦定植,种植材料为一年生的热研917芽接苗,株行距为3.0 m×7.0 m,橡胶树种植后下一年进行绿肥种植田间试验。土壤类型为花岗岩发育的砖红壤。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 本研究采用随机区组设计,共设置4个处理,分别为:(1)自然生草(CK);(2)葛藤;(3)山毛豆;(4)柱花草。每个处理小区面积均为150 m²,并进行3次重复。绿肥于2022年5月播种,生长期,试验区域不施用肥料,以模拟自然生长条件。绿肥种植采用穴播法,葛藤播种密度为20 cm×30 cm,播种量为20 kg/hm²;山毛豆播种密度为20 cm×30 cm,播种量为30 kg/hm²;柱花草播种密度为40 cm×40 cm,播种量为15 kg/hm²。绿肥出苗后1个月,所有处理均进行人工去除杂草,之后在绿肥覆盖的情况下无需再进行除草。自然生草区则每2个月进行一次人工控萌。

1.2.2 样品采集与指标测定 (1)样品采集。于橡胶树落叶时期(2024年1月),在每个试验小区内随机取3个1 m×1 m的样方,分别采集3种绿肥和自然生草样品。所有样品经烘干粉碎后,测定其全氮和 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度。同时,使用土钻采集与绿肥样方对应的土样,将0~20 cm土层的样品充分混匀后装入密封袋。去除混合土样中的石块、根系等杂物后,将土样风干、研磨,并过1 mm筛,用于测定土壤的基本理化性质。此外,选取

与绿肥小区对应的橡胶树,采集其树上尚未掉落的叶片样品,用于测定橡胶树叶片全氮和 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度。

(2) 指标测定。土壤 pH 采用土水质量比为 1:5 的电位法测定,有机质采用重铬酸钾外加热法测定,碱解氮采用碱解蒸馏法测定,速效磷采用 $\text{NH}_4\text{F-HCl}$ 浸提-连续流动分析仪法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

土壤和植物样品中全氮含量及 ^{15}N 自然丰度 ($\delta^{15}\text{N}$) 采用元素分析仪 (Thermo Flash EA1112) - 稳定性同位素质谱联用仪 (GV IsoPrime JB312) 测定。 $\delta^{15}\text{N}$ 的计算式:

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}$$

式中, R_{sample} 表示样品中 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的相对丰度; R_{standard} 表示大气 N_2 中 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的相对丰度。

1.3 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件单因素方差分析显著性;利用 Origin Pro 2022 软件进行数据绘制,并对绿

肥和橡胶叶片氮含量与土壤理化性质进行相关性分析;利用 R 语言的“PLS-PM 包”分析豆科绿肥通过改变土壤氮含量,进而影响幼龄橡胶树叶片氮含量的作用路径。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥对胶园土壤理化性质的影响

如表 1 所示,与对照相比,柱花草、葛藤和山毛豆处理均对土壤养分含量产生了明显影响。柱花草和葛藤处理显著提高了土壤碱解氮含量,分别增加 30.54%和 31.25%;土壤有机质和有效磷含量在各绿肥处理下较对照均有所提高,其中葛藤处理的提升幅度最为明显,分别增加 12.60%和 30.94%。柱花草和葛藤处理的速效钾含量较对照分别降低 8.40%和 6.87%,而山毛豆处理速效钾含量则较对照增加 29.01%。此外,不同绿肥处理下土壤 pH 呈现下降趋势,但各处理较对照差异不显著。与对照相比,柱花草、葛藤和山毛豆处理的 pH 分别降低 5.58%、1.46%和 3.00%。

表 1 不同绿肥种植区土壤基本理化性质

Tab. 1 Soil basic physicochemical properties in different green manure cultivation areas

处理 Treatment	pH	碱解氮 Alkaline nitrogen ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	4.78±0.16 ^a	47.39±6.69 ^b	13.59±0.32 ^a	19.62±2.66 ^a	43.67±9.07 ^a
柱花草	4.51±0.15 ^a	61.86±5.25 ^a	14.15±0.67 ^a	20.02±0.39 ^a	40.00±9.64 ^a
葛藤	4.71±0.29 ^a	62.19±0.55 ^a	15.31±0.41 ^a	25.69±2.78 ^a	40.67±10.2 ^a
山毛豆	4.64±0.28 ^a	58.31±8.42 ^{ab}	13.78±1.49 ^a	26.48±2.67 ^a	56.33±8.33 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.2 不同绿肥对胶园土壤全氮和碳氮比 (C/N) 的影响

