北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响

刘攀 陆梅 吕晶花 杨志东 赵定蓉 孙官发 闪阳 李聪 赵旭燕 陈志明

Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China

Liu Pan, Lu Mei, L ü Jinghua, Yang Zhidong, Zhao Dingrong, Sun Guanfa, Shan Shengyang, Li Cong, Zhao Xuyan, Chen Zhiming

引用本文:
刘攀, 陆梅, 吕晶花, 杨志东, 赵定蓉, 孙官发, 闪阳, 李聪, 赵旭燕, 陈志明. 蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):114–125. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220507
Liu Pan, Lu Mei, L ü Jinghua, Yang Zhidong, Zhao Dingrong, Sun Guanfa, Shan Shengyang, Li Cong, Zhao Xuyan, Chen Zhiming. Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):114–125. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220507

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220507

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响
Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China
北京林业大学学报, 2019, 41(12): 108–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190179

园林绿化废弃物堆肥对土壤有机碳组分影响
Effects of green waste compost on soil organic carbon fractions
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 120–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210035

岩溶区不同恢复方式下土壤有机碳组分及酶活性研究
Soil organic carbon fraction and enzyme activities under different restoration methods in karst area
北京林业大学学报, 2019, 41(2): 1–11. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180184

过筛处理对小兴安岭2种森林类型土壤有机碳矿化的影响
Effects of sieving process on soil organic carbon mineralization for two forest types in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China
北京林业大学学报, 2017, 39(2): 30–39. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160100

江西九连山不同海拔梯度土壤有机碳的变异规律
Variations in soil organic carbon along an altitudinal gradient of Jiulian Mountain in Jiangxi Province of eastern China
北京林业大学学报, 2019, 41(2): 19–28. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180383

陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素
Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in different vegetation types in loess region of northern Shaanxi Province, northwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(11): 56–63. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200013

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220507

蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响

刘 攀[1] 陆 梅[1] 吕晶花[1] 杨志东[1] 赵定蓉[1] 孙官发[1] 闪昇阳[1]
李 聪[2] 赵旭燕[3] 陈志明[3]

（1. 西南林业大学水土保持学院，云南 昆明 650224；2. 中国林业科学研究院高原林业研究所，云南 昆明 650224；
3. 纳帕海省级自然保护区管护局，云南 迪庆藏族自治州 674400）

摘要:【目的】揭示纳帕海面山森林蚁巢与非蚁巢土壤总有机碳储量及活性有机碳组分的分配特征，为阐明蚂蚁活动对森林土壤有机碳沉积影响的过程及机制提供关键数据支撑。**【方法】**以纳帕海面山云杉−冷杉森林群落为研究对象，比较蚁巢和非蚁巢 2 种处理土壤总有机碳储量、活性碳组分（微生物生物量碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳）及其碳分配（微生物生物量碳/总有机碳、易氧化有机碳/总有机碳、颗粒有机碳/总有机碳、可溶性有机碳/总有机碳）的差异，并分析蚂蚁筑巢活动引起土壤理化环境改变对总有机碳储量及活性有机碳组分分配的影响。**【结果】**蚂蚁筑巢显著影响土壤有机碳积累及活性碳组分分配（$P < 0.05$）。其中，蚁巢土壤有机碳储量是非蚁巢的 5.7 倍；蚁巢土壤总有机碳、微生物生物量碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳含量分别提高了 3.8、2.7、4.0、3.5 倍；蚁巢土壤易氧化有机碳/总有机碳均值大小比蚁巢高出 1.50%，而非蚁巢土壤微生物生物量碳/总有机碳、颗粒有机碳/总有机碳、可溶性有机碳/总有机碳均值分别比蚁巢高 0.43%、3.30%、3.21%；不同处理和土层仅对土壤总有机碳、微生物生物量碳、颗粒有机碳和可溶性有机碳含量存在明显的交互作用（$P < 0.05$）；回归分析结果表明土壤微生物生物量碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳分别解释了 96.45%、96.35%、95.13%、94.27% 的总有机碳变化；主成分分析表明土壤密度、全氮和速效磷是总有机碳储量的主控因子，而速效氮、速效磷、土壤密度等是活性碳组分积累的主要驱动因子；全钾、含水量分别是颗粒性有机碳与可溶性有机碳分配的主要影响因子。**【结论】**蚂蚁筑巢主要通过改变土壤紧实度、氮磷养分条件等环境因子，进而调控纳帕海面山森林土壤总有机碳储量与活性有机碳组分的分配，研究结果有助于理解高原湿地面山土壤碳积累过程的土壤动物学调控机制。

关键词：蚂蚁筑巢；土壤有机碳储量；土壤有机碳组分及分配；纳帕海面山森林

中图分类号：S714.5；Q968.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)05−0114−12

引文格式：刘攀，陆梅，吕晶花，等. 蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：114−125. Liu Pan, Lu Mei, Lü Jinghua, et al. Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 114−125.

Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China

Liu Pan[1] Lu Mei[1] Lü Jinghua[1] Yang Zhidong[1] Zhao Dingrong[1] Sun Guanfa[1] Shan Shengyang[1]
Li Cong[2] Zhao Xuyan[3] Chen Zhiming[3]

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Institute of Highland Forest Science, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;
3. Napahai Nature Reserve Management and Protection Bureau, Diqing 674400, Yunnan, China)

收稿日期: 2022−12−14 **修回日期:** 2023−01−09

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目（42067011），云南省应用基础研究面上项目（202001AT070113，2013FB053），云南省中青年学术技术带头人后备人才（202205AC160047），西南林业大学博士启动基金项目（111901）。

第一作者: 刘攀。主要研究方向：土壤生态学。Email：905745005@qq.com 地址：650224 云南省昆明市盘龙区青云街道 300 号西南林业大学。

责任作者: 陆梅，教授，博士生导师。主要研究方向：湿地生态、土壤生态学。Email：lumeizx@126.com 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] This study aimed to compare the storage of total organic carbon and the distribution of active organic carbon in ant nests and reference soils and to provide the key data support for expounding the impact of ant colonization on processes and mechanisms of carbon sequestration in forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Provinve of southwestern China. [**Method**] We compared total organic carbon storage, active organic carbon components (i.e., total, microbial, easily oxidized, particulate, and dissolved organic carbon (total organic carbon, microbial biomass carbon, easily oxidized carbon, particulate organic carbon, and dissolved organic carbon), and their distributions (MBC/TOC, EOC/TOC, POC/TOC, DOC/TOC) in ant nests and the reference soils in the spruce-fir community of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands. We also explored the ant-induced changes in soil physicochemical properties on organic carbon storage and active organic component distribution. [**Result**] Ant colonization significantly affected SOC accumulation and carbon distribution ($P < 0.05$). Soil organic carbon storage was 5.7 times higher in ant nests than in reference soil; the concentrations of TOC, MBC, EOC, and POC in ant nests increased by 3.8, 2.7, 4.0, and 3.5 times, respectively. The average ratios of MBC/TOC, POC/TOC, and DOC/TOC in reference soils were 0.43%, 3.30% and 3.21% higher than that in the reference soils. In contrast, the ratio of EOC/TOC in ant nests was 1.50% higher than that in reference soil. The soil layer and treatment had interactive effects on concentrations of TOC, MBC, POC, and DOC ($P < 0.05$), while there was no significant interaction on EOC. The regression analysis showed that MBC, POC, DOC and EOC can explain 96.45%, 96.35%, 95.13% and 94.27% of the changes in total organic carbon. Principal component analysis showed that soil density, total nitrogen and available phosphorus were the main controlling factors of SOC storage, while available nitrogen and phosphorus, soil density were the main driving factors of active carbon accumulation, and total kalium was the main influencing factor for the distribution of particulate organic carbon and dissolved organic carbon. [**Conclusion**] Ant nesting mainly regulates the total organic carbon storage and distribution of active organic carbon components in the forest soil of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands by changing environmental factors such as soil compaction and nitrogen and phosphorus nutrient conditions. These results would contribute to the understanding of fauna regulatory mechanisms for soil carbon sequestration in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands.

