

广西植物

Guihaia

ISSN 1000-3142, CN 45-1134/Q

《广西植物》网络首发论文

题目：白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体稳定性及其养分元素的动态影响
作者：姜川，陈远洋，曾小玲，陈殊洁，杨雅娜，林方美，金艳强，刘成刚
网络首发日期：2025-06-23
引用格式：姜川，陈远洋，曾小玲，陈殊洁，杨雅娜，林方美，金艳强，刘成刚. 白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体稳定性及其养分元素的动态影响[J/OL]. 广西植物. <https://link.cnki.net/urlid/45.1134.q.20250623.0851.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202505029

白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体稳定性及其养分元素的动态影响

姜 川^{1,2}, 陈远洋^{1,3}, 曾小玲^{1,2}, 陈殊洁^{1,2}, 杨雅娜^{1,4}, 林方美^{1,2,5}, 金艳强¹, 刘成刚^{1*}
(1.中国科学院西双版纳热带植物园, 中国科学院热带植物资源可持续利用重点实验室, 云南 勐腊 666303; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.云南大学 农学院, 昆明 650504; 4.云南农业大学热带作物学院, 云南 普洱 665000; 5.中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650)

摘 要: 为探究培菌白蚁作为“生态系统工程师”对热带人工林土壤质量的改良功能, 该研究以西双版纳橡胶纯林内培菌白蚁巢穴为试验对象, 通过对比相邻环境土壤, 分析了白蚁巢穴顶部和基部土壤团聚体稳定性及不同粒径团聚体(大团聚体: $>2\text{ mm}$; 小团聚体: $2\sim 0.25\text{ mm}$; 微团聚体: $<0.25\text{ mm}$)养分含量的季节变化。结果表明:(1)旱季巢穴顶部微团聚体比例显著提高131.1%;而雨季巢穴顶部和基部大团聚体比例降低19.6%和26.2%,小团聚体比例增加27.1%和42.6%。旱雨季巢穴相较于环境土壤均一定程度上降低了团聚体稳定性。(2)旱雨季巢穴均降低了各粒径团聚体的含水量、全磷和有效磷含量,顶部和基部平均降幅分别为37.7%和18.0%、16.3%和18.9%及35.4%和37.1%。各团聚体的可溶性有机碳含量旱季均显著高于雨季,铵态氮则呈相反趋势。(3)旱雨季巢穴促进了各粒径团聚体全铝、全铁和全钾的富集,顶部和基部平均增幅分别为15.3%和13.8%、13.5%和12.9%及9.5%和8.9%;旱季各团聚体的全铜、全锌和全硫含量显著高于雨季。(4)随着团聚体粒径的减小,可溶性有机碳含量降幅高达163.4%,但有效磷含量增幅高达125.3%。综上认为,培菌白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体稳定性及其养分元素的影响受巢穴取样位置与季节的共同调控,且时空异质性显著。该研究结果可为深入理解橡胶林中白蚁的生态功能定位和土壤可持续管理提供理论参考。

关键词: 培菌白蚁, 团聚体稳定性, 季节动态, 速效磷, 矿质元素

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A

Dynamic impacts of termite mounds on soil aggregate stability and nutrient elements in rubber plantations

JIANG Chuan^{1,2}, CHEN Yuanyang^{1,3}, ZENG Xiaoling^{1,2}, CHEN Shujie^{1,2}, YANG Yana^{1,4}, LIN Fangmei^{1,2,5}, JIN Yanqiang¹, LIU Chenggang^{1*}

(1. CAS Key Laboratory of Tropical Plant Resources and Sustainable Use, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650504, China; 4. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural

基金项目: 国家自然科学基金(32271854); 云南省基础研究专项(202201AT070123); 中国科学院西部青年学者项目; 云南省“兴滇英才”青年人才专项(XDYC-QNRC-2022-0204)。

第一作者: 姜川(1997—), 硕士研究生, 主要从事森林土壤研究, (E-mail) jiangchuan@xtbg.ac.cn。

***通信作者:** 刘成刚, 博士, 研究员, 研究方向为森林土壤学, (E-mail) liuchenggang@xtbg.ac.cn。

University, Pu'er 665000, Yunnan, China; 5. CAS Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: To explore the improvement effect of fungus-growing termites as "ecosystem engineers" on soil quality in tropical plantations, this study compared termite mound soils (top and base positions) with adjacent surrounding soils from a mature rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China. Seasonal variations in soil aggregate stability and nutrient distribution across aggregate fractions (megaaggregate >2 mm, macroaggregate 2–0.25 mm, and microaggregate <0.25 mm) were analyzed. The results were as follows: (1) The mass percentage of microaggregates at mound tops increased significantly by 131.1% during the dry season. During the rainy season, the mass percentage of megaaggregates at mound tops and bases decreased significantly by 19.6% and 26.2%, respectively, while macroaggregates increased by 27.1% and 42.6%. Compared to surrounding soils, mound soils exhibited reduced aggregate stability in both seasons to a certain extent. (2) Mound soils significantly reduced moisture content, total phosphorus, and available phosphorus in each aggregate in both seasons, with average reductions of 37.7% and 18.0%, 16.3% and 18.9%, and 35.4% and 37.1% at the tops and bases, respectively. The content of dissolved organic carbon was higher in the dry season than in the wet season, whereas ammonium nitrogen exhibited the opposite trend. (3) Mound soils generally enriched total aluminum, total iron, and total potassium in each aggregate in both seasons, with average increases of 15.3% and 13.8%, 13.5% and 12.9%, and 9.5% and 8.9% at the tops and bases, respectively. Dry-season aggregates displayed significantly higher total copper, zinc, and sulfur than rainy-season counterparts. (4) As aggregate size decreased, the reduction in dissolved organic carbon content reached as high as 163.4%, whereas the increase in available phosphorus content was as high as 125.3%. In summary, the impact of fungus-growing termites' nesting on soil aggregate stability and nutrient elements in rubber plantations is governed by mound sampling location and seasonal variation, demonstrating strong spatiotemporal heterogeneity. This study can advance the understanding of termite-mediated ecological processes and support sustainable soil management strategies of rubber plantations in the tropics.

