

不同土地利用方式对热带土壤团聚体稳定性的影响

周佳^{1,3}, 黄艳艳^{2,3}, 杨红竹^{2,3}, 李建宏^{2,3}, 刘海林^{2,3}, 张婧旻^{2,3}, 颜安^{1*}, 林清火^{2,3*}

1. 新疆农业大学资源与环境学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 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: 本研究旨在探索长期不同土地利用方式对热带土壤理化性质及团聚体稳定性的影响机制, 从而为热带地区土壤培肥与结构改良提供科学依据。本研究选取近 30 年来的 3 种土地利用模式作为研究对象, 分别为人工管理橡胶林 (MR)、自然管理橡胶林 (NR) 及低人为扰动龙眼果园 (NL), 并具体分析 0~20、20~40、40~60 cm 这 3 个土层的土壤基本理化性质、水稳性团聚体分布及团聚体稳定性特征。研究表明: 随着土层深度的增加, MR 与 NL 模式下的土壤 pH 均呈递减趋势; 在不同土壤层次上, MR 模式的土壤 pH 均低于 NL 与 NR 模式。在各土层中, NR 模式下的土壤大团聚体 (>2 mm、1~2 mm) 含量显著高于 MR 和 NL 模式, 而土壤微小团聚体 (<0.25 mm、0.25~0.5 mm) 含量则显著低于 MR 和 NL 模式; NR 模式下的土壤水稳性团聚体平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 和平均几何直径 (geometric mean diameter, GMD) 均显著高于 MR 和 NL 模式, 分形维数 (fractal dimension, D) 值显著低于 MR 和 NL 模式, 说明在自然管理模式, 土壤团聚体更加稳定。方差分析结果表明, 土地利用方式对土壤粒径分布及团聚体稳定性具有极显著影响, 土层深度显著影响 <0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm 粒级团聚体的分布, 且粒级越小, 受土层深度影响的程度越大, 土地利用方式和土层深度的交互作用仅显著影响土壤大团聚体 (>2 mm、1~2 mm) 及 D 值。相关分析结果表明: 土壤团聚体稳定性指标 (>2 mm 团聚体含量、MWD、GMD) 与土壤速效磷 (available potassium, AP) 含量呈负相关, 与土壤有机质 (soil organic matter, SOM) 含量呈正相关; D 值与土壤大团聚体 (>2 mm) 含量呈负相关, 而与土壤微小团聚体 (<0.25 mm) 含量呈显著正相关。综上所述, 土地利用方式是影响土壤团聚体稳定性的最关键因素, 自然管理橡胶林模式可显著提升土壤大团聚体含量, 提高土壤团聚体稳定性, 进而改善土壤结构。

关键词: 热带地区; 长期定位试验; 土地利用方式; 不同土层; 团聚体稳定性

中图分类号: S152 文献标志码: A

Impact of Different Land Use Patterns on the Stability of Tropical Soil Aggregates

ZHOU Jia^{1,3}, HUANG Yanyan^{2,3}, YANG Hongzhu^{2,3}, LI Jianhong^{2,3}, LIU Hailin^{2,3}, ZHANG Jingmin^{2,3}, YAN An^{1*}, LIN Qinghuo^{2,3*}

1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, 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: This study was aimed to explore the impact mechanism of long-term different land use patterns on the physical and chemical properties and aggregate stability of tropical soils, thereby providing a scientific foundation for enhancing soil fertility and improving soil structure in tropical regions. For this purpose, three land use types with a his-

收稿日期 2025-08-04; 接受日期 2025-09-25

基金项目 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. 1630022024001, No. 1630022025002)。

作者简介 周佳 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 土壤养分资源管理。*通信作者 (Corresponding author): 颜安 (YAN An), E-mail: yanan@xjau.edu.cn; 林清火 (LIN Qinghuo), E-mail: qinghuo@catas.cn。

tory of nearly 30 years were selected as the research objects, namely artificially managed rubber plantation (MR), naturally managed rubber plantations (NR), and low human-disturbed longan orchards (NL). The basic physical and chemical properties of soil, the distribution of water-stable aggregates, and the characteristics of aggregate stability in the 0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm soil layers were specifically analyzed. With the increase of soil depth, the soil pH in both MR and NL patterns showed a decreasing trend. In different profile layers, the pH of MR was lower than that of NL and NR. Under each soil layer, the contents of large soil aggregates (>2 mm, 1–2 mm) in the NR pattern were significantly higher than those in MR and NL. Conversely, the contents of small soil aggregates (<0.25 mm, 0.25–0.5 mm) were significantly lower than those in MR and NL patterns. Both the Mean Weight Diameter (MWD) and Geometric Mean Diameter (GMD) of soil water-stable aggregates in the NR pattern were significantly higher than those in MR and NL, and the fractal dimension (D) value was significantly lower than that in MR and NL. This indicates that the soil aggregates under the natural management pattern are more stable. Analysis of variance showed that land use patterns had an extremely significant impact on soil particle size distribution and aggregate stability. Soil depth significantly influenced the distribution of aggregates in the <0.25 mm, 0.25–0.5 mm, 0.5–1 mm, and 1–2 mm particle size fractions, with the intensity of the impact increasing as aggregate size decreased. The interaction effect between land use pattern and soil depth significantly affected soil aggregates (>2 mm, 1–2 mm) and the fractal dimension (D) value. Correlation analysis revealed that the soil aggregate stability indices (content of aggregates >2 mm, MWD, GMD) were negatively correlated with soil available phosphorus and positively correlated with soil organic matter (SOM); the fractal dimension (D) was negatively correlated with the content of soil aggregates (>2 mm) and significantly positively correlated with the content of soil aggregates (<0.25 mm). In conclusion, land use pattern is the most critical factor affecting soil aggregate stability. The naturally managed rubber plantation pattern can significantly increase the content of soil aggregates, enhance soil aggregate stability, and thereby improve soil structure.