Key words: ant colonization; soil organic carbon storage; soil organic carbon components and distribution; forests of neighbouring mountains in the Napahai

土壤有机碳(soil organic carbon，SOC)作为碳库中重要的组分，其形成与分配的微小变化可能导致大气 CO_2 浓度的显著变化，在调节植物多样性、土壤肥力和减缓全球温室效应等方面发挥着极其重要的生态作用[1]。土壤有机碳库根据不同的周转时间和稳定性，划分为活性、慢性和惰性碳库[2]。其中，土壤活性有机碳对环境因子的变化最敏感，也最能反映碳库稳定性，通常可用微生物生物量碳(microbial biomass carbon，MBC)、易氧化有机碳(easily oxidized carbon，EOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon，POC)和可溶性有机碳(dissolved organic carbon，DOC)等指标表征[3]。与土壤总有机碳相比，活性有机碳更能及时反映土壤碳库稳定性，对了解区域土壤碳动态和全球气候变化具有重要意义[4]。

土壤生物(微生物和无脊椎动物)决定了土壤碳库稳定性，一方面，土壤微生物参与有机物的分解和养分矿化，另一方面，土壤动物活动改变了土壤微生物的微环境，以及土壤孔隙、团聚体大小和稳定性，从而影响了有机碳的分解。前人研究表明，大型土壤动物通过改变土壤团聚结构，影响土壤中空气和水分的扩散以及土壤微生物对有机碳的分解，从而对土壤有机碳库的稳定性产生重要影响[5−7]。蚂蚁作为重要的土壤无脊椎动物，因其能影响土壤微生物多样性及理化环境，也被称为“生态系统工程师”[8]。蚂蚁筑巢和取食活动将有机物搬入巢中，不仅能直接促进有机碳在巢中的积累与分配[9−10]，而且也能间接影响土壤有机碳的空间分布[11]。同时，蚂蚁筑巢通过改变土壤密度、含水量、氮(nitrogen，N)含量、磷(phosphorus，P)含量等理化性质，间接影响了土壤碳的转化过程[12]。蚂蚁在生态系统的碳流动与碳分配发挥着重要作用[8,13]，但是目前关于蚂蚁的研究主要集中于种类鉴定、分布格局和多样性，有关其对土壤有机碳组分形成与分配的影响研究却鲜有报道。

纳帕海高原湿地流域孕育着丰富的生物多样性，并具有显著的碳汇潜力[14]。流域内植被丰富，充

足的食物来源和较好的光热水资源为蚂蚁等土壤动物的生存及活动提供了良好的条件。据估计，我国约有 600 多种蚂蚁，其中青藏高原和滇西北高原蚂蚁种类就超过了 250 种[15−18]。高原湿地面山复杂的蚂蚁物种和筑巢活动，可能影响森林土壤的物理和化学性质，进而能够调控土壤有机碳组分积累与分配的过程。然而，目前关于高原湿地面山蚂蚁活动如何影响土壤生态学过程的认识非常模糊，特别是有关蚂蚁筑巢对土壤碳储量和碳库分配的影响研究十分缺乏。因此，本研究选取纳帕海森林土壤为研究对象，比较蚁巢和非蚁巢地土壤有机碳组分及其分配特征，并分析蚂蚁筑巢引起土壤理化性质的改变对土壤碳组分及分配的影响，不仅有助于阐明高原森林土壤碳组分形成与分配的土壤动物学调控机制，而且也为理解高原森林土壤碳循环过程提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省香格里拉市纳帕海湿地（27°49′ ~ 27°55′N，99°37′ ~ 99°41′E），海拔 3 260 m，是在石灰岩上发育而成的喀斯特型季节性湿地[19]。该区水量补给主要依靠降水和冰雪融水，年均降水量 619.9 mm[20]。由于地处云南偏北部且海拔较高，年均气温为 5.4 ℃。湿地四周群山环绕，受高原季风气候的影响，纳帕海流域内广泛分布着常绿硬叶阔叶林和灌丛[21]。因此，本研究在纳帕海高原湿地流域内，尽量选择人为干扰较少，且植物群落大致相似的地点作为研究样地。样地海拔在 3 340 ~ 3 370 m 之间，林区土壤主要为棕黄壤[22]。样地主要树种包括冷杉（*Abies fabri*）、云杉（*Picea asperata*）等。

1.2 实验设计

于 2021 年 7 月，在纳帕海面山云杉−冷杉森林随机选取 3 个样带（间隔大于 100 m），最大高差近 30 m，在样带内随机布设 3 个采样方（50 m × 50 m），每个样方内选择具有明显蚁丘的巢穴，采用徐正会等[23]制定的方法采集蚂蚁并制成标本，送至专门机构进行蚂蚁物种类型鉴定，鉴定结果为满洲凹头蚁（*Formica manchu*）。

1.3 土壤取样

在上述每个样方内各选取 3 个同种蚂蚁类型的蚁巢，同时在距离每个蚁巢 5 m 外设置非蚁巢样方，各 27 个。该种蚂蚁巢穴均有明显的地上筑巢现象，蚁丘半径为 30 ~ 40 cm，高 8 ~ 10 cm，蚁巢按照地上蚁丘及地下巢 0 ~ 20 cm 、20 ~ 40 cm 分层采集，非蚁巢土壤按照 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 分层采集（详见图 1）。为降低枯落物和植物根系对地上蚁丘和非蚁巢的影响，在采取土样之前，小心除去蚁丘和非蚁巢表层枯枝落叶，同时使用 1 mm 孔筛筛除植物根系。将同层土壤混合，用四分法取约 1 kg 混合土样装入无菌自封袋中，贴好标签密封，放置于冰盒内带回实验室，进行相关指标分析；使用环刀采集各层土壤原状土，测定土壤密度，同时，使用便携式土壤温湿度测试仪（顺科达 SIN-TN8）对各土层土壤温度进行测定。将采集后的新鲜土样做如下处理：约 100 g 土样用于测定土壤水分；约 400 g 土样放入−80 ℃冰箱冷藏保存，于 1 周内完成土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳测定；约 500 g 土样晾在室内通风处自然风干 15 d 后，磨细并分别通过 1 mm 和 0.25 mm 孔筛，用于土壤总有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、pH 值、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾的测定。

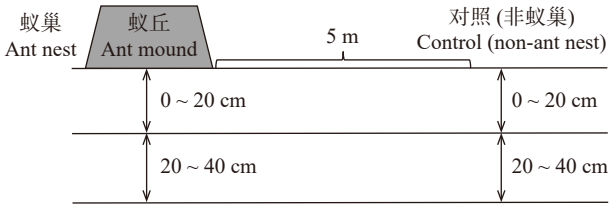


图 1 蚁巢和对照（非蚁巢）土壤采集示意图

Fig. 1 Soil collection diagram of ant nests and control (non-ant nest)

1.4 指标测定

土壤总有机碳（total organic carbon，TOC）采用外加热重铬酸钾氧化法；MBC 采用硫酸钾−氯仿熏蒸法；EOC 采用高锰酸钾氧化法；POC 采用六偏磷酸钠分散法；DOC 采用振荡离心−外加热重铬酸钾氧化法。每个土样测定 3 个平行，取其平均值。

土壤有机碳储量由土层深度、土壤密度和土壤有机碳质量分数决定，计算公式参照 Ellert 等[24]。

$$M_{SOC} = \sum_{i=1}^{n} (0.1 d_{BDi} M_{SOCi} D_i)$$

式中：M_{SOC} 为土壤有机碳储量（t/hm^2）；d_{BDi}为第 i 层土壤密度（g/cm^3）；M_{SOCi}为第 i 层土壤有机碳质量分数（g/kg）；D_i 为第 i 土层厚度（cm）。

土壤理化指标测定参照鲁如坤《土壤农业化学分析方法》[25]。巢穴与非巢穴温度采用便携式土壤水分/温度测量仪（SIN-TN8）测定；pH 值采用电位法测定；土壤密度（soil density，SD）采用环刀法测定；含水量（soil water content，SWC）采用烘干称量法测定；全氮（total nitrogen，TN）采用凯氏法消煮−全自动定氮仪测定；全磷（total phosphorus，TP）采用碱熔钼锑抗比色法测定；全钾（total kalium，TK）采用氢氧化钠熔融−火焰光度计法测定；速效氮采用碱解扩散

吸收法测定；速效磷采用盐酸–氟化铵浸提法（Bray-I）测定；速效钾采用中性乙酸铵浸提–火焰光度计法测定。每个土样测定 3 个平行，取其平均值。

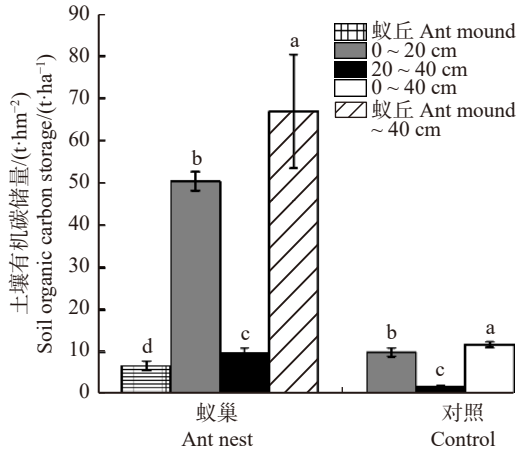
1.5　数据处理

采用双因素方差分析法（Two-way ANOVA）比较蚁巢和非蚁巢、不同土层土壤总有机碳、微生物生物量碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳含量的差异性；使用回归分析分析土壤总有机碳与碳组分的相互关系；通过计算 Pearson 相关系数（$\alpha < 0.05$）检验总有机碳和各有机碳组分与土壤理化指标的相关性；使用主成分分析（principal component analysis，PCA）分析土壤理化性质对土壤总有机碳及其碳组分的影响。所有实验数据使用 Excel 整理，利用 Origin 2019 完成柱状图绘制和回归分析，双因素方差分析和 Pearson 相关系数的计算在 SPSS 23.0 中进行，PCA 在 Canoco 5.0 中完成。