Key words: fungus-growing termite, aggregate stability, seasonal dynamics, available phosphorus, mineral element

白蚁作为全球热带-亚热带森林生态系统的关键功能类群, 其因环境改造能力被誉为“生态系统工程师”。全球现存白蚁种类约 3 000 种, 分布覆盖 2/3 的陆地面积 (Asheon et al., 2019; Liu et al., 2022); 我国已知 4 科 44 属 479 种, 其中云南以 125 种成为分布中心 (程冬保等, 2014; 林小兵等, 2017)。这类昆虫不仅是热带森林土壤动物生物量的主体, 而且其筑巢行为调控物质循环与能量流动 (姜川等, 2024)。根据食性与筑巢行为的生态功能分化, 森林内白蚁可分为培菌白蚁和食土白蚁 (Jouquet et al., 2005, 2016a)。培菌白蚁主要通过 *Termitomyces* 属共生高效降解植物木质纤维素 (Jouquet et al., 2022, 2023)。前人研究表明, 培菌白蚁通过共生关系可实现巢穴内养分的主动富集与转化 (Jouquet et al., 2018; Van Thuyne et al., 2021; López-Hernández, 2023)。此外, 巢穴发育过程会通过改变森林土壤水分、pH 及养分等的空间异质性, 进而调控植物和微生物的群落结构及其生态功能 (李德成等, 2003; 李志强等, 2015; Van Thuyne et al., 2021; Thant et al., 2025)。

土壤团聚体作为表征土壤结构稳定性的关键指标, 其粒径分布直接影响森林生态系统养

分固存、水分运移及抗侵蚀能力等生态功能(Deng et al., 2023; Lin et al., 2024)。Fall 等(2004)和 Jouquet 等(2016a)研究表明,白蚁筑巢期间可以通过唾液或粪便粘合土壤颗粒形成物理、化学及生物特性区别于环境土壤的生物团聚体。然而,白蚁筑巢对团聚体稳定性的影响存在差异:部分研究指出,巢穴土壤大团聚体($>2\text{ mm}$)稳定性因机械扰动显著低于周围生境(Jouquet et al., 2016b, 2016c),而微团聚体($<0.25\text{ mm}$)因有机-无机胶结物积累稳定性增强(Fall et al., 2004)。另一些研究则发现,培菌白蚁因其土壤粒径选择性可降低团聚体稳定性(Garnier-Sillam et al., 1995; Contour-Ansel et al., 2000),尤以小粒径土壤变化最显著(Jouquet et al., 2016b, 2016c, 2023)。这些差异可能与森林土壤基质特性(如有机质含量)、采样位置(地上/地下)及巢穴发育阶段的异质性有关(Davies et al., 2020; Jouquet et al., 2022)。尽管白蚁对森林土壤理化性质的影响已有较多探讨,但基于不同粒径团聚体水平下养分季节动态仍待进一步研究。

西双版纳作为我国天然橡胶主产区,橡胶树(*Hevea brasiliensis*)种植面积已达 42.4 万 hm^2 ,但单一化种植已导致严重的土壤质量退化及生物多样性衰减等生态问题(Liu et al., 2019, 2023; 林方美等, 2024)。同时,橡胶林内遍布白蚁巢穴(密度高达 $100\text{ 个}\cdot\text{hm}^2$),且以培菌白蚁为优势功能类群(Chen et al., 2018; Thant et al., 2025),其因改善团聚体结构及调节碳氮固存等功能被视为潜在的森林土壤工程师(李志强等, 2015; Van Thuyne et al., 2021; Wu et al., 2025)。然而,该区域热带季风气候(旱季 vs. 雨季)变化下巢穴如何影响土壤团聚体稳定性与养分循环功能目前尚不明确。本研究以西双版纳橡胶纯林内白蚁巢穴为研究对象,采用团聚体分级的方法,通过比较巢穴顶部、基部与环境土壤的团聚体稳定性及其养分季节动态,拟探讨以下问题:(1)白蚁筑巢如何影响橡胶林土壤团聚体的组成及稳定性;(2)白蚁筑巢如何调控橡胶林土壤团聚体养分元素的富集与流失。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南西双版纳勐腊县境内($101^{\circ}05'-101^{\circ}50'\text{ E}$, $21^{\circ}09'-22^{\circ}23'\text{ N}$; 海拔 $600\sim 880\text{ m}$),地处东南亚热带北缘,澜沧江大断裂东部。该区属于热带季风气候,森林植被丰富,干湿季交替明显,年均气温 21.9°C , 年均降水量 1480 mm , 约 81.0% 发生在雨季(5—10月)。试验期间(2019 年 1—12 月),该区遭受了严重的干旱事件,年均气温 22.8°C , 最高 5 月气温为 28.0°C , 最低 12 月气温为 16.3°C , 年均降水量为 833 mm , 其中 77% 发生在雨季。土壤类型以酸性氧化土为主。

1.2 试验设计及样品采集

试验点位于勐腊县 1994 年定植的橡胶纯林,种植规格为 $2.5\text{ m}\times 8\text{ m}$ 。橡胶林分平均树高 17.5 m 、胸径 22.6 cm ,采用常规管理措施。研究选取橡胶林下的培菌白蚁(*Macrotermes annandalei*)巢穴为研究对象。分别于 2019 年旱季(4 月)和雨季(9 月),随机选取外观相似的巢穴 8 个(间距约 200 m ; 平均高度和直径分别为 40 cm 和 63 cm),参照 Chen 等(2018)和 Tuma 等(2022)的方法进行土壤采样。使用直径 5 cm 的土钻,分别从每个巢穴顶部和基部的东、南、西、北四个方位采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 深度土样。随后将每 2 个临近巢穴的同一位置(顶部或基部)样品混合作为 1 个重复,共 4 组巢穴土壤;同时采集各自巢穴周围 5 m 环境土壤依照相同方法混匀作为对照。土样经剔除石砾、凋落物等杂质后,冷藏运输至实验室进行团聚体分级后测定各级粒径的理化特性。

1.3 试验方法

参照 Bach 和 Hofmockel(2014)的鲜土-干筛法进行土壤团聚体分级。称取 1000 g 鲜土,沿其自然脆弱带轻柔破碎后通过团聚体分析仪(XY-100,北京祥宇伟业仪器设备有限公司,北京)的 2 mm 和 0.25 mm 套筛,以 $60\text{ 次}\cdot\text{min}^{-1}$ 的振动频率筛 10 min 后,分离得到