不同绿肥处理均在一定程度上提高了土壤全氮含量 (图 1A)。与对照相比,葛藤处理的土壤全氮含量显著增加 13.91%,柱花草和山毛豆处理的土壤全氮含量分别增加 2.61%和 4.78%。在土壤碳氮比方面 (图 1B),柱花草处理的土壤碳氮比较对照增加 1.38%,而葛藤和山毛豆处理的土壤碳氮比分别下降 1.24%和 3.32%,但各绿肥处理之间的差异均不显著。

2.3 不同绿肥对橡胶叶片氮含量的影响

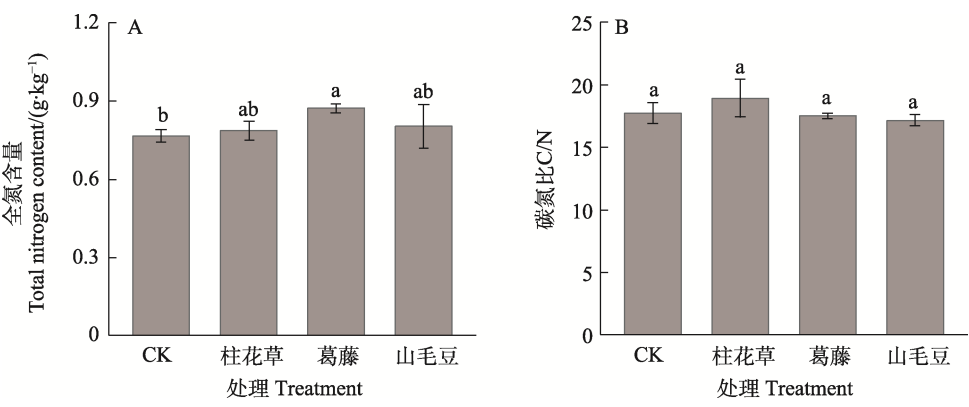
如图 2A 所示,各绿肥处理的全氮含量较对照均有不同程度的提升,分别增加 16.21 倍、0.45 倍和 0.69 倍。其中,葛藤处理的全氮含量显著高

于对照,且较柱花草和山毛豆处理分别增加 10.84 倍和 9.18 倍,但 3 种处理间差异不显著。在橡胶树叶片全氮含量方面 (图 2B),与对照相比,柱花草、葛藤和山毛豆处理均对橡胶树叶片全氮含量产生了积极影响,分别增加 25.86%、16.28%和 18.06%。

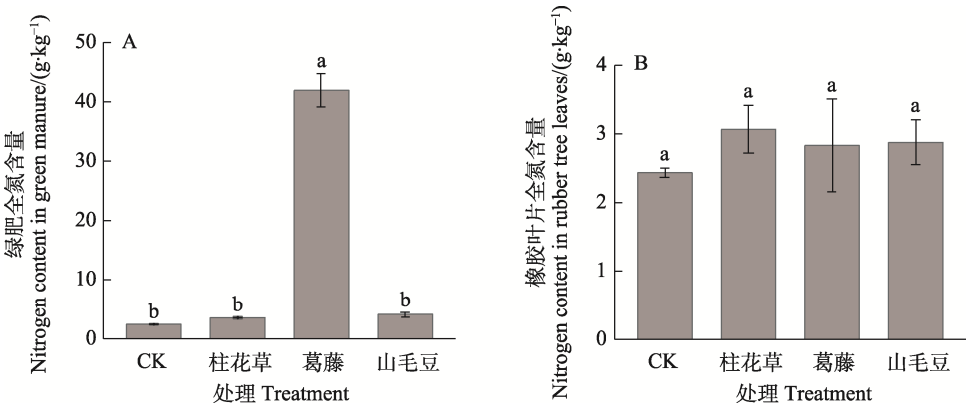
2.4 不同绿肥对橡胶叶片及土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响