Keywords: tropical region; long-term field experiment; land-use type; different soil layers; aggregate stability

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.024

土壤作为生态系统的重要组成部分,是农业生产和粮食安全的基础资源。随着社会经济的快速发展,人类对自然资源的过度开发导致土壤质量下降、结构退化等问题日益凸显^[1]。土地利用方式是改变土壤结构及团聚体稳定性的核心驱动因素,例如,林地向农田的转化往往伴随着频繁的耕作活动,这些耕作会扰动土壤,破坏原有的团聚体结构;而免耕或长期处于自然植被覆盖下的土壤,则可通过凋落物的输入及植被根系的作用,促进团聚体的重构与稳定。这些变化会进一步影响土壤养分循环和土壤结构稳定性等关键过程,最终共同决定土壤的肥力水平与生态服务功能^[2]。赵珊珊等^[3]在研究不同施肥措施对土壤团聚体稳定性的影响时发现,氮磷钾处理下,土壤结构稳定性最佳。其机制在于均衡的养分供应能够促进作物根系生长,增加根系分泌物等胶结物质,进而增强团聚体的胶结和稳定性。刘福君等^[4]在五龙池小流域的研究表明,灌木林、坡耕地和梯田 3 种不同的土地利用方式下,土壤有机质 (soil organic matter, SOM) 含量、全氮 (total nitrogen, TN) 含量、颗粒组成和毛管孔隙度 (capillary porosity, Cp) 存在显著差异。其中,林地具有较高的有机质含量,且植被根系更加发达。植物根

系通过缠绕和联结土壤颗粒,并释放分泌物,促进土壤大团聚体的形成,从而提高团聚体稳定性和土壤结构稳定性。

橡胶林作为热带地区典型人工生态系统,其土地利用方式对土壤性质及结构稳定性的影响具有独特性。人工管理橡胶林由于化肥的施用及作物种植的单一性,常常导致土壤酸化加速、微团聚体占比异常等问题。这种管理方式虽能够在短期内提升表层养分含量,但会破坏土壤孔隙结构的连续性,加剧养分垂直迁移的阻力^[5]。土地利用变化,尤其是自然林向经济林的转化,土壤质量产生深远影响。邹鑫等^[6]的研究表明,西双版纳地区热带雨林开垦为橡胶林后 (约 26 a),土壤理化性质变差、团聚体稳定性降低,碳、氮积累量减少,单层橡胶林物种单一,且植物地下根系不发达,不利于形成稳定的团粒结构,从而导致土壤质量退化。相比之下,复合系统显示出一定的改善效果。陈春峰等^[7]在西双版纳地区的研究表明,相较于单层橡胶林,胶林复合系统显著提高了团聚体的平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 和平均几何直径 (geometric mean diameter, GMD),并降低了分形维数 (fractal dimension, D) 值。在橡胶林复合系统中,土壤

有机质来源于橡胶落叶、腐根及人工施肥。胶林复合系统增加地表凋落物,使土壤有机碳输入增加,从而显著提升了有机碳含量。新输入的有机碳作为土壤团聚体的粘结物质,优先促进大团聚体的形成,而团聚体碳的富集又加速了大团聚体的形成,进而提高了团聚体的稳定性。热带地区自然林向橡胶林等人工经济林快速转变,将改变地表覆盖、微气候环境及人为干预强度,对土壤理化性质及团聚体稳定性产生级联效应^[8]。

目前,前人的研究多聚焦于橡胶林等热带经济作物耕作区表层土壤性质的差异,缺乏对热带经济作物耕作区深层土壤理化性质与土壤结构稳定性的系统分析。基于此,本研究在儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测研究站内,选取具有近 30 年定位试验的人工管理橡胶林、自然管理橡胶林及低人为扰动龙眼果园 3 种典型土地利用方式样地,采集 0~20、20~40、40~60 cm 土层的土壤样品,通过分析土壤理化性质、水稳性团聚体分布及团聚体稳定性特征,旨在揭示:(1)不同土地利用方式下土壤理化性质及土壤团聚体分布与稳定性的垂直演变规律;(2)影响土壤团聚体结构稳定性的关键因子。研究结果将为热带地区土壤培肥与土体结构改良提供科学依据,对热带地区土地的可持续利用与生态保护具有重要的实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 样地概况

样地位于儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测研究站内(19°32'N, 109°14'E, 图 1),属于热带海洋性季风气候区,年平均降雨量约为 1600 mm,年平均气温为 20.8~26.0 °C。3 种不同土地利用方式样地间隔约 200 m:人工管理橡胶林(简称 MR, 标记①),1994 年定植后按照常规生产管理^[9];自然管理橡胶林(简称 NR, 标记②),2000 年定植后自然生长(未开割,无人扰动);低人为扰动龙眼果园(简称 NL, 标记③),1994 年定植后按照常规生产管理,2000 年后实施自然管理。

1.2 方法

1.2.1 取样方法 土壤样品于 2024 年 10 月采集,方法如下:(1)原状及环刀土样采集。在每种土地利用方式的样地中央分别开挖长×宽×深为 50 cm×50 cm×60 cm 的土壤剖面,利用环刀在东、

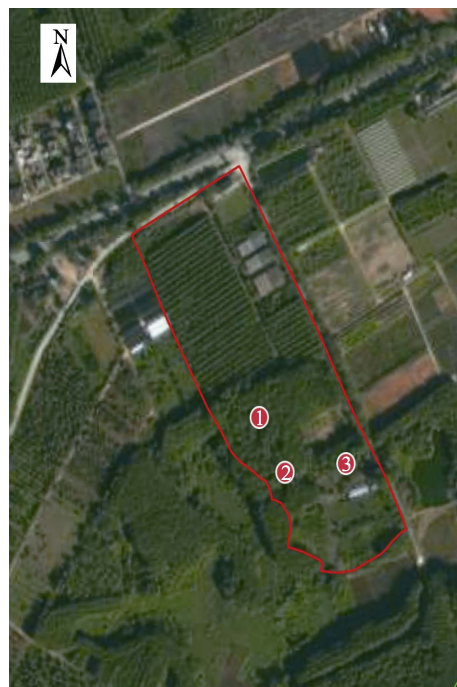


图 1 试验区地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental area's geographic location

南、西、北 4 个方向的剖面左侧位置,分别采集 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层环刀样品,用于土壤容重(bulk density, BD)、毛管孔隙度等物理性质分析;在 4 个方向的剖面右侧位置,用不锈钢铲分别采集 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层原状土块(长×宽×深为 20 cm×20 cm×10 cm),通过物理破碎处理将土壤样品分解为 1~2 cm 粒径的碎块后,采用人工筛选法去除其中混杂的植物残骸、小型石块以及蚯蚓等生物体,在(25±2)°C 室温下风干后用于土壤团聚体粒径分布及稳定性测定。

(2)混合土样采集。按照“S”型在不同利用方式的样地布设 4 个采样位置,采用间隔 60 cm 的正三角形布点法进行土壤采样,并使用内径为 8 cm 的土钻按照 0~20 cm、20~40 cm 以及 40~60 cm 三个土层深度采集,随后将同一采样点 4 个相同土层的所有样品充分混匀后制备成混合土样。将土壤样品经自然风干后过 2 mm 孔筛,用于土壤 pH、氮、磷和钾含量测定;另取适量已过 2 mm 筛的土样继续研磨过 0.25 mm 筛,用于土壤有机质含量测定。

1.2.2 指标测定 (1)土壤基本理化指标测定。参照《土壤农业化学分析方法》^[10],土壤全氮、速效磷(available potassium, AP)含量采用连续

流动分析法测定;土壤速效钾(available potassium, AK)含量采用乙酸铵浸提-原子吸收火焰光度法测定;土壤 pH 采用 1:2.5 土水比进行混合浸提,采用电极法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤容重及毛管孔隙度采用环刀法(100 cm³)测定。