大团聚体 (>2 mm)、小团聚体 (2~0.25mm) 和微团聚体 (<0.25 mm)。然后, 将上述样品风干后进行土壤基本理化指标和矿质元素的测定。同时, 根据各粒径团聚体的质量计算质量百分比 (M_i)、平均重量直径 (mean weight diameter, MWD)、几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 及土壤可蚀性因子 (E_f), 具体计算方法参照曾小玲等 (2024):

$$M_i = \sum \frac{m_i}{M_t} \times 100\%$$

式中: M_i 为第 i 个粒径团聚体的质量百分比 (%), m_i 为第 i 个粒径团聚体的质量 (g), M_t 为土壤总质量 (g)。

团聚体的 MWD (mm) 和 GMD (mm) 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \cdot w_i)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)$$

式中: x_i 为 i 级团聚体平均直径 (mm), w_i 为 i 级团聚体比例 (%)。

随后, 根据 GMD 估算土壤可蚀性因子 E_f :

$$E_f = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\}$$

土壤含水量采用烘干法测定。pH 采用 pH 计 (FE28-Standard, Mettler-Toledo, 中国) 测定 (水土质量比 2.5:1)。全碳和全氮采用元素分析仪 (Vario MAX CN, Elementar, 德国) 测定。可溶性有机碳和有机氮经纯水提取后采用总有机碳分析仪 (Vario TOC cube; Elementar, 德国) 测定。铵态氮和硝态氮经 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCL 浸提后用连续流动分析仪 (Auto Analyzer 3, SEAL Analytical GmbH, 德国) 测定。速效磷经 $0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4F 和 $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 提取后, 使用连续流动分析仪测定。全磷及其他矿质元素 (全铝、全铁、全钙、全锰、全铜、全锌、全钾及全硫) 经过 $\text{HClO}_4\text{-HF-HNO}_3$ 消解后, 使用 ICP-AES (iCAP6300, Thermo Fisher Scientific, 美国) 测定。

1.4 数据处理

采用 R 语言 (version 4.2.2) 软件进行数据处理与分析。通过三因素方差分析检验团聚体粒径、采样位置 (巢穴顶部和基部 vs. 环境土壤) 和季节 (旱季 vs. 雨季) 对土壤理化指标的影响; 采用单因素 ANOVA 和 Duncan 多重比较 ($\alpha=0.05$) 对同一团聚体水平下不同位置和季节的理化指标进行差异性检验; 采用 Spearman 相关分析评估土壤团聚体稳定性参数和理化环境因子的关系。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, $n=4$ (Origin 2024 制图)。

2 结果与分析

2.1 白蚁巢穴对土壤团聚体稳定性的影响

旱季巢穴微团聚体 (<0.25 mm) 比例受采样位置的影响 ($P<0.05$), 而雨季巢穴大 (>2 mm) 和小团聚体 (2~0.25 mm) 比例受采样位置的显著影响 ($P<0.05$, 表 1)。与环境土壤相比, 旱季巢穴顶部微团聚体比例显著增加, 增幅为 131.1%; 雨季巢穴顶部和基部小团聚体比例均显著增加, 增幅最高可达 42.6%, 而大团聚体比例均显著降低, 降幅高达 26.2%。此外, 相较于环境土壤, 旱雨季白蚁巢穴的几何平均直径和平均重量直径均一定程度上降低, 降幅分别为 9.9%~19.2%和 8.6%~14.0%; 可蚀性因子则有所增加, 增幅为 5.5%~6.7% (表 1)。

表 1 白蚁巢穴土壤团聚体稳定性的动态变化

Table 1 The dynamic changes in soil aggregate stability of termite mounds

季节 Season	采样位置 Location	大团聚体 Megaaggregate (%)	小团聚体 Macroaggregate (%)	微团聚体 Microaggregate (%)	几何平均直径 GMD (mm)	平均重量直径 MWD (mm)	可蚀性因子 E_f
旱季 Dry season	顶部 Top	44.45±1.83	32.66±5.23	22.89±4.31a	1.35±0.11	2.04±0.08	0.031 1±0.001 6
	基部 Base	55.69±9.80	31.62±7.57	12.70±2.34b	1.35±0.06	2.03±0.05	0.030 8±0.000 8
	环境 Surrounding	47.72±2.07	42.40±1.85	9.88±0.59b	1.67±0.34	2.36±0.25	0.029 2±0.003 9
雨季 Wet season	顶部 Top	47.62±2.81b	37.06±2.04a	15.32±0.94	1.41±0.08	2.10±0.07	0.030 1±0.001 1
	基部 Base	43.70±3.96b	41.58±2.65a	14.72±1.56	1.45±0.17	2.12±0.17	0.030 1±0.002 0
	环境 Surrounding	59.22±3.42a	29.15±2.31b	11.63±3.57	1.61±0.19	2.32±0.13	0.028 2±0.001 7

注：数据为平均值±标准误， $n = 4$ 。团聚体稳定性评价指标包括：几何平均直径、平均重量直径和可蚀性因子。不同小写字母表示同一团聚体各处理之间差异显著（ $P < 0.05$ ），无字母标记的表示差异不显著。

Note: Data are mean $\pm$ SE, $n = 4$. Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and erodibility factor (E_f) are used to evaluate aggregate stability of mound soils. Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same aggregate size at 0.05 level. No letter marking indicates no significant difference.

2.2 白蚁巢穴对土壤团聚体水分、pH 及碳氮磷组分的影响

白蚁巢穴土壤含水量和可溶性有机碳（除取样位置外）和有效磷均受团聚体粒径、位置及季节的显著影响（ $P < 0.001$ ）；全碳、全氮和全磷受位置的显著影响（ $P < 0.01$ ），而铵态氮受季节的显著影响（ $P < 0.001$ ，表 2）。与环境土壤相比，旱季巢穴顶部和基部显著降低了大团聚体的全磷含量及顶部大、微团聚体的含水量，降幅为 31.0%和 50.2%~62.0%（图 1：a、e）。雨季巢穴顶部显著降低了大、小团聚体的含水量，而基部则显著降低了各团聚体的有效磷含量，降幅分别为 25.9%~27.8%和 48.1%~53.9%。

此外，旱季巢穴各粒径团聚体的可溶性有机碳含量均高于雨季，顶部和基部的大团聚体增幅最高分别为 163.4%和 109.8%，且随团聚体粒径的减小，增幅逐渐降低（图 1：f）。铵态氮含量呈相反趋势，顶部和基部增幅最高分别为 205.4%（小团聚体）和 116.9%（大团聚体）（图 1：h）。随着团聚体粒径的减小，可溶性有机碳含量逐渐降低，旱季巢穴顶部降幅最高达 265.7%，而有效磷含量则逐渐增加，增幅高达 125.3%。