如图 3A 所示,各绿肥处理的绿肥 ^{15}N 自然丰度 ($\delta^{15}\text{N}$) 存在显著差异。与对照相比,柱花草、葛藤和山毛豆处理的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别显著降低 2.90 倍、2.74 倍和 2.26 倍。其中,柱花草处理的 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显低于葛藤和山毛豆处理,分别降低 8.48%和 33.90%。在橡胶叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值方面 (图 3B),葛藤处理的橡胶叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于柱花草和山毛

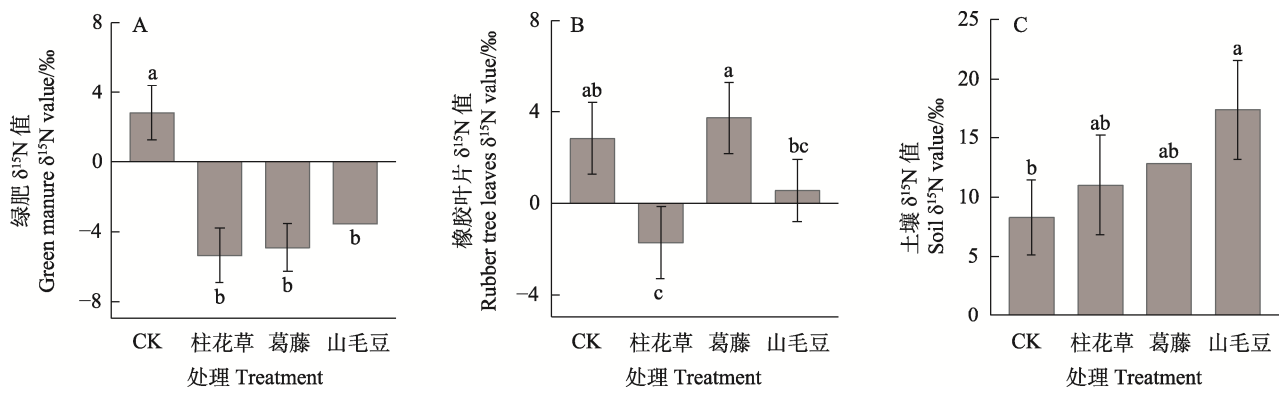
豆处理，分别增加 146.31%和 85.37%；而柱花草处理的橡胶叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值则显著低于对照、葛藤和山毛豆处理，分别降低 2.63 倍、3.16 倍和 1.32 倍。不同绿肥处理的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值均有明显提升(图 3C)，其中，山毛豆处理土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值较对照显著增加了 1.01 倍。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).
图 1 不同绿肥种植区土壤全氮含量及碳氮比
Fig. 1 Soil total nitrogen content and C/N in different green manure cultivation areas



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).
图 2 不同绿肥种植区绿肥与橡胶叶片氮含量
Fig. 2 Nitrogen content of green manure and rubber tree leaves in different green manure cultivation areas



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).
图 3 不同绿肥种植区绿肥、橡胶叶片及土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值
Fig. 3 $\delta^{15}\text{N}$ value of green manure, rubber tree leaves and soil in different green manure cultivation areas