(2) 湿筛法测定土壤团聚体。称取 50 g 土壤样品置于由 2、1、0.5、0.25、0.053 mm 孔径筛网自上而下叠加组成的套筛最上层,随后将整套筛具浸入盛装有去离子水的水桶中进行 10 min 预湿润处理,期间保持水位与顶层筛网上缘齐平,最后将湿润后的套筛固定于团粒分析仪震荡装置上,设置震荡频率为 30 次/min,持续震荡处理 5 min。震荡结束后,依次将各层级筛网上截留的土壤团聚体冲洗到铝盒中,在 65 ℃烘箱中烘干至恒重,并精确称量。根据各粒径团聚体干质量计算其质量分数,以此表征土壤水稳性团聚体组成^[11]。

土壤团聚体稳定性的评估通常采用 MWD、GMD、 D 值 3 个关键指标^[12]。当 MWD 和 GMD 数值增大而 D 值减小时,意味着土壤团聚体平均粒径更大、团聚程度更高、抗侵蚀能力更强及结构稳定性^[13]更优。MWD、GMD 及 D 值计算公式如下^[14]:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

式中, $\bar{R}_i$ 为某粒级团聚体的平均直径(mm), W_i 为某粒级团聚体组分的干质量(g)。

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_t} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right) \quad (3)$$

式中, $M(r < \bar{R}_i)$ 为粒径小于 $\bar{R}_i$ 的团聚体质量(g), M_t 为测定团聚体总质量(g), $R_{\max}$ 为团聚体的最大粒径(mm),通过数据拟合,求得 D 值。

1.3 数据处理

采用 Excel 2021 软件对数据进行整理和统计分析,运用 SPSS 27.0 软件对相同土层不同土地利用方式和相同土地利用方式不同土层下的土壤

理化性质及土壤团聚体稳定性指标进行差异显著性分析(Duncan 法),利用 Origin 2021 软件作图。有机质和氮、磷、钾等养分指标分组范围参照全国第三次土壤普查的养分分级标准^[15],土壤物理指标参照《土壤质量指标与评价》^[16]和《土壤农化分析》^[17]结合实际进行设置。

2 结果与分析

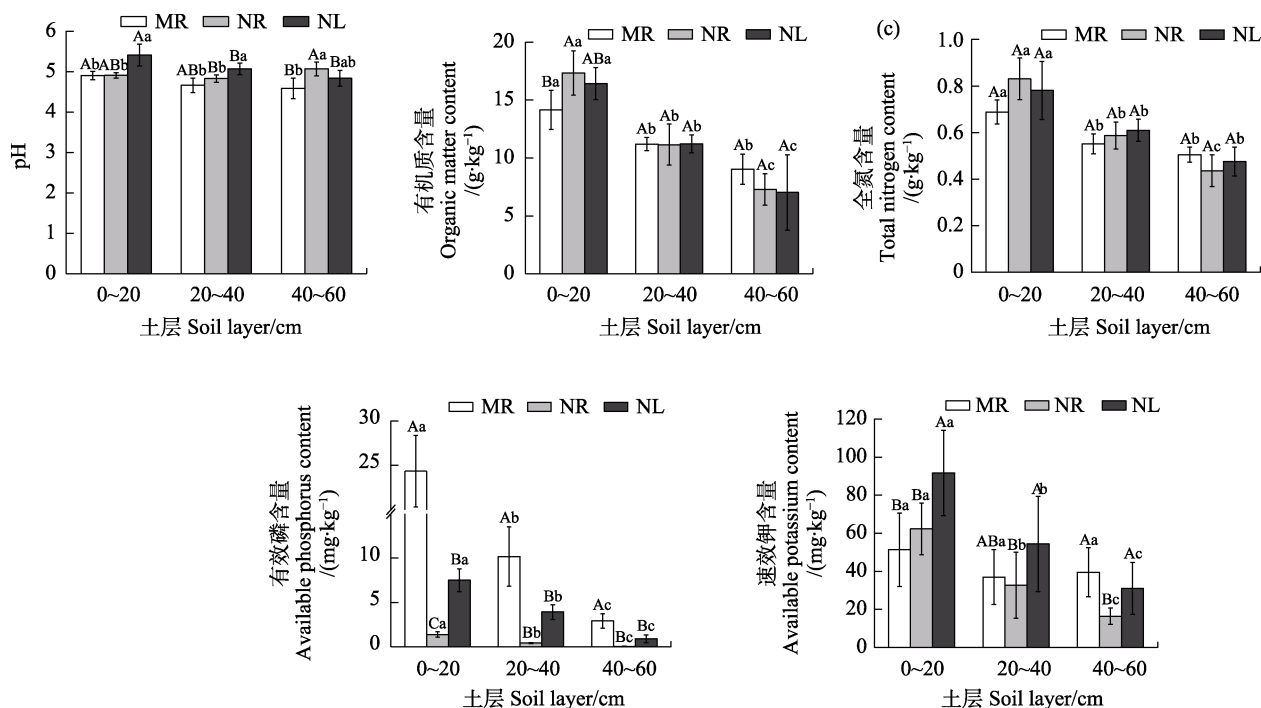
2.1 3 种土地利用方式下的土壤基本化学性质差异

如图 2 所示,低人为扰动龙眼果园(NL)的 pH 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层显著高于人工管理橡胶林(MR)和自然管理橡胶林(NR)。而在 40~60 cm 土层中, NR 模式下土壤 pH(5.07)显著高于 MR 模式(4.59),且 NR 模式下 40~60 cm 土层的 pH 较 20~40 cm 土层显著升高 0.24 个单位。3 种土地利用方式下不同土层土壤均处于强酸性等级(4.5~5.5),其中 MR 模式下土壤酸度最强。

在 0~20 cm 表层土壤中,3 种土地利用方式有机质含量为: NR(17.34 g/kg) > NL(16.42 g/kg) > MR(14.15 g/kg);与 0~20 cm 土层相比,在 20~40 cm 土层中土壤有机质含量均显著下降,其中, NR 模式降幅最大,较 0~20 cm 土层下降了 35.7%;随土层深度增加至 40~60 cm,土壤有机质含量进一步降低, MR、NR 及 NL 模式下有机质含量分别降为 9.52、7.71、6.65 g/kg,其中 NL 模式降幅最大,较 0~20 cm 土层下降了 59.52%。此外,不同土地利用方式下的土壤全氮含量均随土层深度增加呈逐渐降低趋势,且各模式间差异不显著;与 0~20 cm 土层相比,20~40 cm 土层土壤全氮含量均显著降低,其中 NR 模式较 0~20 cm 土层显著下降了 28.9%。

不同土地利用方式下,土壤有效磷含量均随土层深度的增加呈显著降低。不同土层下, MR 模式有效磷含量均显著高于 NL 和 NR 模式。在 0~20 cm 土层中, MR、NL、NR 模式土壤有效磷含量分别为 24.34、7.51、1.39 mg/kg,在 40~60 cm 土层中,其有效磷含量分别急剧下降为 2.92、0.92、0.05 mg/kg,降幅分别为 88.0%、87.7%和 96.4%。

除 MR 模式外, NR 和 NL 模式下,土壤速效钾含量均随土层深度的增加而递减。0~20 cm 表层土壤中, NL 模式的速效钾含量(91.66 mg/kg)



不同大写字母表示相同土层下不同土地利用方式之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同土地利用方式下不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant difference among different land use types within the same soil layer ($P < 0.05$); while different lowercase letters represent significant difference among different soil layers within the same land use type ($P < 0.05$). The same notation applies below.