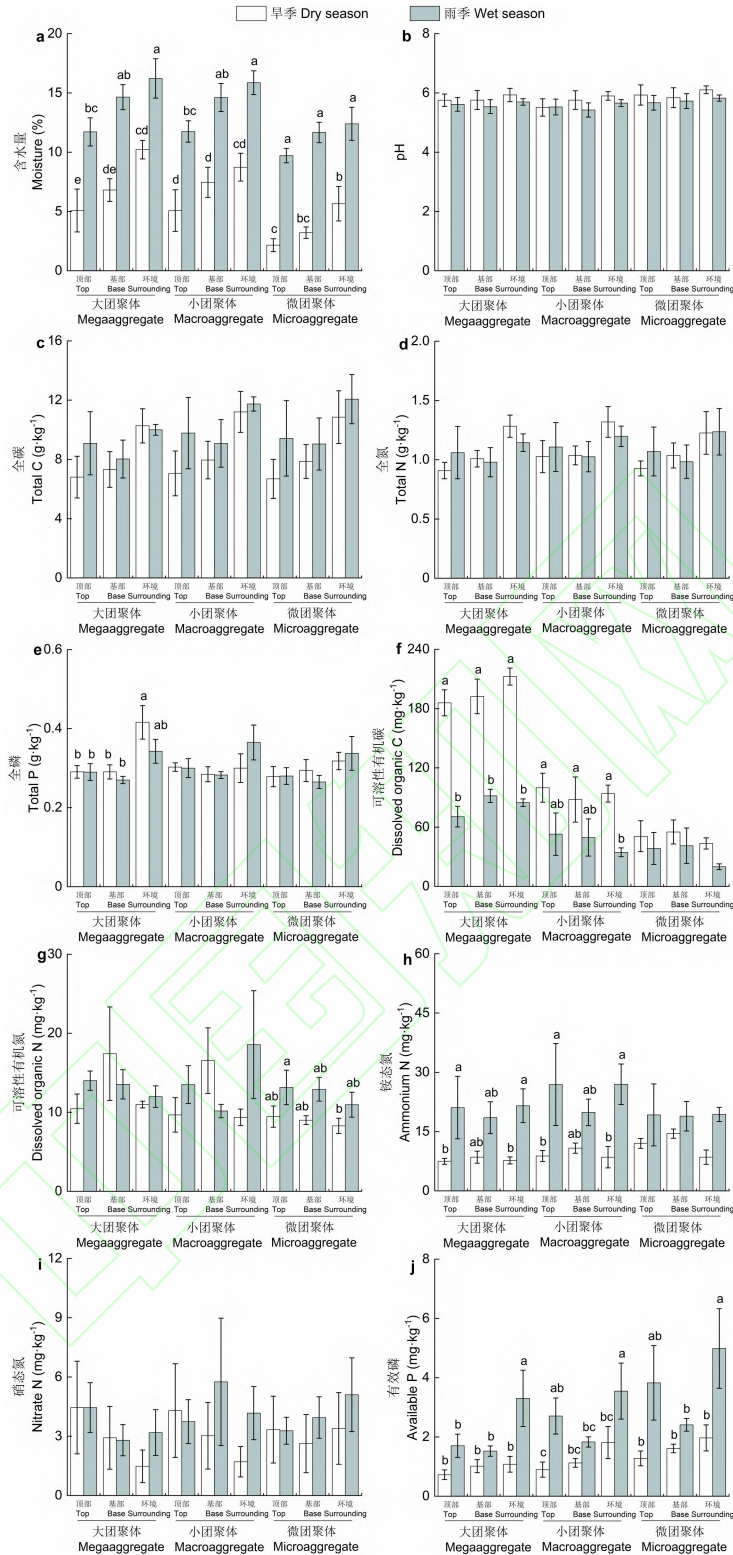
表 2 团聚体粒径、采样位置、季节及三者交互作用对巢穴土壤基本理化性质的影响

Table 2 Effects of aggregate size, sampling location, season and their interactions on the basic physicochemical properties of mound soils

因子 Factor	pH	含水量 Moisture	全碳 Total C	全氮 Total N	全磷 Total P	可溶性 有机碳 Dissolved organic C	可溶性 有机氮 Dissolved organic N	铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate N	有效磷 Available P
团聚体 Aggregate (A)	1.27	14.88***	0.55	0.25	0.95	81.31***	1.59	0.64	0.19	5.22**
位置 Location (L)	1.14	16.69***	6.63**	5.07**	10.71***	0.19	1.45	0.04	0.32	6.43**
季节 Season (S)	3.17	164.19***	3.39	0.00	0.14	85.59***	2.55	32.53***	1.75	31.01***
A*L	0.05	0.36	0.08	0.02	0.86	1.08	1.19	0.20	0.62	0.15
A*S	0.01	0.17	0.10	0.05	1.42	19.89***	0.17	1.21	0.14	0.89
L*S	0.11	0.41	0.73	0.93	0.26	0.75	0.02	0.94	0.69	2.89
A*L*S	0.14	0.10	0.02	0.08	1.13	0.06	0.97	0.10	0.14	0.27

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

Note: * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; *** indicates $P < 0.001$. The same below.



不同小写字母表示同一团聚体各处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 无字母标记的表示差异不显著。下同。
 Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the same aggregate size ($P < 0.05$); no letter marking indicates no significant difference. The same below.

图 1 白蚁巢穴土壤团聚体含水量、pH 及碳氮磷组分的动态变化

Fig. 1 The dynamic changes in moisture, pH, as well as carbon, nitrogen, and phosphorus fractions of termite mound soils within different aggregate sizes

2.3 白蚁巢穴对土壤团聚体矿质元素的影响

白蚁巢穴全铝受取样位置和季节的显著影响 ($P<0.05$)，而全铁、全钙、全锰、全铜、全锌和全硫均受季节的显著影响 ($P<0.05$, 表 3)。与环境土壤相比，旱雨季白蚁巢穴顶部和基部均一定程度的增加了全铝、全铁和全钾含量 (图 2: a、 b、 g)。此外，白蚁巢穴各团聚体的全铜、全锌 (除大团聚体外) 和全硫含量旱季显著高于雨季，平均增幅分别为 26.7%、29.0%、167.3% (图 2: e、 f、 h)。

表 3 团聚体粒级、采样位置、季节及三者交互作用对巢穴土壤矿质元素的影响

Table 3 Effects of aggregate size , sampling location, season and their interactions on soil mineral elements of mound soils