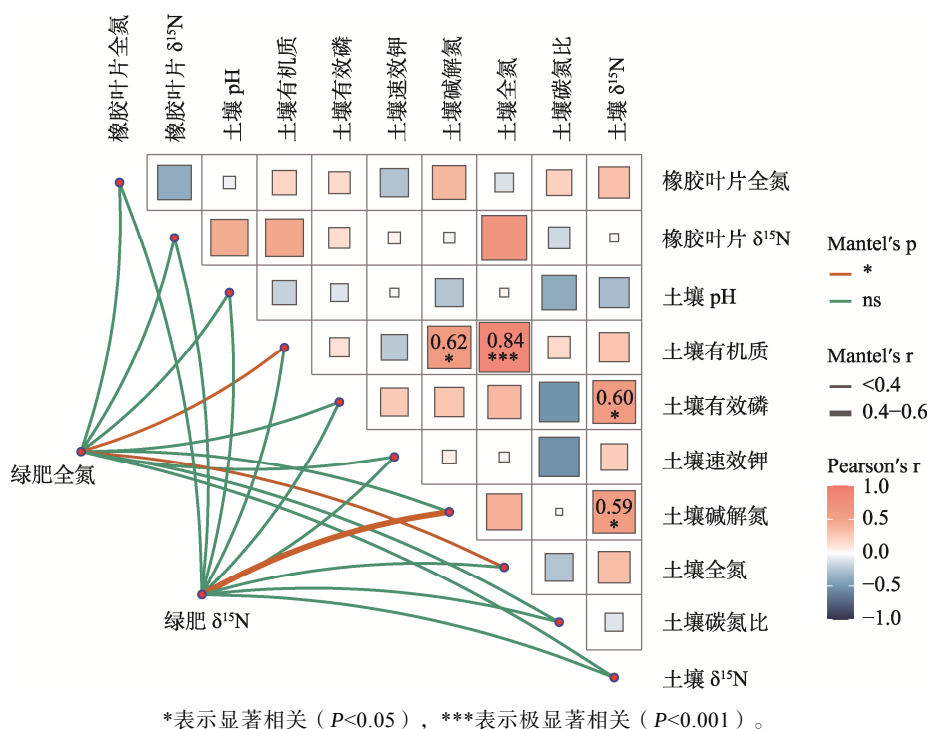
2.5 绿肥氮含量与胶园土壤理化性质、叶片氮含量的相关性

图 4 相关性分析显示,绿肥全氮与土壤全氮、有机质含量呈显著正相关。绿肥 $\delta^{15}\text{N}$ 值与土壤碱解氮含量呈极显著正相关。橡胶叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值与土壤全氮含量呈显著正相关。在土壤理化性质方面,

有机质与碱解氮、土壤全氮分别呈显著正相关和极显著正相关 ($P<0.001$); 土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与碱解氮、有效磷含量均呈显著正相关。

2.6 绿肥对胶园土壤和叶片氮含量的作用路径

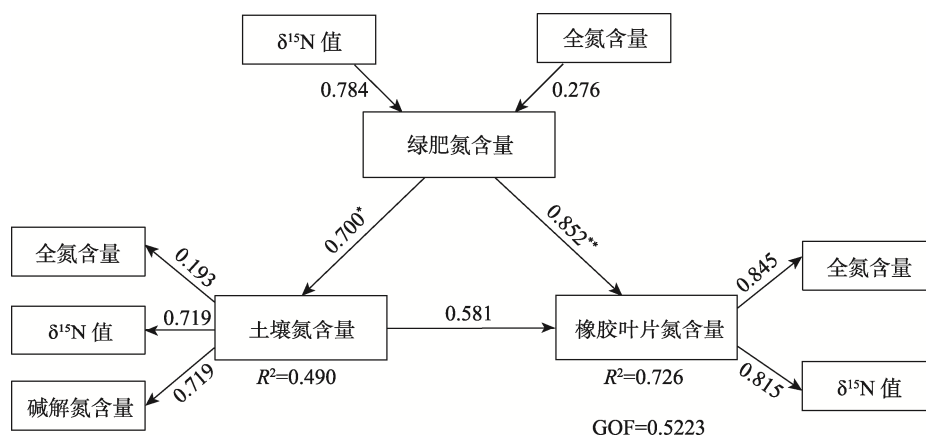
偏最小二乘路径模型分析结果显示 (图 5), 绿肥氮含量对土壤氮含量的直接影响路径系数为



* indicates significant correlation ($P<0.05$), *** indicates extremely significant correlation ($P<0.001$).

图 4 绿肥种植区绿肥和橡胶叶片氮含量与土壤理化性质的 Mantel 分析

Fig. 4 Mantel analysis of nitrogen content in green manure and rubber tree leaves with soil physicochemical properties in different green manure cultivation areas



*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$); 路径箭头上标注为标准化路径系数和显著性水平,

R^2 表示模型解释的因变量方差比例; 潜变量旁指标为对应的观测变量。

* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$); The path arrows are labeled with standardized path coefficients and significance levels. R^2 represents the variance in the dependent variables explained by the model, while the indicators next to the latent variables represent the observed variables.