图 2 不同土地利用方式下土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾含量

Fig. 2 Content of soil pH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium under different land use patterns

显著高于 MR (51.36 mg/kg) 和 NR (62.3 mg/kg) 模式。20~40 cm 土层中, NL 模式的速效钾含量 (54.37 mg/kg) 仍显著高于 NR (32.73 mg/kg) 模式。而在 40~60 cm 深层土壤中, MR 和 NL 模式下速效钾含量显著高于 NR 模式。

2.2 3 种土地利用方式下土壤容重和毛管孔隙度特征

MR 模式下, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层的土壤容重分别为 1.46、1.47、1.41 g/cm³, 均显著低于 NR 模式 (表 1)。NL 模式下各土层的土壤容重分别为 1.59、1.51、1.40 g/cm³, 即随土层深度的增加呈下降趋势。

MR 和 NR 模式下, 0~20 cm 土层的土壤总孔隙度 (total porosity, T_p) 分别为 37.17% 和 37.64%, 毛管孔隙度分别为 35.96% 和 36.59%, 均显著高于 NL 模式 (33.29% 和 32.17%)。20~40 cm 土层 NR 模式的土壤非毛管孔隙度显著高于 MR 模式; 而 40~60 cm 土层 NR 模式的非毛管孔隙度显著高于 NL 模式。

MR 模式在 0~20 cm、20~40 cm 土层表现出

“低容重-高孔隙”的特征。NR 模式在 20~40 cm、40~60 cm 土层具有明显的非毛管孔隙优势。NL 模式的孔隙结构随土层深度的增加明显改善, 其在 40~60 cm 土层的总孔隙度较 0~20 cm 土层提升 22.1%, 呈现出“深层高孔隙度”特征。

对不同土地利用方式和土层深度理化性质的方差分析表明 (表 2), 土地利用方式对土壤 pH、有效磷、速效钾含量以及容重具有极显著影响, 对土壤非毛管孔隙度具有显著影响。土层深度对土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾含量及土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度具有极显著影响, 对非毛管孔隙度具有显著影响。另外, 二者交互作用除了对土壤有机质具有显著影响外, 对土壤 pH、有效磷、速效钾含量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均具有极显著影响。

2.3 3 种土地利用方式下的土壤团聚体特征

2.3.1 土壤团聚体粒径分布特征

随着土层深度从 0~20 cm 增至 40~60 cm, 在 NR 模式下, 1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 粒径范围的土壤团聚体含量呈先增加后减少的变化特征, 而 >2 mm 和 <0.25 mm

表 1 不同土地利用方式下土壤物理性状
Tab. 1 Soil physical properties soil layer for different land use patterns

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	容重 BD/(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Tp/%	毛管孔隙度 Cp/%	非毛管孔隙度 Ncp/%
0~20	MR	1.46±0.07 ^{Ba}	37.17±1.51 ^{Aa}	35.96±1.43 ^{Aa}	1.22±0.17 ^{ABab}
	NR	1.55±0.02 ^{Aa}	37.64±1.88 ^{ABab}	36.59±1.84 ^{Aa}	1.05±0.16 ^{Ab}
	NL	1.59±0.02 ^{Aa}	33.29±0.91 ^{Bc}	32.17±0.96 ^{Bc}	1.12±0.15 ^{Aa}
20~40	MR	1.47±0.79 ^{Ba}	36.35±3.65 ^{Aa}	35.57±3.94 ^{Aa}	1.04±0.14 ^{Bb}
	NR	1.60±0.06 ^{Aa}	33.66±3.30 ^{Ab}	31.58±3.53 ^{Ab}	2.08±0.82 ^{Aa}
	NL	1.51±0.05 ^{ABb}	37.83±1.52 ^{Ab}	36.50±1.47 ^{Ab}	1.33±0.10 ^{ABa}
40~60	MR	1.41±0.04 ^{Ba}	39.59±1.10 ^{Aa}	38.30±0.85 ^{Aa}	1.29±0.06 ^{ABa}
	NR	1.55±0.07 ^{Aa}	39.23±2.35 ^{Aa}	37.79±2.34 ^{Aa}	1.44±0.19 ^{ABab}
	NL	1.40±0.03 ^{Bc}	40.68±1.06 ^{Aa}	39.57±1.11 ^{Aa}	1.11±0.17 ^{Ba}

注：不同大写字母表示相同土层下不同土地利用方式之间差异显著（ $P<0.05$ ），不同小写字母表示相同土地利用方式下不同土层之间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different capital letters represent significant difference among different land use types within the same soil layer ($P<0.05$); whereas lowercase letters indicate significant difference among different soil layers within the same land use type ($P<0.05$).

表 2 不同土地利用方式和土层深度理化性质的方差分析
Tab. 2 Analysis of variance of physical and chemical properties under different land use patterns and soil depths

变异来源 Source of variation	指标 Index	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
土地利用方式	pH	2	0.453	14.576	<0.001
	SOM 含量	2	1.187	0.514	0.605
	TN 含量	2	0.006	1.236	0.306
	AP 含量	2	334.044	97.831	<0.001
	AK 含量	2	3395.311	13.278	<0.001
	BD	2	0.043	15.987	<0.001
	Pt	2	2.232	0.489	0.619
	Cp	2	5.014	1.027	0.372
	Ncp	2	0.452	4.807	0.016
土层深度	pH	2	0.221	7.117	<0.001
	SOM 含量	2	178.063	77.083	<0.001
	TN 含量	2	0.265	55.229	<0.001
	AP 含量	2	220.878	64.688	<0.001
	AK 含量	2	10 317.288	40.349	<0.001
	BD	2	0.025	9.088	0.001
	Pt	2	59.057	12.929	<0.001
	Cp	2	58.904	12.067	<0.001
	Ncp	2	0.374	3.969	0.031
土地利用方式×土层深度	pH	4	0.144	4.637	0.006
	SOM 含量	4	7.899	3.419	0.025
	TN 含量	4	0.012	2.417	0.073
	AP 含量	4	84.701	24.806	<0.001
	AK 含量	4	1295.628	5.067	0.001
	BD	4	0.011	4.070	0.01
	Pt	4	20.374	4.461	0.007
	Cp	4	24.258	4.969	0.004
	Ncp	4	0.416	4.425	0.007