因子 Factor	全铝 Total Al	全铁 Total Fe	全钙 Total Ca	全锰 Total Mn	全铜 Total Cu	全锌 Total Zn	全钾 Total K	全硫 Total S
团聚体 Aggregate (A)	0.83	1.15	1.23	0.41	0.04	0.70	0.37	0.16
位置 Location (L)	3.84*	2.87	0.15	0.49	0.13	0.18	1.65	0.29
季节 Season (S)	4.27*	6.89*	6.13*	4.33*	52.61***	22.80***	0.00	745.36***
A*L	0.03	0.05	0.04	0.02	0.20	0.54	0.07	0.10
A*S	0.03	0.05	1.12	0.37	0.41	0.62	0.04	0.47
L*S	0.15	0.09	0.14	0.08	0.32	0.18	0.14	0.11
A*L*S	0.03	0.04	0.04	0.01	0.06	0.23	0.03	0.14

2.4 白蚁巢穴土壤团聚体稳定性与理化特性的相关关系

旱季和雨季巢穴土壤团聚体参数与理化特性的相关性存在差异，表现在试验所选的 108 组配对土壤参数中旱季巢穴正相关 (6 个) 和负相关 (5 个)，而雨季巢穴正相关 (5 个) 和负相关 (5 个) (图 3)。从整体来看，各粒级团聚体均与含水量、铵态氮、有效磷 (除微团聚体外) 呈显著正相关，与可溶性有机碳、全铜、全锌、全硫呈显著负相关 ($P<0.05$, 图 3: a)。旱季巢穴小团聚体比例与全碳和全氮呈显著负相关，与全铝、全铁、全锌和全钾呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 3: b)。而微团聚体则仅与全锰和全铜呈显著负相关。团聚体几何平均直径和平均重量直径均与全锰呈显著正相关。相比之下，雨季巢穴小团聚体与全碳、全氮、可溶性有机氮及铵态氮均呈显著负相关，仅大团聚体与全锰呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 3: c)。而平均重量直径与含水量、全氮、可溶性有机氮及全硫均呈显著正相关。

3 讨论

3.1 白蚁筑巢降低了橡胶林土壤团聚体稳定性

白蚁筑巢形成的生物团聚体具有与森林环境土壤显著不同的理化特性，且其结构特征随巢穴发育阶段呈现动态变化 (Fall et al., 2004; Jouquet et al., 2016a)。本研究中，旱季巢穴顶部相较于环境土壤显著增加了微团聚体的比例，但雨季巢穴显著增加了各位置小团聚体比例，这与巢体表层扰动较少，有机-无机胶结物质积累及 pH 值升高有关。雨季巢穴顶部和基部大团聚体比例显著降低，与 Jouquet 等 (2016c) 研究结果一致，主要是因为巢体外壁大团聚体结构稳定性较差，易受筑巢机械扰动和降雨侵蚀的影响 (Harit et al., 2017)。此外，旱雨季巢穴均一定程度上降低了团聚体稳定性，增加了巢穴的可蚀性风险，这与培菌白蚁活动导致铁铝土和变性土中团聚体稳定性降低的研究结果一致 (Jouquet et al., 2016b)。然而，Davies 等 (2020) 和 Fall 等 (2001) 发现培菌白蚁对巢穴地上结构团聚体稳定性无影响，而本团队前期研究发现，巢穴地上部分团聚体稳定性降低、地下部分稳定性提高的现象主要受 1 mm 粒径团聚体比例的调控 (Lin et al., 2024)。这些差异主要源于土壤基质特性 (如有机质和矿物的含量) 和采样位置 (地上/地下) 的特异性。