图 5 绿肥种植区绿肥、橡胶叶片与土壤氮含量的偏最小二乘路径分析

Fig. 5 Partial least squares path analysis of nitrogen content in green manure, rubber tree leaves, and soil in green manure cultivation areas

0.700, 而通过影响土壤碱解氮含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的间接影响路径系数均为 0.719。此外, 绿肥氮含量对橡胶叶片氮含量具有极显著正效应, 直接和间接影响的路径系数分别为 0.8727 和 0.0209。

3 讨论

3.1 绿肥对幼龄胶园土壤养分影响及作用路径

种植豆科绿肥是农业生态系统中改善土壤质量和提升养分有效性的重要措施^[15-16]。本研究结果表明, 与自然生草对照处理相比, 豆科绿肥处理使土壤全氮含量增加 2.61%~13.91%, 柱花草和葛藤处理显著提高土壤碱解氮含量, 分别增加 30.54% 和 31.25%。这一结果与朱亚琼等^[8]的田间试验研究一致, 表明豆科绿肥在促进土壤氮积累方面的积极作用。豆科植物通过与根瘤菌形成共生固氮体系, 将大气中的氮气转化为植物可利用的氮素形态, 这一过程不仅直接增加了土壤氮库, 还通过加速矿质养分的释放来增强土壤的供氮能力^[7, 16]。不同豆科植物在固氮能力上存在种间差异, 这可能与根瘤菌的宿主特异性、固氮酶活性及环境适应性等因素有关^[17-19]。其中, 葛藤作为多年生藤本植物, 其快速生长特性和广泛的覆盖面积, 能够为土壤提供大量有机残体和氮源^[16-17, 20]。这种持续的有机质输入促进了固氮微生物群落的繁殖, 还加速了氮素的矿化过程^[21]。

偏最小二乘路径模型结果显示, 绿肥通过影响土壤氮含量调控土壤氮库。这与王桂花等^[17]研究结果相互印证, 他们发现橡胶园间作葛藤可显著提高 0~20 cm 土层全氮含量, 并促进氮素在植物-土壤系统中的循环。豆科植物的生物固氮作用使植物呈现较低的 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[22]。而微生物在有机质分解过程中优先利用 ^{14}N , 导致残留物中 ^{15}N 富集^[23]。这解释了本研究中豆科绿肥 $\delta^{15}\text{N}$ 值的动态变化特征。豆科植物的生物固氮作用为土壤-植物系统提供了氮源, 而橡胶树的氮素吸收则驱动了土壤氮库的周转。这种相互作用不仅影响了系统的氮素平衡, 也通过同位素分馏效应改变了土壤-植物系统中不同氮库 $\delta^{15}\text{N}$ 值的分布特征^[24-27]。

此外, 豆科绿肥处理使土壤速效钾含量降低 6.87%~8.40%, 这可能是因为豆科绿肥在快速生长期对钾素的需求量较大, 导致土壤中速效钾的消耗^[21], 在实际应用豆科绿肥时应注重钾素的平衡管理。在土壤有机质和磷素方面, 豆科绿肥

表现出积极的改良效果。葛藤处理使土壤有机质和有效磷含量分别增加 12.60% 和 30.94%, 这与吴志祥等^[28]在幼龄胶园的研究结果一致。豆科绿肥的根系分泌物和残体分解为土壤微生物提供丰富的碳源, 促进微生物群落的生长和代谢活动^[28-29]。同时, 微生物的分解作用进一步释放土壤中的矿质养分, 形成良性的养分循环^[30-31]。这种正向反馈机制不仅提高土壤肥力水平, 还增强土壤生态系统的稳定性和可持续性。

3.2 绿肥对幼龄橡胶树叶片氮含量影响及作用路径

海南橡胶树多分布于高温多雨的热带气候区, 强烈的矿物风化和有机质分解作用导致土壤氮素含量普遍偏低^[32-33]。绿肥处理对橡胶叶片氮素含量产生了积极影响。与对照处理相比, 不同绿肥处理均提高了橡胶树叶片全氮含量, 其中柱花草处理的效果最为突出, 增幅达 25.86%。王桂花等^[17]研究结果也发现, 橡胶-柱花草间作系统中橡胶树的植株氮含量显著高于单一种植橡胶树处理。这表明柱花草不仅能够通过生物固氮作用增加土壤氮库, 还能有效促进橡胶树对氮素的吸收和利用。这与绿肥处理对土壤氮含量的增加趋势相同, 豆科绿肥可能是通过生物固氮作用, 提高土壤中可供植物吸收的氮素含量, 促进橡胶树叶片氮素含量的增加^[16, 34-35]。偏最小二乘路径模型结果进一步揭示了豆科绿肥影响橡胶树叶片氮素含量的作用路径, 绿肥通过直接增加土壤中的有效氮含量, 进而影响橡胶树的氮素营养。然而, 尽管绿肥显著提高了土壤全氮含量, 其对橡胶叶片氮素含量的提升幅度相对有限。这种差异可能与橡胶树作为多年生乔木的特性有关: 其养分吸收和分配过程容易受到物候期、气候条件以及树龄等因素的影响^[2-3, 35]。在后期的试验中, 还需通过采集全年样品进行测定与评估, 并在较长时间尺度上进行试验, 收集分析数据, 以更准确地分析绿肥对橡胶树叶片氮素含量的效应。