粒径团聚体则呈先减少后增加的动态变化(图 3); 相较之下, MR 模式中 0.5~1 mm 与 0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量随土层加深呈持续递减趋势, >2 mm 粒径团聚体则表现为先增后减的分布模式, 1~2 mm 粒径团聚体含量先减少后增加, 微团聚体 (<0.25 mm) 含量则逐渐增加; NL 模式下 0.5~1 mm 粒径团聚体含量先增加后减少, >2 mm、1~2 mm、0.25~0.5 mm 粒径团聚体的数量逐渐减少, 微团聚体 (<0.25 mm) 含量逐渐增加。NR 模式下不同土层深度>2 mm、1~2 mm 粒径的水稳性团聚体含量均显著高于 MR 和 NL 模式; 相反, 其在 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm 粒径的水稳性团聚体数量均显著低于 MR 和 NL 模式。

2.3.2 土壤团聚体稳定性特征 MR 模式下不同土层土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 均表现为: 20~40 cm>0~20 cm>40~60 cm; NR 模式下不同土层的 MWD 表现为: 0~20 cm>40~60 cm>20~40 cm, GMD 则表现为: 40~60 cm>0~20 cm>20~40 cm; NL 模式下不同土层的 MWD 和 GMD 表现为: 40~60 cm>20~40 cm>0~20 cm (图 4)。NR 模式下 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层的 MWD 和 GMD 均显著高于 NL 和 MR 模式。NR 模式下不同土层土壤水稳性团聚体 *D* 值均显著小于 NL 和 MR 模式, 总体趋势为 NR<NL<MR, 即 NR 模式下土壤稳定性最高。随着土层深度增加,

NR 模式土壤水稳性团聚体 *D* 值表现为递减趋势, 但 MR 和 NL 模式表现出递增趋势。由表 3 可知, 土地利用方式对不同粒径水稳性团聚体含量及团聚体平均重量直径、平均几何直径、分形维数值均具有极显著影响, 土层深度对 1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒径范围的水稳性团聚体具有显著影响, 而土地利用与土层深度的交互作用仅对>2 mm、1~2 mm 粒径范围水稳性团聚体及分形维数值具有显著影响。

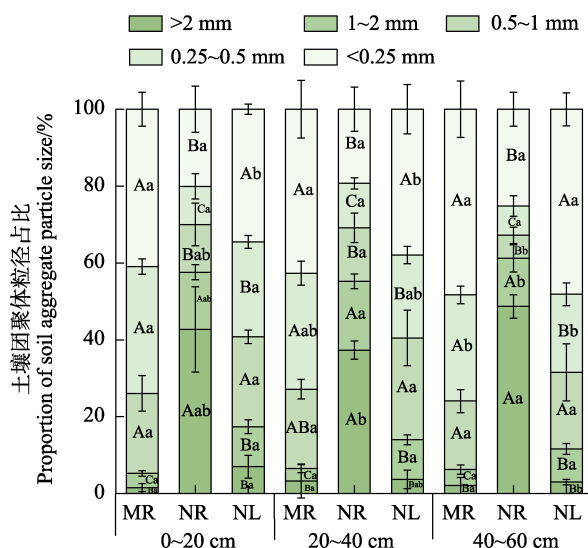


图 3 不同土地利用方式下土壤水稳性团聚体分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns

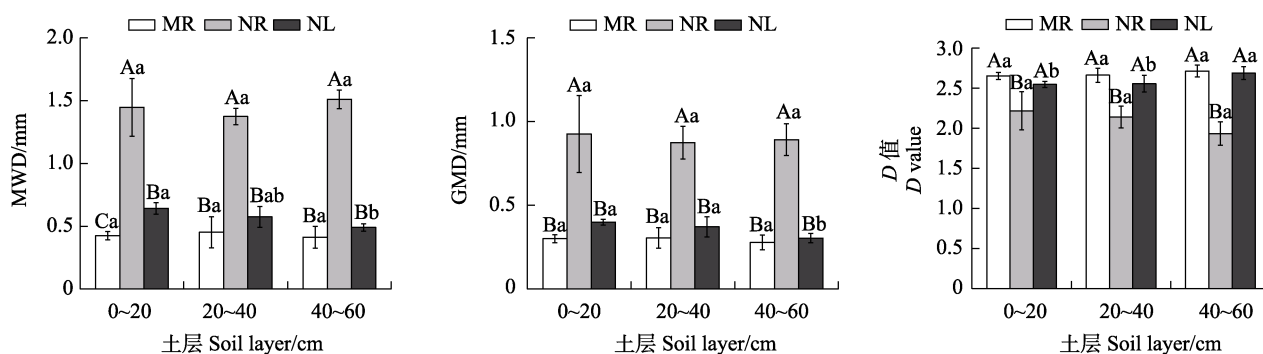


图 4 不同土地利用方式下土壤水稳性团聚体的 MWD、GMD 和 *D* 值

Fig. 4 MWD, GMD and *D* values of soil water-stable aggregates under different land-use patterns

2.4 土壤理化性质与土壤团聚体稳定性指标的相关性分析

通过 Pearson 相关性分析揭示不同土层土壤理化性质与团聚体稳定性之间的关联特征(图 5)。0~20 cm 土层中, 土壤 SOM 与 TN 含量呈显著正相关, 而与 AP 含量呈显著负相关; 土壤>2 mm 团聚体与土壤平均几何直径呈显著正相关。20~

40 cm 土层中, 土壤 SOM 与 Cp 呈显著正相关; BD 与 Ncp 呈显著正相关;<0.25 mm 微团聚体与 *D* 值呈显著正相关; 土壤平均重量直径与<0.25 mm 团聚体含量和 *D* 值均呈显著负相关。40~60 cm 土层中, pH 与 1~2 mm 团聚体呈显著正相关; >2 mm 团聚体与 GMD、MWD 呈显著正相关, 而与<0.25 mm 团聚体 *D* 值呈显著负相关。整体而言,

表 3 不同土地利用方式和土层深度团聚体粒径及稳定性指标的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of aggregate particle sizes and stability indices under different land use patterns and soil depths