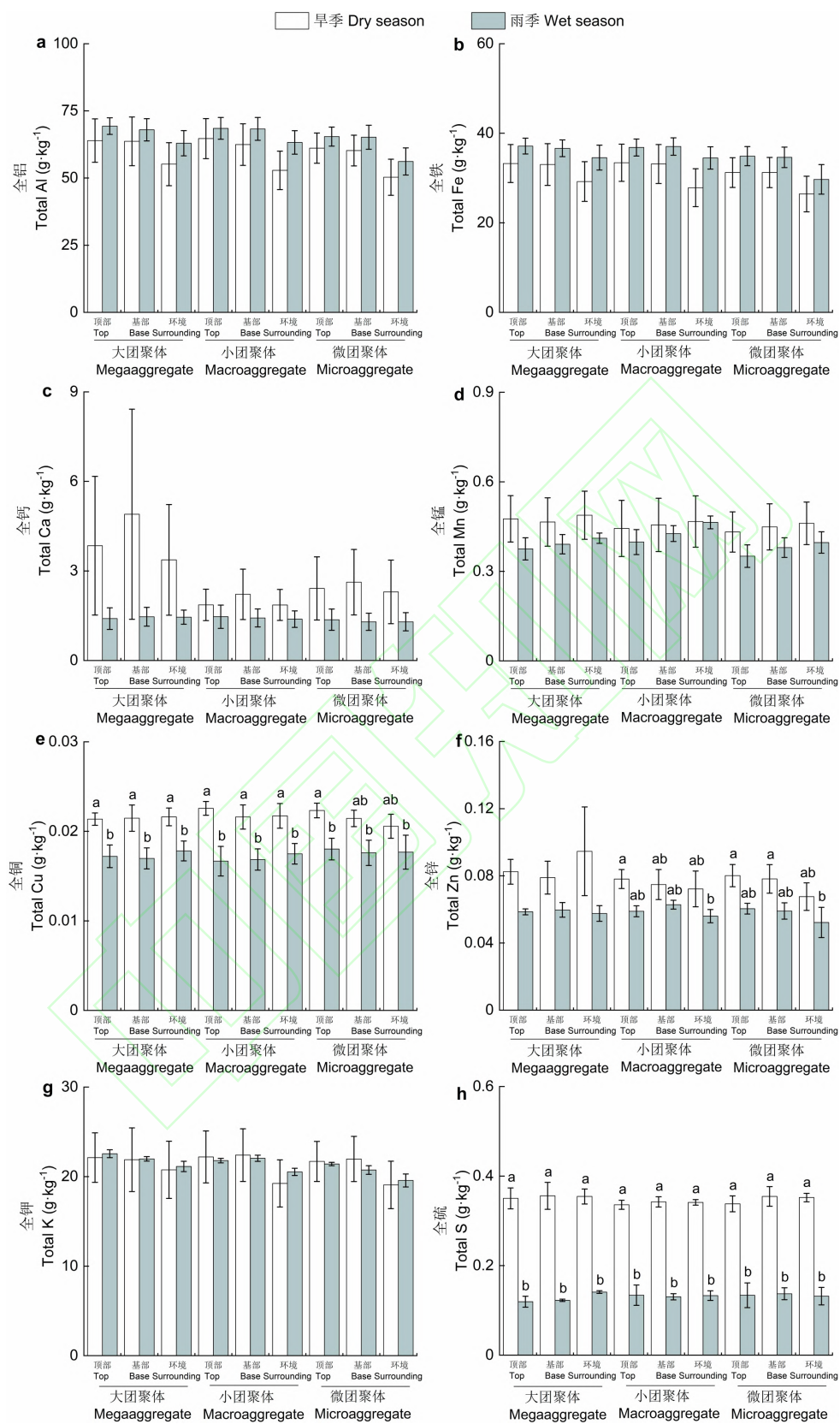
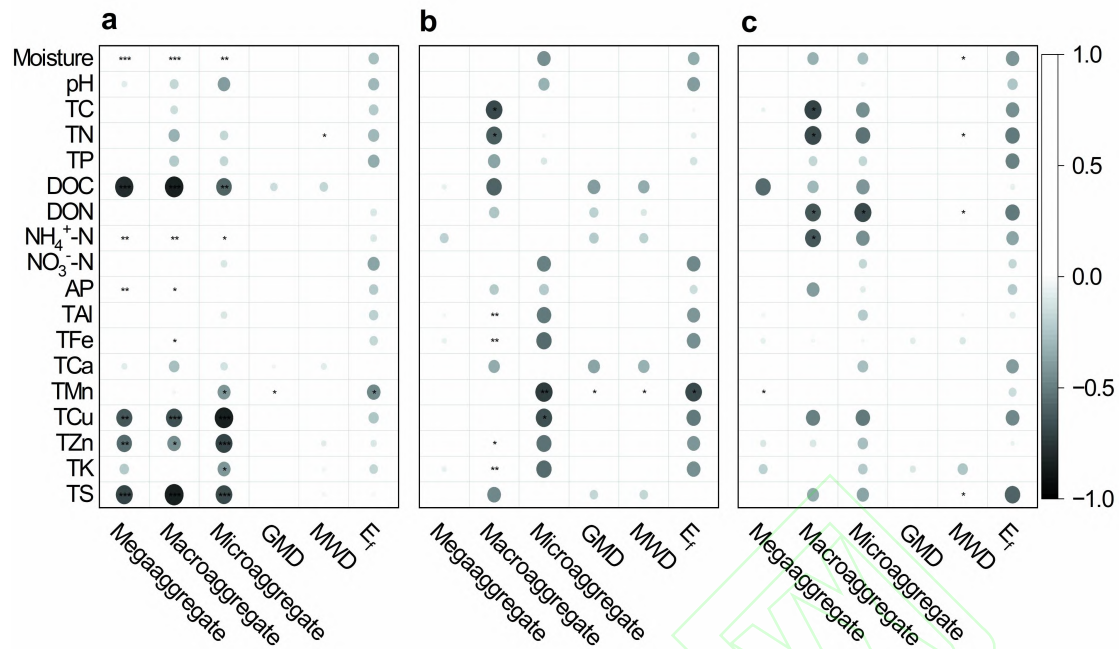


图 2 白蚁巢穴土壤团聚体矿质元素含量的动态变化

Fig. 2 The dynamic changes in mineral element contents of termite mound soils within different aggregate sizes



TC. 全碳; TN. 全氮; TP. 全磷; DOC. 可溶性有机碳; DON. 可溶性有机氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 硝态氮; AP. 有效磷; TAl. 全铝; TFe. 全铁; TCa. 全钙; TMn. 全锰; TCu. 全铜; TZn. 全锌; TK. 全钾; TS. 全硫; megaaggregate. >2 mm 大团聚体; macroaggregate. 2~0.25 mm 小团聚体; microaggregate. <0.25 mm 微团聚体; GMD. 几何平均直径; MWD. 平均重量直径; E_f . 可蚀性因子。

TC. Total carbon; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; DOC. Dissolved organic carbon; DON. Dissolved organic nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$. Nitrate nitrogen; AP. Available phosphorus; TAl. Total aluminum; TFe. Total iron; TCa. Total calcium; TMn. Total manganese; TCu. Total copper; TZn. Total zinc; TK. Total potassium; TS. Total sulphur; megaaggregate. >2 mm; macroaggregate. 2–0.25 mm; microaggregate. <0.25 mm; GMD. Geometric mean diameter; MWD. Mean weight diameter; E_f . Erodibility factor.

图3 整体 (a)、旱季 (b) 和雨季 (c) 白蚁巢穴土壤团聚体稳定性与理化特性的相关性

Fig. 3 Correlation between soil aggregate stability and physicochemical properties of termite mounds in the whole (a), dry season (b) and wet season (c)

3.2 白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体理化特性的调节作用

白蚁巢穴的“生物工程”效应对森林土壤理化特性具有显著调控作用 (Van Thuyne et al., 2021; Jouquet et al., 2022)。本研究发现, 巢穴旱雨季各粒径团聚体的持水能力均普遍降低, 这与其致密外壁与内部优先流通道密切相关 (Chen et al., 2019), 但 Grube 等 (1999) 却发现旱季巢穴可通过减少水分蒸发和增加有效水运输来提高含水量。此外, 旱季白蚁巢穴顶部和基部大团聚体均表现出显著的磷素流失, 这主要因为培菌白蚁筑巢偏好搬运深层的低有机质土壤 (缺少植物残体和根系等有机源的输入) (Chen et al., 2018); 同时其 pH 趋于中性化 (尤其是成熟巢穴) 则源于碱性阳离子 (K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 输入与草酸-碳酸盐转化过程的协调作用 (Cailleau et al., 2011; Mujinya et al., 2011)。本研究还发现, 雨季可溶性有机碳显著流失与铵态氮占优, 可能与此时淋溶作用增强, 加速了可溶性有机碳浸出 (Erens et al., 2015); 而土壤 $\text{pH} < 6.0$ 一定程度上缓解了硝化作用, 促使铵态氮增加 (Chen et al., 2019), 且橡胶林冠层截留雨量可能加剧此效应。与 Abe 等 (2011) 研究结果一致, 雨季巢穴基部各团聚体有效磷含量下降, 可能归因于有机质减少导致的磷吸附位点损失及 pH 升高促进的解吸作用增强 (Lin et al., 2024)。值得注意的是, 随着团聚体粒径的减小, 可溶性有机碳含