4 结论

3 种豆科绿肥均能够提高土壤氮素含量并促进橡胶树叶片氮素吸收, 但效果存在显著种间差异。柱花草在促进橡胶树氮素吸收和提升土壤氮素含量方面表现最为突出。葛藤则在改善土壤碱解氮、有机质和有效磷含量方面效果显著, 而山

毛豆对氮素的提升效果相对有限。合理选择或混种豆科绿肥, 有助于构建高效的胶园养分循环体系, 推动橡胶产业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 高静, 程汉. 橡胶树改变世界的 150 年[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1744-1751.
GAO J, CHENG H. The rubber tree that changed the world in 150 years[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2024, 54(10): 1744-1751. (in Chinese)
- [2] 吴敏, 何鹏, 韦家少. 海南岛胶园土壤肥力的综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2009(2): 1-5.
WU M, HE P, WEI J S. Integrated evaluation of soil fertility for rubber plantation in Hainan province[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2009(2): 1-5. (in Chinese)
- [3] CHEN C F, LIU W J, WU J N, JIANG X J, ZHU X A. Can intercropping with the cash crop help improve the soil physico-chemical properties of rubber plantations?[J]. *Geoderma*, 2019, 335: 149-160.
- [4] 赵春梅, 王文斌, 茶正早. 我国天然橡胶林养分管理研究现状[J]. 热带农业科学, 2021, 41(2): 10-17.
ZHAO C M, WANG W B, CHA Z Z. Nutrient management for rubber plantation in China[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(2): 10-17. (in Chinese)
- [5] JU X T, XING G X, CHEN X P, ZHANG F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] 刘颖, 张佳蕾, 李新国, 张正, 万书波. 豆科作物氮素高效利用机制研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 476-482.
LIU Y, ZHANG J L, LI X G, ZHANG Z, WAN S B. Research progress on nitrogen efficient utilization mechanism of leguminous crops[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(3): 476-482. (in Chinese)
- [7] 周雨佳. 豆科绿肥接种根瘤菌在与茶树间作、草莓轮作中对作物生长及田间减肥减药效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
ZHOU Y J. Effects of Leguminosae green manure inoculated with rhizobia on crop growth and chemical fertilizer and pesticides reduction in tea tree intercropping and strawberry rotation system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [8] 朱亚琼, 简大为, 郑伟, 王朴, 黎松松, 郝帅, 娜尔克孜, 刘岳含, 艾丽菲热. 不同种植模式下豆科绿肥对土壤改良效果的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 889-900.
- [9] LIU R, ZHOU G P, CHANG D N, GAO S J, HAN M, ZHANG J D, SUN X F, CAO W D. Transfer characteristics of nitrogen fixed by leguminous green manure crops when intercropped with maize in northwestern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(4): 1177-1187.
- [10] DOVRAT G, BAKHSHIAN H, MASCI T, SHEFFER E. The nitrogen economic spectrum of legume stoichiometry and fixation strategy[J]. *New Phytologist*, 2020, 227(2): 365-375.
- [11] SIERRA J, NYGREN P. Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1893-1903.
- [12] 蒋菊生, 谢贵水, 林位夫, 王岳坤, 蔡明道, 陈俊明. 胶园间种柱花草的生态适宜性及间作效益评价[J]. 热带作物学报, 1999, 20(1): 3-5.
JIANG J S, XIE G S, LIN W F, WANG Y K, CAI M D, CHEN J M. Ecological suitability and benefit evaluation of *Stylosanthes guianensis* intercropped under rubber plantations[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 1999, 20(1): 3-5. (in Chinese)
- [13] 贺军军, 姚艳丽, 张华林, 戴小红, 罗萍. 胶园覆盖对土壤肥力及橡胶树根系活力的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1444-1450.
HE J J, YAO Y L, ZHANG H L, DAI X H, LUO P. Effect of *stylosanthes* mulching on soil fertility and root activity of rubber plantation[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(7): 1444-1450. (in Chinese)
- [14] 吴志祥, 谢贵水, 杨川, 陈帮乾, 陈俊明, 赖华英. 幼龄胶园间种对土壤微生物作用的影响[J]. 南方农业学报, 2012, 43(9): 1325-1329.
WU Z X, XIE G S, YANG C, CHEN B Q, CHEN J M, LAI H Y. Effects of interplanting on soil microbial action in young rubber plantations[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(9): 1325-1329. (in Chinese)
- [15] OHWAKI Y, SUGAHARA K. Active extrusion of protons and exudation of carboxylic acids in response to iron deficiency by roots of chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. *Plant and Soil*, 1997, 189: 49-55.
- [16] CLERMONT-DAUPHIN C, SUVANNANG N, PONGWICHIAN P, CHEYLAN V, HAMMECKER C, HARMAND J M. Dinitrogen fixation by the legume cover crop *Pueraria phaseoloides* and transfer of fixed N to *Hevea brasiliensis*:

- impact on tree growth and vulnerability to drought[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 217: 79-88.
- [17] 王桂花, 吴敏, 王大鹏, 林清火, 詹杉, 林琛茗, 张先, 陈传洋, 周永计. 减量施氮对橡胶树: 葛藤间作模式结瘤固氮及氮素吸收利用的影响[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(9): 2701-2710.
- WANG G H, WU M, WANG D P, LIN Q H, ZHAN S, LIN C M, ZHANG X, CHEN C Y, ZHOU Y J. Effects of reduced nitrogen application on the nodulation, nitrogen fixation, absorption and utilization in rubber tree-kudzu intercropping[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(9): 2701-2710. (in Chinese)
- [18] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 赵娜, 王峥, 鱼昌为, 曹群虎, 曹卫东, 高亚军. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2272-2281.
- ZHANG D B, YAO P W, LI J, ZHAO N, WANG Z, YU C W, CAO Q H, CAO W D, GAO Y J. Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dry land conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2272-2281. (in Chinese)
- [19] 王桂花, 吴敏, 王大鹏, 韦家少, 吴炳孙, 吴文冠, 陈志坚, 董荣书. 橡胶-豆科间作对植株生长和氮吸收的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(6): 16-22.
- WANG G H, WU M, WANG D P, WEI J S, WU B S, WU W G, CHEN Z J, DONG R S. Effects of plant growth and nitrogen absorption in the rubber-legume crops intercropping system[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(6): 16-22. (in Chinese)
- [20] 李欣欣, 杨永庆, 钟永嘉, 廖红. 豆科作物适应酸性土壤的养分高效根系遗传改良[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 186-194.
- LI X X, YANG Y Q, ZHONG Y J, LIAO H. Genetic improvement for nutrient efficient roots of leguminous crops adapted to acidic soils[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 186-194. (in Chinese)
- [21] 贺军军, 姚艳丽, 程儒雄, 黄海杰, 华元刚, 罗萍. 幼龄橡胶树行间覆盖绿肥效益分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 155-162.
- HE J J, YAO Y L, CHENG R X, HUANG H J, HUA Y G, LUO P. The benefit analysis of young rubber trees inter-row green manure coverage[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6): 155-162. (in Chinese)
- [22] 周玉杰, 李建华, 张广宇, 王宁, 谭文丽, 王永鹏, 王春燕, 曹启民. 橡胶林土壤微生物碳代谢功能多样性及其变化[J]. *广东农业科学*, 2017, 44(11): 68-74.
- ZHOU Y J, LI J H, ZHANG G Y, WANG N, TAN W L, WANG Y P, WANG C Y, CAO Q M. Functional diversity of soil microbial carbon metabolism of rubber tree plantations and its changes[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(11): 68-74. (in Chinese)
- [23] UNKOVICH M, HERRIDGE D, PEOPLES M, CADISCH G, BODDEY B, GILLER K, CHALK P. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems (ACIAR monograph No. 136)[M]. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research, 2008.
- [24] HÖGBERG P. Tansley review No. 95 ^{15}N natural abundance in soil-plant systems[J]. *New Phytologist*, 1997, 137(2): 179-203.
- [25] HOULTON B Z, SIGMAN D M, SCHUUR E A G, HEDIN L O. A climate-driven switch in plant nitrogen acquisition within tropical forest communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(21): 8902-8906.
- [26] CRAINE J M, BROOKSHIRE E N J, CRAMER M D, HASSELQUIST N J, KOBAYASHI K, MARIN-SPIOTTA E, WANG L. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils[J]. *Plant and Soil*, 2015, 396: 1-26.
- [27] 田峪萍, 双睿辰, 刘原庆, 王立刚, 孟凡乔. 应用 ^{15}N 自然丰度值揭示不同氮源对设施土壤氮挥发的贡献[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(2): 242-251.
- TIAN Y P, SHUANG R C, LIU Y Q, WANG L G, MENG F Q. Contribution of nitrogen sources to NH_3 volatilization in plastic-shed soil revealed by ^{15}N natural abundance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(2): 242-251. (in Chinese)
- [28] 吴志祥, 谢贵水, 杨川, 周兆德, 陈俊明, 赖华英. 幼龄胶园间种土壤肥力及土壤酶活性特征研究[J]. *南方农业学报*, 2011, 42(1): 58-64.
- WU Z X, XIE G S, YANG C, ZHOU Z D, CHEN J M, LAI H Y. Soil fertility characteristics and activity of some soil enzymes in young rubber plantations soils inter-planted with banana and Pueraria[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, 42(1): 58-64. (in Chinese)
- [29] 赵春梅, 王文斌, 薛欣欣, 张永发, 任常琦, 罗雪华, 吴晓霜. 不同间作模式对胶园土壤微生物功能多样性的影响[J]. *西南农业学报*, 2024, 37(2): 286-293.
- ZHAO C M, WANG W B, XUE X X, ZHANG Y F, REN C Q, LUO X H, WU X S. Effects of different intercropping patterns on soil microbial functional diversity in rubber plantations[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(2): 286-293. (in Chinese)
- [30] 贺军军, 张华林, 罗微, 张培松, 李文秀, 罗萍. 幼林胶园覆盖葛藤改善土壤细菌群落结构[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 69-76.
- HE J J, ZHANG H L, LUO W, ZHANG P S, LI W X, LUO P. Soil bacterial community structure improved in young