变异来源 Source of variation	指标 Index	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
土地利用方式	>2 mm	2	6249.433	314.730	<0.001
	1~2 mm	2	389.186	115.878	<0.001
	0.5~1 mm	2	493.572	22.500	<0.001
	0.25~0.5 mm	2	1293.354	209.237	<0.001
	<0.25 mm	2	1732.548	55.724	<0.001
	MWD	2	3.622	338.851	<0.001
	GMD	2	1.316	144.300	<0.001
	D	2	1.180	81.926	<0.001
土层深度	>2 mm	2	32.344	1.629	0.215
	1~2 mm	2	13.123	3.907	0.032
	0.5~1 mm	2	107.139	4.884	0.015
	0.25~0.5 mm	2	50.563	8.180	0.002
	<0.25 mm	2	261.979	8.426	0.001
	MWD	2	0.005	0.488	0.619
	GMD	2	0.008	0.833	0.446
	D	2	0.002	0.161	0.852
土地利用方式×土层深度	>2 mm	4	58.989	2.971	0.037
	1~2 mm	4	10.568	3.147	0.030
	0.5~1 mm	4	8.888	0.405	0.803
	0.25~0.5 mm	4	7.458	1.207	0.331
	<0.25 mm	4	20.367	0.655	0.628
	MWD	4	0.019	1.785	0.161
	GMD	4	0.003	0.306	0.871
	D	4	0.057	3.949	0.012

平均重量直径与平均几何直径作为土壤团聚体稳定性的关键指标，其数值与土壤大团聚体（>2 mm、1~2 mm）呈正相关关系，与微小团聚体（0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm）、分形维数值呈负相关关系。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

本研究发现，NL 模式 0~20 cm、20~40 cm 土层的土壤 pH 显著高于 MR 和 NR 模式。这可能是由于龙眼凋落物中含有较高比例的灰分，在矿化分解过程中会不断释放碱性物质，中和土壤的部分酸性，从而减轻土壤酸化程度^[18]，该结论与邹鑫等^[6]在西双版纳对橡胶林和热带雨林的研究结论一致。土壤 pH 的降低会影响黏土矿物和有机质等胶体的表面电荷，使其表面正电荷增加、静

电斥力减小，进而促进颗粒通过静电吸引发生团聚^[19]。土壤容重是土壤最重要的物理性质之一，它综合反映了土壤的质地和孔隙状况，能够影响土壤的透气性、持水性和溶质迁移能力等，进而对土壤肥力和植物生长产生影响^[20]。MR 模式各土层的土壤容重均相对较低，这表明长期人工施肥措施可降低土壤容重，该结果与刘丽媛等^[21]的研究一致。NR 模式 20~40 cm、40~60 cm 土层的土壤非毛管孔隙度显著高于 NL 模式，这主要归因于橡胶树具有较深的主根和丰富的吸收根，可形成稳定且密集根系网络，促进优先流和水分下渗^[22]。

作为表征土壤结构稳定性的重要指标，土壤平均重量直径和平均几何直径对土地利用方式及土壤物理环境变化具有显著响应特征，其数值越大通常表明土壤结构状况得到改善。同时，分形维数作为综合性评价参数，可有效反映土壤结构

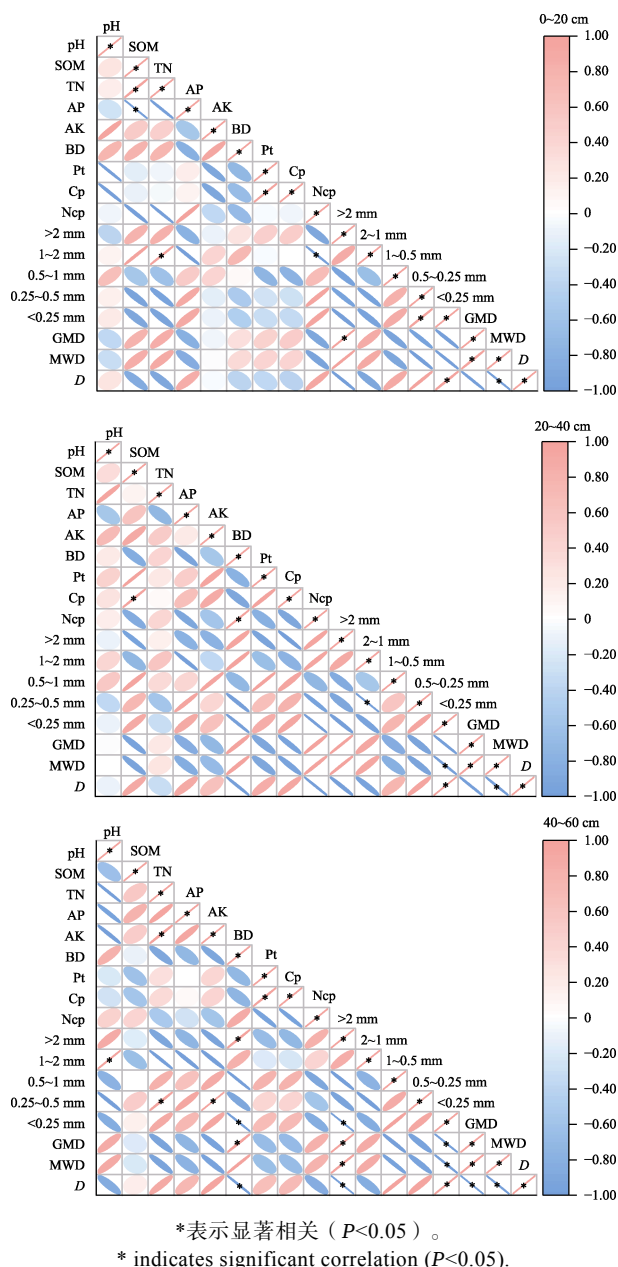


图 5 不同土层土壤理化性质与土壤团聚体稳定性指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil physicochemical properties of different soil layers and soil aggregate stability

特征、养分状况及退化程度等多维信息。研究发现, NR 模式各土层的水稳性大团聚体 (>2 mm) 数量、GMD 和 MWD 均显著高于 MR 和 NL 模式, 这说明自然管理相较于人工管理, 其土壤稳定性更好, 抗蚀能力更强^[23]。而 MR 模式各土层微小团聚体 (<0.25 mm) 数量、GMD 和 MWD 均低于 NR 和 NL 模式, 该结果与刘敏英等^[24]的研究结果一致。一方面, 人工管理橡胶林经常进行除草、有机物料清理填沟压青等作业, 导致其与自

然管理橡胶林和低人为扰动龙眼果园相比, 有机质输入量大幅降低, 有机碳源减少致使土壤动物和微生物活动减弱, 因此 NR 模式土壤中的有机胶结物质较 MR 和 NL 模式更少^[13]。而有机胶结物质是形成土壤团聚体的重要粘结物质, 其减少进而导致橡胶林水稳性大团聚体减少^[25]; 另一方面, 定期挖穴施肥等生产管理破坏土壤结构, 导致微团聚体占比增加。同时, 化肥施用会加速有机质矿化, 削弱胶结作用, 加剧土壤退化。NR 模式下的高 MWD 印证了自然生态系统对土壤结构的保护作用, 而 MR 模式的低值说明集约农业具有潜在生态风险。NL 模式的过渡性特征表明, 适度减少人为干扰可部分恢复土壤结构, 但需经过长期自然过程才能接近原始状态。