2　结果与分析

2.1　蚁巢和非蚁巢土壤总有机碳储量

土壤总有机碳储量在蚁巢（蚁丘和 0 ~ 40 cm 土层）和非蚁巢（0 ~ 40 cm 土层）中差异显著（图 2，$P < 0.05$），蚁巢土壤碳储量（66.93 t/hm^2）（以 C 计，下同）是非蚁巢（11.83 t/hm^2）的 5.7 倍。蚁巢土壤碳储量的垂直分布呈“单峰型”变化趋势，即在 0 ~ 20 cm 土层最大，该土层碳储量均值占总储量的 75.35%；非蚁巢土壤碳储量的垂直分布均为随着土层加深而显著下降（$P < 0.05$），且非蚁巢垂直变幅大于蚁巢，上层到下层分别减小 5.2 和 5.4 倍。



不同字母表示同一样地不同土层间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different letters mean significant differences between varied soil layers in the same site ($P < 0.05$). The same below.

图 2　蚁巢和对照土壤有机碳储量垂直变化

Fig. 2　Vertical variations in soil carbon storage of ant nests and control

2.2　蚁巢和非蚁巢土壤活性有机碳组分

分析显示（图 3）：蚁巢土壤（蚁丘和 0 ~ 40 cm 土层）TOC 含量（81.53 g/kg）显著高于非蚁巢（21.37 g/kg）（$P < 0.01$），蚁巢土壤 TOC 含量是非蚁巢土壤的 3.8 倍。蚁巢和非蚁巢土壤 TOC 含量在不同土层差异显著（$P < 0.05$），也呈“单峰型”变化趋势。蚁巢（45.91 g/kg）和非蚁巢（13.23 g/kg）土壤的 TOC 含量均在 0 ~ 20 cm 处达到峰值，20 ~ 40 cm 处达最小值。不同土层间，0 ~ 20 cm 蚁巢土壤 TOC 含量是非蚁巢的 3.5 倍，20 ~ 40 cm 是非蚁巢的 1.9 倍，表明

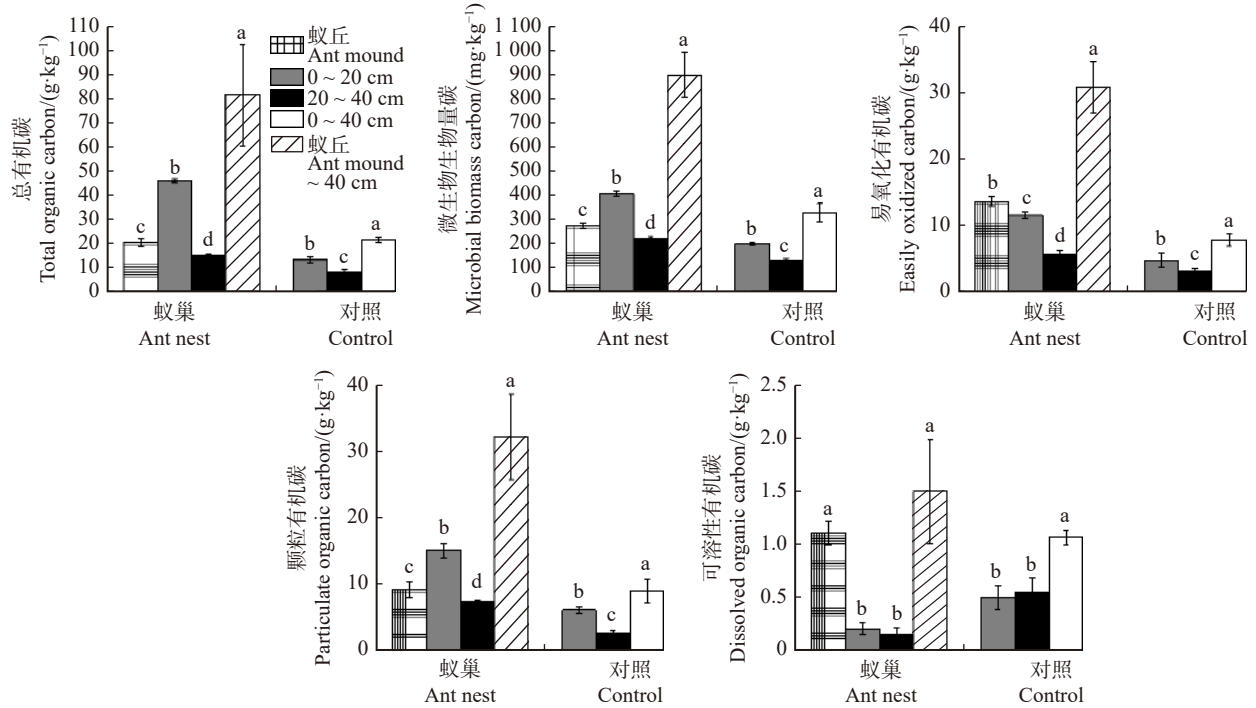


图 3　蚁巢和对照土壤总有机碳及碳组分含量

Fig. 3　Concentrations of total organic carbon and carbon components in ant nests and control

蚂蚁筑巢能显著提高土壤 TOC 含量。

图 3 表明，蚂蚁筑巢使纳帕海流域森林土壤活性有机碳组分含量差异显著（$P < 0.01$）。与非蚁巢相比，蚁巢土壤 MBC、EOC、POC 含量（897.82 mg/kg、30.83 g/kg、32.19 g/kg）显著高于非蚁巢（326.93 mg/kg、7.76 g/kg、9.15 g/kg）（$P < 0.05$），DOC 含量差异不显著。蚁巢活性有机碳组分含量同样呈明显的“单峰型”变化趋势，土壤 MBC、POC 含量在 0 ~ 20 cm 土层显著高于蚁丘和 20 ~ 40 cm 土层（$P < 0.01$），土壤 EOC、DOC 和非蚁巢土壤活性有机碳组分在地上蚁丘含量最高。整体而言，蚂蚁筑巢使得土壤 MBC、EOC、POC 量分别提高了 2.7、4.0、3.5 倍，表明蚂蚁筑巢能显著提高土壤活性有机碳组分含量。双因素方差分析表明（表 1），蚂蚁筑巢与否、土层均对土壤总有机碳及其活性有机碳组分有极显著影响（$P < 0.05$）。除土壤 EOC 外，不同处理和土层两者之间对土壤 TOC、MBC、POC、DOC 存在明显的交互影响（$P < 0.05$）。

垂直方向上，蚁巢土壤 TOC、MBC、POC 的含量变化规律表现为 0 ~ 20 cm > 蚁丘 > 20 ~ 40 cm 土层，其含量从 0 ~ 20 cm 到 20 ~ 40 cm 分别平均减小了 3.1、1.9、2.1 倍。随着土层加深，蚁巢土壤 EOC、DOC 含量呈递减的趋势，且差异显著（$P < 0.05$），上层较下层平均降幅分别为 2.1、1.3 倍。另外，除土壤 DOC 外，其余非蚁巢土壤活性有机碳组分含量表现为随着土层加深而递减，非蚁巢表层土壤 TOC、MBC、EOC、POC 平均含量分别是深层的 1.6、1.6、1.6、2.2 倍。

2.3 蚁巢和非蚁巢土壤有机碳分配比例特征

比较蚁巢和非蚁巢土壤活性有机碳分配比例发现，2 种土壤类型活性有机碳组分占比从大到小依次是：土壤 POC、EOC、DOC、MBC（图 4）。土壤 MBC、EOC、POC、DOC 占总有机碳的比例变化规律不一致。其中，土壤 MBC、EOC、POC、DOC 占 TOC 比例范围在 0.88% ~ 1.54%、35.79% ~ 66.35%、33.16% ~ 50.22%、0.48% ~ 6.87% 之间，MBC、DOC、POC 占 TOC 比例分别表现为非蚁巢（1.53%、5.02%、42.80%）> 蚁巢（1.10%、1.84%、39.48%）；土壤 EOC 占 TOC 表现为蚁巢（37.81%）> 非蚁巢（36.30%）。蚁巢土壤中，土壤 DOC 占 TOC 比例在各土层差异显著（$P < 0.05$），非蚁巢土壤 POC、DOC 占 TOC 比例在不同土层间存在显著差异（$P < 0.05$）。因此，蚁巢土壤有机碳在各土层分配比例变化规律不一致，非蚁巢土壤在各土层分配比例也没有一致的变化规律，这也说明了目前纳帕海流域面山森林土壤碳库正处于积累阶段。