量递减,而有效磷含量递增,这与微团聚体孔隙结构改变导致的持水能力下降和活性磷固持增强有关(Liu et al., 2023)。

3.3 白蚁筑巢对橡胶林土壤团聚体矿质元素的富集效应

森林生态系统内白蚁巢穴土壤矿质元素的分布呈现明显的季节差异(Ackerman et al., 2007; Mills et al., 2018)。本研究发现,无论旱季还是雨季巢穴,矿质元素含量在各粒径团聚体间无显著差异,这主要归因于:(1)各粒径质量分数的变幅有限;(2)矿质元素自身迁移能力较低;(3)白蚁搬运行为促进矿质元素在团聚体间均质化分布(Van Thuyne et al., 2021; López-Hernández et al., 2023)。整体而言,巢穴顶部和基部土壤团聚体对全铝、全铁和全钾均有一定富集,这与先前研究结果一致(Ackerman et al., 2007; Sileshi et al., 2010; Erens et al., 2015),印证了白蚁巢穴作为“地球化学热点”的生态功能(Sarcinelli et al., 2009; Jouquet et al., 2023)。本研究还发现,各团聚体全铜、全锌和全硫含量旱季显著高于雨季,这可能与旱季淋溶流失减少有关(Chen et al., 2019)。此外,高的全硫含量与旱季喷施硫磺粉抑制白粉病直接相关,而其雨季低的水平则一定程度上降低了硫氧化导致的土壤酸化。

4 结论

橡胶林白蚁筑巢对土壤团聚体结构及其养分元素循环的影响受季节和取样位置的共同调控。与环境土壤相比,旱季巢穴顶部显著增加微团聚体($< 0.25\text{ mm}$)比例,而雨季巢穴顶部和基部则降低大团聚体($> 2\text{ mm}$)比例,并促进小团聚体($2\sim 0.25\text{ mm}$)形成;旱雨季巢穴团聚体稳定性均有所降低。同时,旱雨季巢穴顶部和基部会导致各粒径土壤团聚体持水量普遍下降,pH中性化、速效磷与全磷流失,但一定程度上富集全铝、全铁和全钾。此外,各粒径团聚体的可溶性有机碳、全铜、全锌和全硫含量显著高于雨季,铵态氮则呈相反趋势。这些动态变化揭示了白蚁作为森林“生态系统工程师”的核心功能及其生物工程效应。因此,建议后续研究建立基于白蚁筑巢行为的橡胶林土壤健康生物指示评价体系,为热带人工林土壤生态系统的可持续管理提供科学依据。

参考文献:

- ABE SS, WATANABE Y, ONISHI T, et al., 2011. Nutrient storage in termite (*Macrotermes bellicosus*) mounds and the implications for nutrient dynamics in a tropical savanna Ultisol [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(6): 786-795.
- ACKERMAN IL, TEIXEIRA WG, RIHA SJ, et al., 2007. The impact of mound-building termites on surface soil properties in a secondary forest of Central Amazonia [J]. *Applied Soil Ecology*, 37(3): 267-276.
- ASHEON LA, GRIFFITHS HM, PARR CL, et al., 2019. Termites mitigate the effects of drought in tropical rainforest [J]. *Science*, 363(6423): 174-177.
- BACH EM, HOFMOCKEL KS, 2014. Soil aggregate isolation method affects measures of intra-aggregate extracellular enzyme activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 54-62.
- CAILLEAU G, BRAISSANT O, VERRECCHIA EP, 2011. Turning sunlight into stone: the oxalate-carbonate pathway in a tropical tree ecosystem [J]. *Biogeosciences*, 8(7): 1755-1767.
- CHEN CF, LIU WJ, WU JE, et al., 2018. Spatio-temporal variations of carbon and nitrogen in biogenic structures of two fungus-growing termites (*M. annandalei* and *O. yunnanensis*) in the Xishuangbanna region [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 117: 125-134.

- CHEN CF, WU JE, ZHU XA, et al., 2019. Hydrological characteristics and functions of termite mounds in areas with clear dry and rainy seasons [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 277: 25-35.
- CHEN DB, RUAN GH, SONG XG, 2014. Research progress of China termite species [J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments, 20(2): 186–190. [程冬保, 阮冠华, 宋晓钢, 2014. 中国白蚁种类调查研究进展 [J]. 中华卫生杀虫药械, 20(2): 186–190.]
- CONTOUR-ANSEL D, GARNIER-SILLAM E, LACHAUX M, et al., 2000. High performance liquid chromatography studies on the polysaccharides in the walls of the mounds of two species of termite in Senegal, *Cubitermes oculatus* and *Macrotermes subhyalinus*: their origin and contribution to structural stability [J]. Biology and Fertility of Soils, 31: 508-516.
- DAVIES AB, BRODRICK PG, PARR CL, et al., 2020. Resistance of mound-building termites to anthropogenic land-use change [J]. Environmental Research Letters, 15(9): 094038.
- DENG JJ, FANG S, FANG XM, et al., 2023. Forest understory vegetation study: current status and future trends [J]. Forestry Research, 3: 6.
- ERENS H, MUJINYA BB, MEES F, et al., 2015. The origin and implications of variations in soil-related properties within *Macrotermes falciger* mounds [J]. Geoderma, 249-250: 40-50.
- FALL S, BRAUMAN A, CHOTTE JL, 2001. Comparative distribution of organic matter in particle and aggregate size fractions in the mounds of termites with different feeding habits in Senegal: *Cubitermes niokoloensis* and *Macrotermes bellicosus* [J]. Applied Soil Ecology, 17(2): 131-140.
- FALL S, NAZARET S, CHOTTE JL, et al., 2004. Bacterial density and community structure associated with aggregate size fractions of soil-feeding termite mounds [J]. Microbial Ecology, 48: 191-199.
- GARNIER-SILLAM E, HARRY M, 1995. Distribution of humic compounds in mounds of some soil-feeding termite species of tropical rainforests: its influence on soil structure stability [J]. Insectes Sociaux, 42: 167-185.
- GRUBE S, RUDOLPH D. 1999. Water supply during building activities in the subterranean termite *Reticulitermes santonensis* de Feytaud (Isoptera, Rhinotermitidae)[J]. Insectes Sociaux, 46: 192-193.
- HARIT A, MOGER H, DUPREY JL, et al., 2017. Termites can have greater influence on soil properties through the construction of soil sheetings than the production of above-ground mounds [J]. Insectes Sociaux, 64: 247-253.
- JIANG C, ZENG XL, JIN YQ, et al., 2024. Process and mechanism of termite impact on soil and plant [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 35(9): 2401–2412. [姜川, 曾小玲, 金艳强, 等, 2024. 白蚁对土壤与植物影响的过程及机制 [J]. 应用生态学报, 35(9): 2401–2412.]
- JOUQUET P, BOTTINELLI N, SHANBHAG RR, et al., 2016a. Termites: the neglected soil engineers of tropical soils [J]. Soil Science, 181(3/4): 157-165.
- JOUQUET P, CHAUDHARY E, KUMAR ARV, 2018. Sustainable use of termite activity in