- rubber plantation covered with kudzu vines[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(4): 69-76. (in Chinese)
- [31] KHLIFA R, PAQUETTE A, MESSIER C, REICH P B, MUNSON A D. Do temperate tree species diversity and identity influence soil microbial community function and composition?[J]. Ecology and evolution, 2017, 7(19): 7965-7974.
- [32] 何向东, 吴小平. 海南垦区胶园肥力演变探研[J]. 热带农业科学, 2002, 22(1): 16-22.
- HE X D, WU X P. Evolution of rubber plantation soil fertility in Hainan island[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2002, 22(1): 16-22. (in Chinese)
- [33] 张墨谦, 周可新, 薛达元. 种植橡胶人工林对西双版纳热带雨林的影响及影响的消除[J]. 生态经济(学术版), 2007(10): 377-378.
- ZHANG M Q, ZHOU K X, XUE D Y. Rubber's influence on tropical rainforest in Xishuangbanna and how to reduce the impact[J]. Ecological Economy, 2007(10): 377-378. (in Chinese)
- [34] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 曹群虎, 李敏, 曹卫东, 高亚军. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1179-1187.
- ZHAO N, ZHAO H B, YU C W, CAO Q H, LI M, CAO W D, GAO Y J. Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(5): 1179-1187. (in Chinese)
- [35] 徐文娟, 李金秋, 孟磊, 薛欣欣, 王晶晶, 刘文杰, 汤水荣. 葛藤覆盖对幼龄橡胶园表层土壤理化性状和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1740-1748.
- XU W X, LI J Q, MENG L, XUE X X, WANG J J, LIU W J, TANG S R. Effects of kudzu mulching on physical and chemical properties and enzyme activities of surface soil in young rubber plantation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1740-1748. (in Chinese)