2.4 土壤总有机碳与碳组分的相互关系

利用曲线估算对土壤 TOC 与活性有机碳组分进行回归分析，选择拟合度最好的多项式进行描述，探明何种碳组分对总有机碳含量存在显著影响。结果表明，土壤活性有机碳组分均对土壤 TOC 含量产生显著影响，土壤 MBC、EOC、POC、DOC 随土壤 TOC 含量增加呈递增趋势（图 5）。同时，4 种土壤有机碳组分对土壤总有机碳含量的贡献率不同，表现为土壤微生物生物量碳（96.45%）> 颗粒有机碳（96.35%）> 可溶性有机碳（95.13%）> 易氧化有机碳（94.27%）。

2.5 蚁巢和非蚁巢土壤活性有机碳组分与环境因子之间的关系

由表 2 可知，蚁巢和非蚁巢土壤理化性质存在显著差异（$P < 0.05$）。蚁巢和非蚁巢土壤温度、pH 值差异显著（$P < 0.05$），具体表现为蚁巢（18.47 ℃，6.57）> 非蚁巢（15.30 ℃，6.20），但土壤 pH 值不同土层间未达到显著差异（$P > 0.05$）；蚁巢土壤含水量在 0 ~ 20 cm 出现最小值（18.33 g/kg），但非蚁巢土壤含水量在 0 ~ 20 cm 出现最大值（26.12 g/kg），且随着土层加深呈显著减小趋势；两种土壤类型的密度均随着土层加深显著增大。含水量和密度整体表现为非蚁巢（23.68 g/kg，1.32 g/cm^3）> 蚁巢（21.57 g/kg，0.67 g/cm^3）土壤养分方面，土壤全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾整体表现为蚁巢（1.56 g/kg，4.87 g/kg，453.72 mg/kg，132.75 mg/kg，574.61 mg/kg）>

表 1 不同处理（蚁巢与对照）、土层及其交互作用对土壤有机碳组分影响的方差分析

Tab. 1 ANOVA analyses on the effects of treatment (ant nests and control), soil layer and their interactions on soil carbon components

项目 Item	df	TOC		MBC		EOC		POC		DOC	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
处理 Treatment	1	29.04	< 0.001	46.76	< 0.001	41.53	< 0.001	39.11	< 0.001	0.086	0.773
土层 Soil layer	1	10.26	< 0.001	13.38	< 0.001	6.43	0.008	12.78	< 0.001	15.99	< 0.001
处理 × 土层 Treatment × soil layer	2	8.45	0.003	11.77	0.001	1.60	0.230	5.73	0.012	4.88	0.020

注：TOC. 总有机碳；MBC. 微生物生物量碳；EOC. 易氧化有机碳；POC. 颗粒有机碳；DOC. 可溶性有机碳。下同。Notes: TOC, total organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; EOC, easily oxidized carbon; POC, particulate organic carbon; DOC, dissolved organic carbon. The same below.

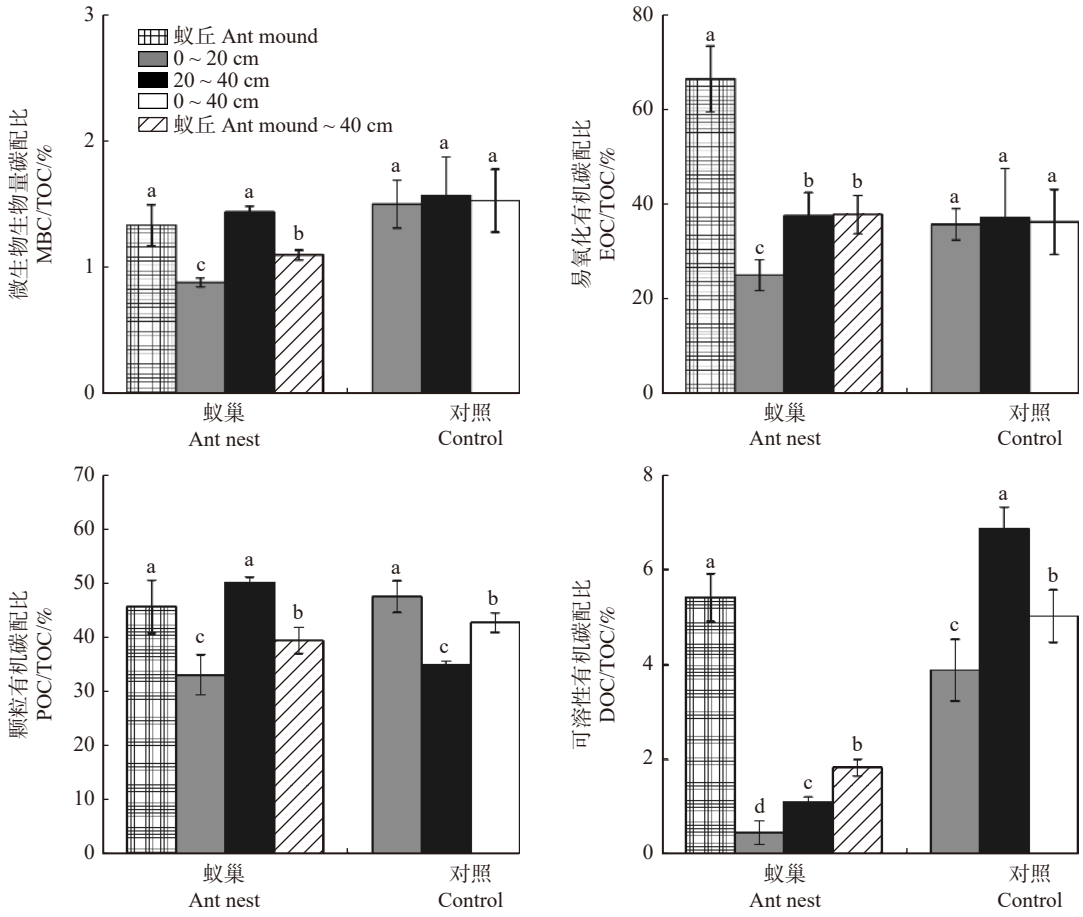


图 4　蚁巢和对照土壤活性有机碳组分占总有机碳比例

Fig. 4　Percentage of different active organic carbon components of TOC in ant nests and control

非蚁巢（1.18 g/kg，2.22 g/kg，109.55 mg/kg，11.31 mg/kg，185.16 mg/kg），全钾表现为非蚁巢（13.55 g/kg）> 蚁巢（12.95 g/kg）。蚁巢土壤全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾含量在 0 ~ 20 cm 土层最高（7.36 g/kg、16.00 g/kg、657.47 mg/kg、267.92 mg/kg、836.40 mg/kg），且与各土层存在显著差异（$P < 0.05$）；蚁巢土壤全氮含量最大值（2.40 g/kg）出现在蚁丘，与各土层的差异同样显著；非蚁巢土壤养分含量变化趋势基本一致，相应含量均随着土层加深显著减小。

通过计算 Pearson 相关系数分析蚁巢和非蚁巢土壤碳储量、TOC、MBC、EOC、POC、DOC 和环境因子的相关性（表 3）。结果表明：蚁巢土壤碳储量与全氮和速效磷呈显著正相关（$P < 0.05$），蚁巢土壤 TOC、MBC、EOC、DOC 与土壤温度、pH、全氮和速效钾呈显著正相关，与密度呈显著负相关（$P < 0.05$）。蚁巢土壤 EOC 与含水量呈显著负相关，与速效氮呈显著正相关（$P < 0.05$）。非蚁巢土壤碳储量、TOC、MBC、EOC、POC、DOC 与全氮、速效氮均呈显著正相关，与土壤密度呈显著负相关（$P < 0.05$），土壤含水量和速效钾对非蚁巢土壤 MBC、DOC 也有正向影响，土壤 pH 和全磷对非蚁巢土壤碳储量和活性有机碳组分的形成没有相关性。

为进一步确定影响因子，采用 PCA 主成分分析土壤理化性质和碳组分及其分配比例的相互关系（图 6）。蚁巢和非蚁巢提取的主成分分别累积解释了 89.54% 和 76.21% 的数据变异。蚁巢土壤中，土壤全氮、速效磷与碳储量、TOC、POC、DOC 位于同一象限，与土壤密度方向相反且夹角最大，表明土壤密度、全氮和速效磷是调控蚁巢土壤总有机碳储量主控因子；同时，土壤 MBC、EOC 与速效氮的夹角最小，土壤 POC、DOC 与速效磷的夹角最小，与土壤密度的夹角最大，表明土壤速效氮、速效磷、密度是影响蚁巢土壤活性有机碳组分的主要驱动因子。非蚁巢土壤中，土壤总有机碳碳储量、TOC、MBC、EOC、POC、DOC 与全氮和速效氮的夹角最小，与密度的夹角最大，可认为非蚁巢土壤密度、全氮、速效氮是调控纳帕海森林土壤碳含量的主要驱动因子。从夹角大小来看，土壤温度和含水量也促进了非蚁巢土壤总有机碳储量和活性有机碳组分的积累。因此，非蚁巢土壤温度、密度、含水量、全氮、速效氮等指标综合调控了纳帕海森林土壤总有机碳储量和活性有机碳含量，土壤 MBC、EOC、POC、DOC 也可作为高原森林土壤活性有机碳含量变化的敏感性指标。