- agro-ecosystems with reference to earthworms. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 3.
- JOUQUET P, CHINTAKUNTA S, BOTTINELLI N, et al., 2016b. The influence of fungus-growing termites on soil macro and micro-aggregates stability varies with soil type [J]. *Applied Soil Ecology*, 101: 117-123.
- JOUQUET P, GUILLEUX N, CANER L, et al., 2016c. Influence of soil pedological properties on termite mound stability [J]. *Geoderma*, 262: 45-51.
- JOUQUET P, HARIT A, BOTTINELLI N, et al., 2023. Termite bioturbation: Fungal versus non-fungal building strategies lead to different soil sheeting stability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 176: 108868.
- JOUQUET P, HARIT A, HERV'E V, et al., 2022. The impact of termites on soil sheeting properties is better explained by environmental factors than by their feeding and building strategies [J]. *Geoderma*, 412: 115706.
- JOUQUET P, RANJARD L, LEPAGE M, et al., 2005. Incidence of fungus-growing termites (Isoptera, Macrotermitinae) on the structure of soil microbial communities [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(10): 1852-1859.
- LI DC, LI ZP, ZHANG TL, et al., 2003. Interactions between termite activities and soil environments [J]. *Soil*, 35(2): 98-102. [李德成, 李忠佩, 张桃林, 等, 2003. 白蚁活动与土壤环境之间的相互作用 [J]. *土壤*, 35(2): 98-102.]
- LI ZQ, KE YL, BAN DX, et al., 2015. Termite biodiversity and its ecological indication to environmental change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(2): 557-561. [李志强, 柯云玲, 班大雄, 等, 2015. 白蚁生物多样性及其对生态环境变化的指示作用 [J]. *生态学杂志*, 34(2): 557-561.]
- LIN FM, JIANG C, ZENG XL, et al., 2024. Seasonal dynamics of understory vegetation diversity and biomass allocation across different tropical land use types [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 44(20): 9379-9390. [林方美, 姜川, 曾小玲, 等, 2024. 热带不同土地利用方式林下植被多样性和生物量分配特征及其季节动态 [J]. *生态学报*, 44(20): 9379-9390.]
- LIN FM, JIN YQ, LIU CG, et al., 2024. Termite mounds affect soil aggregate stability and aggregate-associated phosphorus forms in a tropical rubber plantation [J]. *Plant and Soil*, 498(1): 93-109.
- LIN XB, LIU SJ, XIAO HF, 2017. Effects of rubber plantation on structure and diversity of termite community [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 36(10): 2847-2854. [林小兵, 刘胜杰, 肖海峰, 等, 2017. 橡胶林种植对白蚁群落结构和多样性的影响 [J]. *生态学杂志*, 36(10): 2847-2854.]
- LIU CG, JIN YQ, LIN FM, et al., 2023. Land use change alters carbon and nitrogen dynamics mediated by fungal functional guilds within soil aggregates [J]. *Science of the Total Environment*, 902: 166080.
- LIU CG, JIN YQ, HU YN, et al., 2019. Drivers of soil bacterial community structure and diversity

- in tropical agroforestry systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 278: 24-34.
- LIU SJ, XIA SW, WU DH, et al., 2022. Understanding global and regional patterns of termite diversity and regional functional traits [J]. *iScience*, 25(12): 105538.
- LOPEZ-HERNANDEZ D, 2023. Termite mound as nutrient hot-spots in savannah with emphasis in P cycling and the potential use of mounds as soil amendment [J]. *Pedobiologia*, 99-100: 150888.
- MILLS AJ, SIRAMI C, 2018. Nutrient enrichment of ecosystems by fungus-growing versus non-fungus-growing termites [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 34(6): 385-389.
- MUJINYA BB, MEES F, BOECKX P, et al., 2011. The origin of carbonates in termite mounds of the Lubumbashi area, D.R. Congo [J]. *Geoderma*, 165: 95-105.
- RUCKAMP D, MARTIUS C, BORNEMANN L, et al., 2012. Soil genesis and heterogeneity of phosphorus forms and carbon below mounds inhabited by primary and secondary termites [J]. *Geoderma*, 170: 239-250.
- SARCINELLI TS, SCHAEFER CEGR, LYNCH LDES, et al., 2009. Chemical, physical and micromorphological properties of termite mounds and adjacent soils along a toposequence in Zona da Mata, Minas Gerais State, Brazil [J]. *Catena*, 76(2): 107-113.
- SILESHI GW, ARSHAD MA, KONATE S, et al., 2010. Termite-induced heterogeneity in African savanna vegetation: mechanisms and patterns [J]. *Journal of Vegetation Science*, 21(5): 923-937.
- THANT M, NAKAMURA A, ASHTON LA, et al., 2025. Assessing the impacts of forest conversion and seasonal dynamics on soil nutrient heterogeneity associated with termite mounds [J]. *Forest Ecology and Management*, 589: 122768.
- TUMA J, FROUZ J, VESELA H, et al., 2022. The impacts of tropical mound-building social insects on soil properties vary between taxa and with anthropogenic habitat change [J]. *Applied Soil Ecology*, 179: 104576.
- VAN THUYNE J, VERRECCHIA EP, 2021. Impacts of fungus-growing termites on surficial geology parameters: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 223: 103862.
- WU DH, DU EZ, EISENHAUER N, et al., 2025. Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions [J]. *Nature*, 640: 120-129.
- ZENG XL, JIANG C, HUANG FZ, et al., 2024. Stability and erodibility of aggregate affected by typical tree-herb ecosystems in karst area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 55(6): 1565-1573. [曾小玲, 姜川, 黄甫昭, 等, 2024. 喀斯特区林药复合生态系统对土壤团聚体稳定性与可蚀性的影响 [J]. *土壤通报*, 55(6): 1565-1573.]