3.2 影响土壤团聚体稳定性的关键因子分析

水稳性团聚体是衡量土壤团聚体稳定性的核心指标之一^[26], 其稳定性受多种因素影响, 包括降水、植被盖度、地形地貌特征以及土壤本身的物理化学性质等^[27]。在本研究中, 相较于土层深度及其与土地利用方式的交互作用, 土地利用方式对不同粒径水稳性团聚体含量及团聚体稳定性指标影响最大。土地利用方式对土壤水稳性团聚体含量分布及团聚体稳定性指标具有极显著影响。罗晓虹等^[28]对 6 种不同土地利用方式 (针阔叶混交林、竹林、果园、旱地、水田和荒草地) 的土壤水稳性团聚体含量进行了分析, 结果显示, 不同土地利用方式下土壤的结构存在显著差异。不同土地利用方式通过改变植被覆盖、耕作强度、有机质输入及生物扰动等过程, 可以直接影响土壤水稳性团聚体分布与稳定性^[29]。相关性分析显示, 0~20 cm 土层的土壤微小团聚体 (0.25~0.5 mm、 <0.25 mm) 与平均重量直径、平均几何直径呈负相关关系, 这主要是因为细颗粒具有较大的比表面积, 它们可通过竞争吸附或改变溶液环境, 削弱有机质与矿物颗粒间通过表面电荷形成的胶结作用强度, 从而降低团聚体稳定性^[30]。20~40 cm 土层的土壤容重与非毛管孔隙度呈正相关, 这可能与机械压实导致大孔隙减少有关。压实过程显著减少了土壤中的大孔隙比例, 导致容重上升与非毛管孔隙度下降, 这一现象在农业集约化区域尤为显著^[31]。40~60 cm 土层的土壤大团聚体 (>2 mm) 与 GMD、MWD 呈显著正相关, 这表明深层土壤的结构稳定性主要依赖于大团聚体的物理支撑作用, 而有机质的贡献减弱, 这与深层

碳库矿质化主导的成土过程一致^[32]。随土层深度的加深, 土壤中 $>2\text{ mm}$ 的团聚体分布量减少, $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体数量增加, 团聚体稳定性下降, 以至于在 $40\sim 60\text{ cm}$ 土层表现出 $<0.25\text{ mm}$ 团聚体与 GMD 和 MWD 呈显著负相关, 与 D 值呈显著正相关, 上述情况与张鹏等^[33]的研究一致。不同土层下 $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体与 D 值的正相关关系验证了微团聚体的增加会导致土壤结构复杂化。

本研究结果总体表明, 土地利用方式是驱动土壤粒径分布及团聚体稳定性的最关键因素。土地利用方式与土层深度的交互作用显著影响土壤中 $>2\text{ mm}$ 、 $1\sim 2\text{ mm}$ 的团聚体及分形维数。自然管理橡胶林模式下土壤团聚体的平均重量直径、平均几何直径、 $>2\text{ mm}$ 团聚体数值最高, 分型维数值最低, 说明其土壤结构稳定性较好。人工管理橡胶林模式土壤中微团聚体积累, 团聚体的平均几何直径、平均重量直径最低, 土壤结构稳定性较差。低人为扰动龙眼果园模式可缓解土壤酸化, 土壤结构有向好发展的趋势, 但深层土壤中微小团聚体积累。综上所述, 自然管理橡胶林模式显著提高土壤中 $>2\text{ mm}$ 团聚体的比例, 改善土壤团聚体稳定性, 即合理的土地自然养护可以改善热带经济作物林土壤的养分循环及土壤结构稳定性。可见, 为了优化热带经济林的土壤结构, 在提高土壤肥力及改良土壤时, 需适量提升有机物料输入以增加土壤有机质含量, 并尽量减少人为耕作扰动。

参考文献

- [1] 胡江玲. 干旱区内陆河流域土地利用变化及其对土壤质量的影响研究: 以新疆精河流域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
HU J L. Land use change and its effects on soil quality in an arid inland basin: a case study of the Jinghe basin of Xinjiang province[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. (in Chinese)
- [2] 胡煜杰, 唐瑞杰, 杨安富, 赵彩悦, 胡玉麟, 董璐, 吴晓晨, 孟磊, 林天, 伍延正. 不同土壤类型和利用方式下土壤酸缓冲性能分异及其机理探讨: 以海南省为例[J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2231-2244.
HU Y J, TANG R J, YANG A F, ZHAO C Y, HU Y L, DONG L, WU X C, MENG L, LIN T, WU Y Z. Differentiation and mechanism of soil acid buffering capacity under different soil and utilization types: a case study in Hainan province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(10): 2231-2244. (in Chinese)
- [3] 赵珊珊, 王百群. 长期不同土地管理与施肥策略对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J/OL]. 植物营养与肥料学报, (2025-08-28)[2025-09-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y4WXQ1XfpS4RkQHUF1PCLXrwJ6r75v-2JE1wsveU8G2bW10fDlqJHT5_-hMxIYsVNIDTTimIzRlBg-WTzQUlyttleH6lKHq3whHuag94-v1y28HjvCcdGemiYDn6wy3q85r4qrWO5SvXnyTh02G9m1Qo1hmwDPW07IPIFi6H0p-Bj4jEtdPxOQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
ZHAO S S, WANG B Q. Effects of long-term land management and fertilization strategies on soil organic carbon fractions and aggregate stability[J/OL]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, (2025-08-28)[2025-09-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y4WXQ1XfpS4RkQHUF1PCLXrwJ6r75v-2JE1wsveU8G2bW10fDlqJHT5_-hMxIYsVNIDTTimIzRlBg-WTzQUlyttleH6lKHq3whHuag94-v1y28HjvCcdGemiYDn6wy3q85r4qrWO5SvXnyTh02G9m1Qo1hmwDPW07IPIFi6H0p-Bj4jEtdPxOQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [4] 刘福君, 胡玉洁, 郭忠录, 曾建辉, 李东耀, 肖智远. 丹江口库区典型小流域不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 113-121.
LIU F J, HU Y J, GUO Z L, ZENG J H, LI D Y, XIAO Z Y. Effects of patterns of land use on the stability of aggregates in soil in typical small watersheds in Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(4): 113-121. (in Chinese)
- [5] YAN R, LIN F M, CHUAN J, TANG J W, FAN Z F, FENG D F, ZENG X L, JIN Y Q, LIU C, OLATUNJI O A. Understorey vegetation management regulates soil carbon and nitrogen storage in rubber plantations[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2023, 127: 209-224.
- [6] 邹鑫, 陈春峰, 刘文杰. 西双版纳橡胶种植对土壤团聚体及理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 597-605.
ZOU X, CHEN C F, LIU W J. Effects of rubber plantation on soil aggregate stability and physicochemical properties in Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 597-605. (in Chinese)
- [7] 陈春峰, 吴骏恩, 刘佳庆, 刘文杰. 西双版纳地区胶农(林)复合系统对土壤团聚体的改良作用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 326-334.
CHE C F, WU J E, LIU J Q, LIU W J. The improvement of soil aggregates by building rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna, southwest China[J]. Journal of Yunnan University, 2016, 38(2): 326-334. (in Chinese)