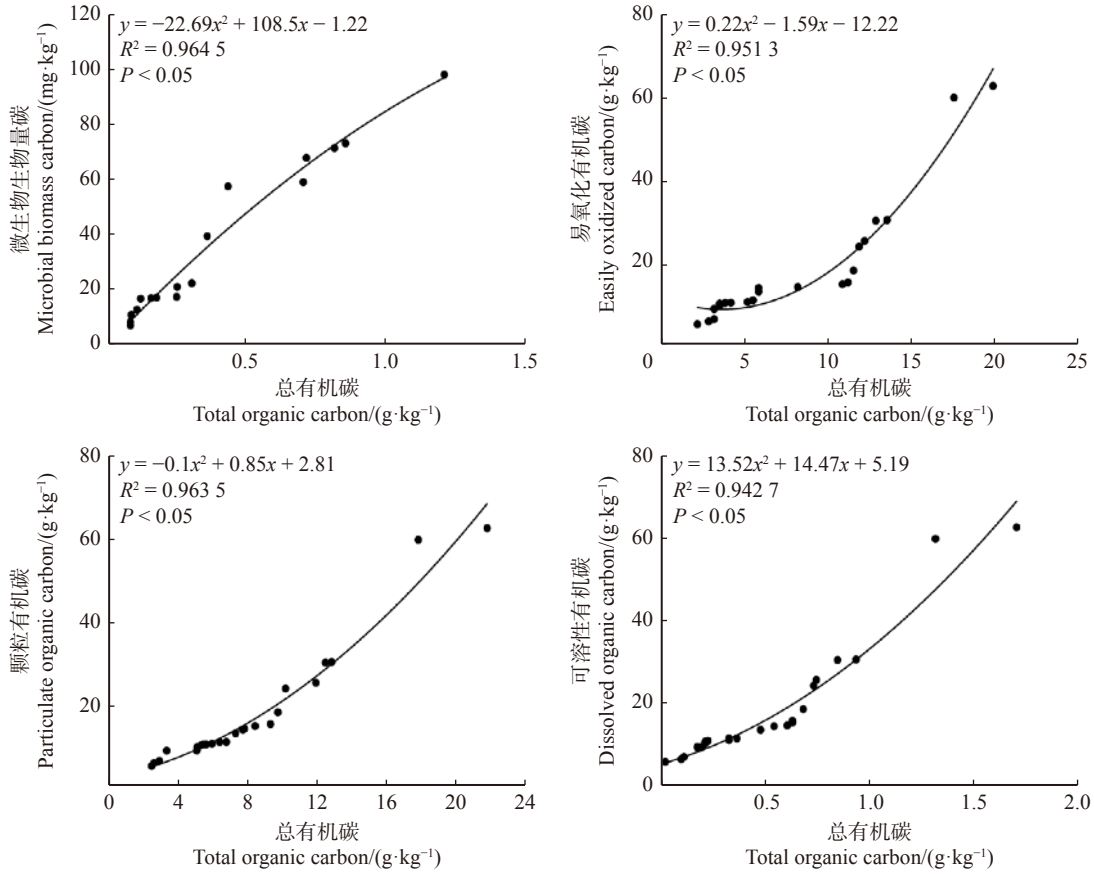


图 5 土壤总有机碳与活性有机碳组分相互关系

Fig. 5 Relationship between total soil organic carbon and active organic carbon components

表 2 供试土壤基本理化性质

Tab. 2 Basic physicochemical characteristics of the sample soil

指标 Index	蚁巢 Ant nest				对照 Control		
	蚁丘 Ant mound	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	蚁丘 Ant ~ 40 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	0 ~ 40 cm
ST/℃	22.75 ± 0.42a	19.12 ± 0.96b	13.55 ± 1.61c	18.47 ± 1.01b	18.65 ± 0.33a	11.95 ± 0.25c	15.30 ± 0.29b
pH	6.95 ± 0.08a	7.03 ± 0.10a	5.74 ± 0.31c	6.57 ± 0.19b	6.25 ± 0.71a	6.14 ± 0.32a	6.20 ± 0.22a
SWC/(g·kg⁻¹)	25.35 ± 3.59a	18.33 ± 1.00b	21.03 ± 1.50a	21.57 ± 2.03a	26.12 ± 1.92a	21.24 ± 1.57b	23.68 ± 1.76b
SD/(g·cm⁻¹)	0.25 ± 0.01d	0.53 ± 0.06c	1.24 ± 0.07a	0.67 ± 0.04b	1.19 ± 0.02b	1.44 ± 0.06a	1.32 ± 0.04a
TN/(g·kg⁻¹)	2.40 ± 0.04a	1.70 ± 0.04b	0.59 ± 0.60c	1.56 ± 0.22b	1.79 ± 0.13a	0.56 ± 0.05c	1.18 ± 0.09b
TP/(g·kg⁻¹)	5.17 ± 1.03b	7.38 ± 1.39a	2.07 ± 0.34c	4.87 ± 0.92b	3.32 ± 1.24a	1.12 ± 0.12b	2.22 ± 0.68a
TK/(g·kg⁻¹)	11.00 ± 3.33b	16.00 ± 1.67a	11.86 ± 0.11c	12.95 ± 1.70b	15.82 ± 1.11a	11.27 ± 1.53c	13.55 ± 1.32b
AN/(mg·kg⁻¹)	558.50 ± 4.11b	657.47 ± 2.15a	145.19 ± 7.65d	453.72 ± 4.64c	155.74 ± 0.67a	63.35 ± 0.30c	109.55 ± 0.49b
AP/(mg·kg⁻¹)	112.31 ± 6.72c	267.92 ± 1.97a	18.03 ± 0.01d	132.75 ± 2.90b	15.79 ± 3.09a	6.83 ± 2.86c	11.31 ± 2.98b
AK/(mg·kg⁻¹)	719.14 ± 9.47b	836.40 ± 7.66a	168.30 ± 0.07d	574.61 ± 5.73c	216.37 ± 2.88a	153.94 ± 3.81c	185.16 ± 3.35b

注：表中数据为平均值 ± 标准差（$n = 5$）；不同字母表示同一样地不同土层间差异显著（$P < 0.05$）。ST. 土壤温度；SWC. 土壤含水量；SD. 土壤密度；TN. 全氮；TP. 全磷；TK. 全钾；AN. 速效氮；AP. 速效磷；AK. 速效钾。Notes: data in the table are average value ± standard deviation ($n = 5$); different letters mean significant differences between varied soil layers in the same site ($P < 0.05$). ST, soil temperature; SWC, soil water content; SD, soil density; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TK, total kalium; AN, available nitrogen; AP, available phosphorus; AK, available kalium.

3 讨 论

3.1 蚂蚁筑巢对土壤总有机碳储量及碳组分含量的影响

蚂蚁通过自身的生理活动以及与微生物的协同作用，能够显著影响土壤有机碳储量及垂直变化[26]。本研究中，蚁巢土壤碳库储量是非蚁巢的 5.7 倍，其土层垂直变幅大于非蚁巢。这主要由于蚂蚁的排泄物和有机食物残渣在巢内的积累能够直接增加土壤有机碳的沉积，同时蚂蚁巢穴比非蚁巢具有更高的通透性，有利于土壤碳的积累。蚂蚁的机械扰动将深层土壤与上部有机质层相混合，使得碳分配在小

表 3　土壤有机碳储量及活性碳组分与环境因子之间的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficients between soil organic carbon storage as well as active carbon components and environment factors

类型 Type	指标 Index	SD	pH	TN	TP	TK	AN	AP	AK
蚁巢 Ant nest	SOCs	−0.600	0.532	0.734*	0.669	−0.674	0.151	0.927**	0.554
	TOC	−0.924**	0.875**	0.973**	0.893**	−0.388	0.583	0.941**	0.907**
	MBC	−0.867**	0.813*	0.777*	0.648	0.231	0.753*	0.448	0.861**
	EOC	−0.192	0.565	0.173	0.403	0.424	0.824*	0.108	0.435
	POC	−0.889**	0.736*	0.938**	0.870**	−0.441	0.388	0.907**	0.807*
	DOC	−0.833*	0.738*	0.859**	0.686	−0.495	0.436	0.849**	0.784*
非蚁巢 Non-ant nest	SOCs	−0.731**	−0.289	0.757**	0.087	0.683*	0.679*	−0.645*	0.549
	TOC	−0.651*	0.533	0.651*	0.519	0.145	0.793**	−0.530	0.412
	MBC	−0.948**	0.458	0.949**	0.520	0.487	0.903**	−0.396	0.859**
	EOC	−0.726**	0.221	0.721**	0.284	0.228	0.616*	−0.293	0.536
	POC	−0.712**	0.407	0.709**	0.356	0.419	0.903**	−0.637*	0.483
	DOC	−0.827**	−0.085	0.818**	0.255	0.574	0.584*	−0.117	0.849**

注：SOCs. 土壤有机碳储量；*表示在0.05水平上差异显著；**表示在0.01水平上差异显著。Notes: SOCs, soil organic carbon storage; * means significant difference at 0.05 level; ** means significant difference at 0.01 level.