- [8] 石钰欣, 郑红裕, 卫晋瑶, 马晨雨. 海南琼中 2000—2020 年橡胶林面积及固碳能力研究[J]. 中国热带农业, 2024(5): 54-61.
SHI Y X, ZHENG H Y, WEI J Y, MA C Y. A study on the area and carbon fixation capacity of natural rubber forests in Qiongzong, Hainan from 2000 to 2020[J]. China Tropical Agriculture, 2024(5): 54-61. (in Chinese)
- [9] 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.
HE K, HUANG Z D. Rubber tree cultivation on the northern edge of the tropics[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1987. (in Chinese)
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU R K. Soil agrochemical analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [11] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [12] 彭沛宇, 王卫华. 卡房尾矿库土壤重金属化合物对微团聚体稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 215-220, 244.
PENG P Y, WANG W H. Effects of soil heavy metal compounds on the micro-aggregate stability in Kafang tailing pond[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 215-220, 244. (in Chinese)
- [13] WU T N, ZHANG Y T, WANG Y T, WANG S Q, LEI L Y. Factors affecting the stability of soil aggregates of plinthosols in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Catena, 2023, 228: 10.1016/j.catena.2023.107159.
- [14] 王连晓, 史正涛, 刘新有, 冯泽波, 肖冬冬. 不同林龄橡胶林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1381-1388.
WANG L X, SHI Z T, LIU X Y, FENG Z B, XIAO D D. Study on composition and stability of soil aggregates under different age-class rubber plantations[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(8): 1381-1388. (in Chinese)
- [15] 国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室. 第三次全国土壤普查技术规程(试行)[Z]. 北京: 科学出版社, 2022.
Office of the Leading Group for the Third National Soil Census, State Council. Technical regulations for the third national soil census (trial)[Z]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [16] 徐建明. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU J M. Soil quality indicators and assessment[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 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 agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 李发林, 黄炎和, 蔡志发, 谢晋生. 果园植被凋落物营养元素年库流量和利用效率的研究[J]. 福建热作科技, 2003, 28(1): 1-4.
LI F L, HUANG Y H, CAI Z F, XIE J S. Annual nutrient flux and use efficiency of orchard litterfall[J]. Fujian Science & Technology of Tropical Crops, 2003, 28(1): 1-4. (in Chinese)
- [19] OLIVER D P, LI Y S, ORR R, NELSON P, BARNES M, MCLAUGHLIN M, KOOKANA R. The role of surface charge and pH changes in tropical soils on sorption behaviour of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)[J]. Science of The Total Environment, 2019, 673: 197-206.
- [20] 宋鸽, 史东梅, 朱红业, 金慧芳, 张庆, 姜义宝. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 610-622.
SONG G, SHI D M, ZHU H Y, JIN H F, ZHANG Q, LOU Y B. Effects of tillage measures on quality of cultivated-layer in red soil slope farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 610-622. (in Chinese)
- [21] 刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 高艺, 郑向群. 有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 867-873.
LIU L Y, XU Y, ZHU S H, GAO Y, ZHENG X Q. Meta-analysis on the responses of soil bulk density to supplementation of organic fertilizers in croplands in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 867-873. (in Chinese)
- [22] 贺军军, 林钊沐, 罗微, 蓝亿亿, 林清火. 橡胶树根系生长发育及其影响因素研究进展与展望[J]. 广东农业科学, 2008, 35(5): 19-21.
HE J J, LIN Z M, LUO W, LAN Y Y, LIN Q H. Research progress and prospect on roots and growth influence factors of *Hevea brasiliensis*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008, 35(5): 19-21. (in Chinese)
- [23] 王连晓. 西双版纳橡胶林土壤水稳性团聚体及其有机碳、全氮变化机理研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2017.
WANG L X. Study on the change mechanism of soil water-stable aggregates and its organic carbon and nitrogen of rubber plantation in Xishuangbanna[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2017. (in Chinese)
- [24] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5): 402-410.
LIU M Y, ZHENG Z C, LI T X. Study on the composition and stability of soil aggregates with different tea plantation

- age[J]. *Journal of Tea Science*, 2012, 32(5): 402-410. (in Chinese)
- [25] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1521-1529.
- XU X R, WANG J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1521-1529. (in Chinese)
- [26] 王国会, 王建军, 陶利波, 许冬梅. 围封对宁夏荒漠草原土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. *草地学报*, 2017, 25(1): 76-81.
- WANG G H, WANG J J, TAO L B, XU D M. Effects of enclosure on soil aggregate distribution and stability in the desert steppe of Ningxia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(1): 76-81. (in Chinese)
- [27] 彭珏, 陈家赢, 王军光, 蔡崇法. 中国典型地带性土壤团聚体稳定性与孔隙特征的定量关系[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 113-121.
- PENG J, CHEN J Y, WANG J G, CAI C F. Linking aggregate stability to the characteristics of pore structure in different soil types along a climatic gradient in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(18): 113-121. (in Chinese)
- [28] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3816-3824.
- LUO X H, WANG Z F, LU C, HUANG R, WANG F H, GAO M. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3816-3824. (in Chinese)
- [29] 李婕, 杨学云, 孙本华, 张树兰. 不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 346-354.
- LI J, YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Effects of soil management practices on stability and distribution of aggregates in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 346-354. (in Chinese)
- [30] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627-643.
- LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643. (in Chinese)
- [31] 任利东, 王丽, 林琳, 张斌. 农田土壤机械压实研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 610-626.
- REN L D, WANG L, LIN L, ZHANG B. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 610-626. (in Chinese)
- [32] 苏兴雷, 渠晨晨, 康杰, 高大鑫, 蔡鹏, 陈雯莉, 黄巧云. 微生物驱动土壤矿物结合态有机碳的形成[J]. *科学通报*, 2024, 69(22): 3327-3338.
- SU X L, QU C C, KANG J, GAO D X, CAI P, CHEN W L, HUANG Q Y. Microorganisms drive the formation of mineral-associated organic carbon in soils[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(22): 3327-3338. (in Chinese)
- [33] 张鹏, 贾志宽, 王维, 路文涛, 高飞, 聂俊峰. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1513-1520.
- ZHANG P, JIA Z K, WANG W, LU W T, GAO F, NIE J F. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1513-1520. (in Chinese)