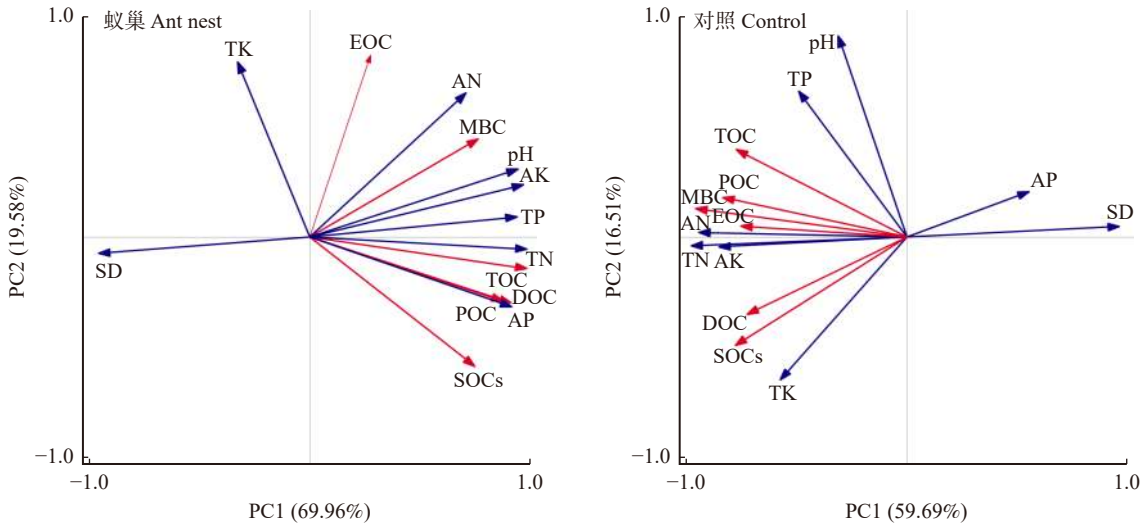


图 6　蚁巢和对照土壤环境因子与总有机碳储量、活性碳组分之间的主成分分析

Fig. 6　Principal component analysis of environmental factors and active organic carbon components in ant nests and control

尺度范围内产生显著的变异性，形成了蚁巢与非蚁巢土壤总有机碳储量沿土层垂直分布的差异性[27]。特别是蚂蚁在土壤表层的筑巢建穴活动加剧了土壤有机碳含量沿垂直土壤剖面的变化，影响了深层土壤有机碳的积累[26]。

蚂蚁筑巢显著提高了土壤活性有机碳组分含量，这与 Frouz[28]和 Cammeraat[27]等研究结果相类似。蚂蚁将采集到的枯枝落叶和动物残骸等有机物搬运至巢内，使得土壤易氧化碳含量大幅增加[29]。另一方面，蚂蚁分泌的蚁酸和排泄的粪便使蚁巢内形成弱酸性环境，增加了微生物的食物来源，有利于巢穴内微生物生长，进而使微生物生物量碳在巢内积累[30−31]。此外，蚂蚁筑巢时更偏向于搬运有利于巢穴稳定和有机物胶结的细颗粒土壤[32]，而被有机物胶结的细颗粒土壤形成团聚体后，使有机碳与矿物颗粒的接触更紧密[33]，从而更有利于巢穴内颗粒有机碳的形成。因此，蚂蚁筑巢活动能显著影响土壤总有机碳及其碳组分的含量。

蚁巢土壤活性有机碳组分含量均呈现明显的“单峰型”变化趋势，即蚁巢土壤总有机碳、微生物生物量碳和颗粒有机碳在 0 ~ 20 cm 处含量最大，易氧化有机碳和可溶性有机碳含量在蚁丘处最大。这可能是由于蚁丘土壤在湿季时密度较小且湿度较大，从而有利于易氧化有机碳和可溶性有机碳产生与积累。这与张哲[29]、陈闽昆[30]、左倩倩[34]等研究结果相似。Frouz 等[35]认为，蚂蚁筑巢活动加剧了土壤有机碳含量沿垂直土壤剖面的变化，不同种类的蚂蚁也会导致含量变化幅度不同。实验地蚂蚁类型为满洲

凹头蚁，该类型蚂蚁多分布在高纬度或高海拔的寒冷地带，体型大且生命力极为顽强[36]。采样发现该蚂蚁在 0 ~ 20 cm 土层活动剧烈且该土层的巢穴廊道众多，这有可能导致蚁巢土壤总有机碳、微生物生物量碳和颗粒有机碳在此层富集，且显著高于周边非蚁巢土壤。土壤易氧化有机碳和可溶性有机碳含量在蚁丘最大，这可能是因为蚁丘的主要组成是植物残体和筑巢时搬运的碎屑土壤，使蚁丘富集了丰富的有机物[37]，同时，土壤可溶性有机碳溶解速度快且易随水流失，易氧化有机碳又是有机碳中最先被氧化的部分[38]，蚁丘作为整个巢穴的“保护伞”，在 7 月时阻止了大部分的雨水下渗和碳氮养分向深层土壤的输入，使易氧化有机碳和可溶性有机碳含量呈随土层加深而不断减小。

纳帕海面山蚁巢土壤微生物生物量碳含量显著小于西双版纳热带森林蚁巢土壤[29−30]，而易氧化有机碳含量显著高于热带森林蚁巢土壤。原因可能是在雨热同季的热带地区有着比高寒湿地森林更好的热量条件和高质量的凋落物输入，从而促进微生物生物量碳的积累速率。但纳帕海面山蚁巢具有较高的土壤易氧化有机碳含量，可能该样地较高的土壤含水量和透气性密切相关。鱼小军等[39]研究也表明，在土壤含水量高的环境下，真菌的快速增长促进了其对碳源的分解转化，真菌的快速增长促进了其对碳源的分解转化，同时较低的土壤密度使得土壤通气环境较好，也有利于土壤易氧化有机碳的积累。同时较低的土壤密度使得土壤通气环境较好，也有利于土壤易氧化有机碳的积累。目前，国内关于蚂蚁种类对土壤有机碳及组分的研究鲜有报道，因此，蚂蚁类型对土壤有机碳库组分积累的影响研究也是未来研究的重点。

3.2 蚂蚁筑巢对土壤活性有机碳组分分配的影响

土壤活性有机碳占总有机碳比例能反映蚂蚁筑巢对不同土壤碳组分转化与积累的差异性[22]。土壤微生物生物量碳占总有机碳比例可以反映土壤有机碳库的周转速率[40]，土壤颗粒有机碳占比越高，土壤碳库越稳定[41]，土壤可溶性有机碳占总有机碳的比例可反映土壤活性有机碳的淋溶情况[38]。蚁巢土壤微生物生物量碳、颗粒有机碳和可溶性有机碳占总有机碳比例均表现为非蚁巢大于蚁巢。原因可能是非巢地上的植被能够通过增加有机碳向土壤的输入，从而导致蚁巢土壤微生物生物量碳的增量小于非巢地土壤有机碳[40]。蚂蚁的掘穴和搬运等行为，很可能破坏土壤的团聚结构，从而使得蚁巢土壤碳库稳定性弱于非蚁巢。同时，蚁巢土壤可溶性有机碳占比低于非蚁巢，说明了非蚁巢土壤更易受雨水冲刷和淋溶影响。

土壤易氧化有机碳占总有机碳比例可以反映土壤碳库的稳定性和养分周转情况，一般认为，土壤易氧化有机碳占比越高，土壤有机碳活度越高，越不利于有机质的积累[41−42]。研究认为，蚁巢土壤易氧化有机碳占总有机碳比例大于非蚁巢土壤。这表明蚂蚁筑巢能够活化土壤养分，从而导致土壤易氧化有机碳占比高于非巢地。

蚁巢土壤 MBC、EOC、POC 占 TOC 比例最大值均在 20 ~ 40 cm，可能主要由于 0 ~ 20 cm 是蚂蚁活动最强烈的土层，虽然该土层碳组分平均含量较高，但剧烈的蚂蚁活动和适宜的热量和湿度刺激了土壤有机碳矿化[43]，从而使得 0 ~ 20 cm 土层的各碳组分分配比例最低；采样同时发现深层土壤中只有零星的蚂蚁活动，较蚁丘和表层土壤，20 ~ 40 cm 土层受蚂蚁活动影响最小，但碳组分分配比例在该土层最大，也说明了蚂蚁活动使得该土层具有较强的碳转换和矿化分解潜力。相较于非蚁巢土壤的碳组分在各土层所占总有机碳的分配比特征，非蚁巢土壤 MBC、EOC、POC 占 TOC 的比例最大值在 0 ~ 20 cm 处，因此，大致可以认为纳帕海森林土壤在蚂蚁筑巢的影响下，蚁巢土壤总有机碳储量正处于快速积累阶段。湿季降水集中时会使得纳帕海森林土壤养分随水流失严重，而蚂蚁筑巢能够减少土壤活性有机碳的损失，故需继续加强纳帕海森林蚂蚁活动对有机碳积累与分配的影响机制研究，探索这一影响机制，可以为“高寒森林”碳循环提供数据支持。

3.3 土壤理化环境变化对活性有机碳组分含量的影响

蚂蚁筑巢显著改变了土壤理化环境，从而促进了土壤活性有机碳组分含量积累。土壤 pH 是影响活性有机碳组分含量的重要因子。相比与非巢穴土壤，巢穴土壤 pH 值较高，且与总有机碳、微生物生物量碳、颗粒有机碳和可溶性有机碳呈正相关关系。这可能是因为丰富的降水量和蚁巢较小的土壤密度，使得巢内土壤酸性离子流失量较多[44]，导致蚁巢 pH 值较大[45]，同时偏中性土壤可以减缓有机质的分解，从而使得土壤碳处于积蓄状态[46]。Wagner[47] 和 Wagner[48]等研究表明，巢穴土壤 pH 值会随着筑巢年份增加而增加，且巢穴深层土壤 pH 值显著低于表层土壤。这与本研究结果一致，样地位于海拔较高处，较少的人为干扰为蚂蚁栖息生存提供了绝佳的条件，蚂蚁筑巢通过增加土壤 pH 值而促进土壤有机碳沿不同土层的积累。本研究表明，土壤密度与易氧化有机碳呈负相关关系，这与张哲[29]、侯继华等[49] 研究结果一致。蚂蚁筑巢活动将不同土层混合，显

著减小了土壤密度,增加了孔隙度[50],蚁丘虽然阻挡了大部分的雨水进入,但考虑到当地湿季雨量较大,仍有部分雨水进入巢穴内部,加速了土壤有机质的分解,出现了易氧化有机碳含量随土层加深而下降的趋势。此外,巢穴内大量的微生物促进了易氧化有机碳的形成[42]。

动植物残体作为森林土壤有机碳的重要来源,蚂蚁将采集到的种子和动物残骸带入巢内,能够通过增加了土壤氮、磷、钾的含量,从而促进巢穴内的碳含量的积累与分配[27]。蚂蚁有培养微生物的习惯,使蚂蚁巢穴内微生物群落活性及群落结构特征与周边土壤存在极大的差异[26]。蚂蚁排泄的蚁粪是重要的腐殖质来源[51],腐殖质不仅可以显著改变土壤中团聚体结构特征,而且腐殖质中含有大量的水解肽,近 20% 的肽类有机碳吸附在土壤颗粒上,这也可能是蚁巢内土壤颗粒有机碳含量较非蚁巢土壤高的原因。因此,蚂蚁活动使土壤外源有机质的来源更为广泛,显著影响了土壤养分,促进了微生物对有机质的分解与转化,从而改变了土壤活性有机碳含量。本研究与王邵军[29−30,34,43]团队在西双版纳热带雨林蚁巢土壤的研究结果部分类似,同时也发现了速效磷这一新的影响因子。特别是蚂蚁种类与森林类型、海拔、气温、降水等因素之间存在一定的交互作用,可能对土壤有机碳积累及分配过程产生重要的影响。

4　结　　论

(1)蚂蚁筑巢活动显著提高了土壤总有机碳储量和活性有机碳组分含量。与非蚁巢地相比,蚁巢土壤有机碳储量和总有机碳含量分别是非蚁巢土壤的 5.7 和 3.8 倍,蚁巢土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳含量分别提高了 2.7、4.0、3.5 倍。

(2)蚁巢和非蚁巢土壤有机碳平均分配占比从大到小依次是:土壤颗粒有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳。除土壤颗粒有机碳外,微生物生物量碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳占总有机碳比例表现为非蚁巢大于蚁巢。

(3)蚂蚁活动主要通过改变土壤通气性及养分状况来调控土壤碳积累与分配,其中土壤密度、全氮、速效氮和速效磷是调控土壤总有机碳储量和活性有机碳组分含量变化的主要驱动因子。研究结果有助于理解土壤动物对高原湿地面山森林土壤碳循环影响的过程与机制。

参　考　文　献

[1] Chang E H, Chen T H, Tian G L, et al. The effect of altitudinal gradient on soil microbial community activity and structure in moso bamboo plantations[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 98: 213−220.

[2] Parton W, Schimel D, Cole C, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal-SSSAJ, 1987, 51(5): 1173−1179.

[3] 杨文焕, 王铭浩, 李卫平, 等. 黄河湿地包头段不同地被类型对土壤有机碳的影响 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1034−1043.
Yang W H, Wang M H, Li W P, et al. Effects of land use types on soil organic carbon in the south China sea wetland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(6): 1034−1043.

[4] Cao L, Song J, Wang Q, et al. Characterization of labile organic carbon in different coastal wetland soils of Laizhou Bay, Bohai sea[J]. Wetlands, 2016, 37(1): 163−175.

[5] 陈平, 赵博, 杨璐, 等. 接种蚯蚓和添加凋落物对油松人工林土壤养分和微生物量及活性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 63−71.
Chen P, Zhao B, Yang L, et al. Effects of earthworm and litter application on soil nutrients and soil microbial biomass and activities in *Pinus tabuliformis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 63−71.

[6] 梁文举, 闻大中. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 137−140.
Liang W J, Wen D Z. Soil biota and its role in soil ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 137−140.

[7] 刘满强, 陈小云, 郭菊花, 等. 土壤生物对土壤有机碳稳定性的影响 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(2): 152−158.
Liu M Q, Chen X Y, Guo J H, et al. Soil biota on soil organic carbon stabilization[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(2): 152−158.

[8] Folgarait P J, Perelman S, Gorosito N, et al. Effects of *Camponotus punctulatus* ants on plant community composition and soil properties across land-use histories[J]. Plant Ecology, 2002, 163(1): 1−13.

[9] Kilpeläinen J, Finér L, Niemelä P, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of ant mounds (*Formica rufa* group) in managed boreal forests of different successional stages[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 36(2/3): 156−163.

[10] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 科尔沁沙地流动沙丘掘穴蚁蚁丘分布及影响因素 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 376−380.
Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y. Distribution of *Formica cunicularia* mound and related affecting factors on mobile dune in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 376−380.

[11] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山西坡不同海拔梯度表层土壤碳氮变化特性的研究 [J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 240−246.
Ma H P, Guo Q Q, Liu H M, et al. Changes of soil organic carbon and total nitrogen at different altitudes in west slope of Sejila Mountain of Tibet[J]. Forest Research, 2013, 26(2): 240−246.

[12] 贺虹, 魏琮, 王云果, 等. 秦岭楼观台油松林地 3 种土栖性蚂蚁巢内真菌多样性研究 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2):

129−134.
He H, Wei Z, Wang Y G, et al. The ungal diversity in nests of three soil-nesting ant species (Hymenoptera: Formicidae) in pine f forests of Louguantai National Forest Park, China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 129−134.

[13] Duval M E, Galantini J A, Martínez J M, et al. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: influence of site features and seasonality[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 159: 9−22.

[14] 肖德荣, 田昆, 袁华, 等. 滇西北高原典型退化湿地纳帕海植物群落景观多样性 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1171−1176.
Xiao D R, Tian K, Yuan H, et al. Landscape diversity of Napahai Wetland plant community in Northwest Yunnan of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1171−1176.

[15] 徐正会, 杨比伦, 刘霞, 等. 西藏蚂蚁区系及物种多样性研究 [J]. 西南林业大学学报, 2021, 41(1): 1−16.
Xu Z H, Yang B L, Liu X, et al. Ant fauna and species diversity of Tibet[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2021, 41(1): 1−16.

[16] 郭萧, 徐正会, 杨俊伍, 等. 滇西北云岭东坡蚂蚁物种多样性研究 [J]. 林业科学研究, 2007, 20(5): 660−667.
Guo X, Xu Z H, Yang J W, et al. Ant species diversity on east slope of Yunling Mountain in northwestern Yunnan[J]. Forest Research, 2007, 20(5): 660−667.

[17] 徐正会, 吴定敏, 陈志强, 等. 高黎贡山自然保护区东坡水平带蚂蚁群落研究 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(6): 603−609.
Xu Z H, Wu D M, Chen Z Q, et al. A study on the ant community of horizontal band on the east slope of the Gaoligong Mountain nature reserve[J]. Forest Research, 2001, 14(6): 603−609.

[18] 陈超, 熊忠平, 徐正会, 等. 青藏高原东北坡蚂蚁物种的分布格局 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(3): 131−140.
Chen C, Xiong Z P, Xu Z H, et al. Distribution pattern of ant species on the northeast slope of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Forest Research, 2022, 35(3): 131−140.

[19] 尚文, 杨永兴. 滇西北高原纳帕海湖滨湿地退化特征、规律与过程 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3257−3265.
Shang W, Yang Y X. Degradation characteristics, patterns, and processes of lakeside wetland in Napahai of northwest Yunnan Plateau, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3257−3265.

[20] 田昆. 云南纳帕海高原湿地土壤退化过程及驱动机制 [D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2004.
Tian K. Mechanism and process of soil degradation in Napahai wetland on Yunnan Plateau[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography of Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2004.

[21] 陆梅, 田昆, 赖建东, 等. 高原湿地纳帕海周边山地不同植被类型枯落物持水特性 [J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 28−34, 52.
Lu M, Tian K, Lai J D, et al. Water holding characteristics of litters of different species in mountainous area of Napahai Plateau Wetland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 28−34, 52.

[22] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征 [J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246−1251.
Zhou C N, Ma H P. Distribution of labile organic carbon in soil as affected by vegetation typical of Sygera Mountains, Tibet, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1246−1251.

[23] 徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究 [M]. 昆明：云南科技出版社, 2002
Xu Z H. Biodiversity of ant insects in Xishuangbanna Nature Reserve, China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002.

[24] Ellert B H, Janzen H, Vandenbygaart B, et al. Measuring change in soil organic carbon storage[M]//Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis. New York: CRC Press, 2008: 25−38.

[25] 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. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[26] 张雪慧, 张仲胜, 武海涛. 蚂蚁扰动对土壤有机碳循环过程的影响研究进展 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4301−4311.
Zhang X H, Zhang Z S, Wu H T. Effects of ant disturbance on soil organic carbon cycle: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4301−4311.

[27] Cammeraat E L H, Willott J, Compton S, et al. The effects of ants' nests on the physical, chemical and hydrological properties of a rangeland soil in semi-arid Spain[J]. Geoderma, 2002, 105: 1−20.

[28] Frouz J, Holec M, Kalčík J. The effect of *Lasius niger* (Hymenoptera, Formicidae) ant nest on selected soil chemical properties[J]. Pedobiologia, 2003, 47(3): 205−212.

[29] 张哲, 王邵军, 陈闽昆, 等. 蚂蚁筑巢对不同恢复阶段热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响 [J]. 生物多样性, 2019, 27(6): 658−666.
Zhang Z, Wang S J, Chen M K, et al. Effect of ant colonization on spatiotemporal dynamics of readily oxidizable soil carbon across different restoration stages of tropical forests[J]. Biodiversity Science, 2019, 27(6): 658−666.

[30] 陈闽昆, 王邵军, 陈武强, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳及熵的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2973−2982.
Chen M K, Wang S J, Chen W Q, et al. Effects of ant nesting on soil microbial biomass carbon and quotient in tropical forest of Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2973−2982.

[31] Qi H S, Zhao Y, Wang X, et al. Manganese dioxide driven the carbon and nitrogen transformation by activating the complementary effects of core bacteria in composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 330: 124960.

[32] Sarcinelli T S, Schaefer C E G R, Fernandes F E I, et al. Soil modification by termites in a sandy-soil vegetation in the Brazilian Atlantic rainforest[J]. Journal of Tropical Ecology, 2013, 29(5): 439−448.

[33] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展 [J]. 中

南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 74−80.
Chen J G, Tian D L, Yan W D, et al. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(5): 74−80.

[34] 左倩倩, 王邵军, 王平, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤有机氮矿化的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7339−7347.
Zuo Q Q, Wang S J, Wang P, et al. Effect of ant colonization on soil organic nitrogen mineralization in the Xishuangbanna tropical forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 41(18): 7339−7347.

[35] Frouz J, Jilková J. The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae)[J]. Myrmecological News, 2008, 11(11): 191−199.

[36] Seifert B, Schultz R. A taxonomic revision of the Palaearctic ant subgenus *Coptoformica müller*, 1923 (Hymenoptera, Formicidae)[J]. Contributions to Entomology, 2021, 71(2): 177−220.

[37] Domisch T, Ohashi M, Finér L, et al. Decomposition of organic matter and nutrient mineralisation in wood ant (*Formica rufa* group) mounds in boreal coniferous forests of different age[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(3): 539−545.

[38] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4572−4581.
Chen X H, Chen Z Z, Lei J R, et al. Distribution characteristics of active organic carbon components in sediments of typical community types of mangrove wetland in Qinglan Port[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4572−4581.

[39] 鱼小军, 蒲小鹏, 黄世杰, 等. 蚂蚁对东祁连山高寒草地生态系统的影响 [J]. 草业学报, 2010, 19(2): 140−145.
Yu X J, Pu X P, Huang S J, et al. Effects of ants (*Tetramorium* sp.) on eastern Qilian Mountains alpine grassland ecosystem[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 140−145.

[40] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 等. 红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 429−433.
Tang G Y, Huang D Y, Tong C L, et al. Characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in hilly red soil region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 429−433.

[41] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征 [J]. 土壤学报, 2014, 51(06): 1351−1360.
Zhang W M, Wu M, Wang M, et al. Distribution characteristics of organic carbon and its components in soils under different types of vegetation in wetland of Hangzhou Bay[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1351−1360.

[42] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 清澜港红树林湿地土壤酶活性与理化性质的关系 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(2): 171−179.
Chen X H, Chen Z Z, Lei J R, et al. Relationship between soil enzyme activities and physicochemical properties in mangrove wetland of Qinglan Port[J]. Forest Research, 2022, 35(2): 171−179.

[43] 曹乾斌, 王邵军, 任玉连, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤碳矿化动态的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4231−4239.
Cao Q B, Wang S J, Ren Y L, et al. Effects of ant colonization on spatiotemporal variation of organic carbon mineralization in Xishuangbanna tropical forest soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4231−4239.

[44] 车昭碧, 徐鹏飞, 郭亚亚, 等. 不同草地类型的北方蚁蚁巢及周围土壤理化性质特征分析 [J]. 草地学报, 2021, 29(5): 982−990.
Che Z B, Xu P F, Guo Y Y, et al. Analysis of soil physical and chemical properties of *Formica aquilonia* yarrow nest and surrounding in different grassland types[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 29(5): 982−990.

[45] 脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 等. 滇中高原降雨对不同地类土壤磷素、有机质和 pH 变化的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 942−950.
Tuo Y F, Shen F Y, Yang C P, et al. Effects of rainfall on phosphorus, organic matter and pH in different land use types in middle Yunnan Plateau[J]. Ecology and Environment Science, 2020, 29(5): 942−950.

[46] 郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系 [J]. 林业科学, 2014, 50(10): 8−15.
Guo Z H, Zhang L, Guo Y R, et al. Soil carbon sequestration and its relationship with soil pH in Qinglangang Mangrove Wetlands in Hainan Island[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(10): 8−15.

[47] Wagner D, Jones J B, Gordon D M. Development of harvester ant colonies alters soil chemistry[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(5): 797−804.

[48] Wagner D, Jones J B. The impact of harvester ants on decomposition, N mineralization, litter quality, and the availability of N to plants in the Mojave Desert[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2593−2601.

[49] 侯继华, 周道玮, 姜世成. 蚂蚁筑丘活动对松嫩草地植物群落多样性的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 323−329.
Hou J H, Zhou D W, Jiang S C. The effect of hill-building activities of ants on the species diversity of plant communities in Songnen grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(3): 323−329.

[50] 陈元瑶, 魏琮, 贺虹, 等. 秦岭地区 2 种蚂蚁巢内土壤理化性质和微生物量的相关性研究 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 121−126.
Chen Y Y, Wei Z, He H, et al. Correlation of physicochemical characteristics and microbial biomass among nest soil of *Camponotus japonicus* and *Pachycondyla astute* in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 121−126.

[51] Rawlins A J, Bull I D, Ineson P, et al. Stabilisation of soil organic matter in invertebrate faecal pellets through leaf litter grazing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5): 1202−1205.

（责任编辑　范　娟　李雅文
责任编委　孙向阳）