



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目：蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合下土壤有机碳的形成与稳定机制
作者：丁彰琦，李红梅，周旺明，殷哲，刘占锋
收稿日期：2026-06-02
网络首发日期：2026-09-10
引用格式：丁彰琦，李红梅，周旺明，殷哲，刘占锋. 蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合下土壤有机碳的形成与稳定机制[J/OL]. 应用生态学报.
<https://link.cnki.net/urlid/21.1253.Q.20260909.1636.004>



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。

蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合下土壤有机碳的形成与稳定机制

丁彰琦¹ 李红梅¹ 周旺明¹ 殷哲² 刘占锋³✉

(¹安庆师范大学安徽省皖西南生物多样性保护与特色资源利用重点实验室, 安徽安庆 246133; ²合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; ³中国科学院华南植物园广东省应用植物学重点实验室/广东鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510650)

*通信作者 E-mail: liuzf@scbg.ac.cn

摘要 土壤有机碳 (SOC) 是陆地生态系统最大的活跃碳库, 其形成与稳定受生物过程和非生物稳定机制共同调控。近年来, 植物源与微生物源有机碳的耦合转化与稳定机制受到广泛关注, 但对具有高度社会组织性的土壤动物——蚂蚁, 在地下碳循环中的潜在作用仍缺乏系统认识。本文综述了蚂蚁介导 SOC 形成与稳定机制, 指出蚂蚁可能通过资源再分配、微食物网调控、生物扰动和微环境重塑等多路径过程, 调节植物源碳输入、微生物转化和有机碳稳定化等关键过程。在此基础上, 本文提出“蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”概念框架, 强调蚂蚁依托社会性行为 and 生态工程作用, 可能将资源迁移、多营养级互作和环境改造等生态过程连接形成多路径调控网络, 进而介导植物源碳向微生物源碳转化以及不同 SOC 组分的形成与稳定。该框架拓展了传统 SOC 研究的分析视角, 将蚂蚁介导的多过程调控机制纳入地下碳循环理论体系。针对当前研究在机制解析、效应量化和尺度整合等方面的不足, 本文围绕功能性状解析、碳流定量追踪、多类群互作、跨尺度外推和全球变化响应等关键方向提出未来研究重点。

关键词 蚂蚁; 土壤有机碳; 植物源碳; 微生物残体碳; 矿物结合态有机碳; 微食物网

Mechanisms of soil organic carbon formation and stabilization under ant-mediated plant-microbe-mineral coupling

DING Zhangqi¹, LI Hongmei¹, ZHOU Wangming¹, YIN Zhe², LIU Zhanfeng³✉

(¹Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Characteristic Resource Utilization in Southwest Anhui, Anqing Normal University, Anqing 246133, Anhui, China; ²School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; ³Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany/Guangdong Heshan National Observation and Research Station for Forest Ecosystem, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract Soil organic carbon (SOC) represents the largest active carbon pool in terrestrial ecosystems, and its formation and stabilization are jointly regulated by biotic processes and abiotic stabilization mechanisms. In recent years, increasing attention has been paid to the coupled transformation and stabilization mechanisms of plant-derived and microbial-derived organic carbon. However, the potential role of ants, highly social soil animals, in regulating belowground carbon cycling remains poorly understood. Here, we reviewed the ecological mechanisms underlying ant-mediated SOC formation and stabilization, and proposed that ants may regulate plant carbon inputs, microbial transformation, and organic carbon stabilization through multiple interconnected pathways, including resource redistribution, micro-food web regulation, bioturbation, and microenvironment remodeling. Based on this perspective, we proposed a conceptual framework of “ant-mediated plant-microbe-mineral coupling”, emphasizing that ants, through their social behaviors and ecosystem engineering effects, may integrate ecological processes including resource transfer, multitrophic interactions, and environmental modification into a multipath regulatory network, thereby mediating the transformation of plant-derived carbon into microbial-derived carbon and the formation and stabilization of different SOC pools. This framework expanded the traditional perspective of SOC research and incorporated ant-mediated multi-process regulation into the theoretical framework of belowground carbon cycling. Considering current challenges in mechanism elucidation, effect quantification, and cross-scale integration, we highlighted future research priorities, including functional trait-based analyses, quantitative carbon-flow

收稿日期: 2026-06-02

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(32572028)资助。

作者简介: 丁彰琦, 男, 1989年生, 博士。主要从事生物多样性与土壤养分循环研究。E-mail: dzq@aqnu.edu.cn

网络首发时间: 2026-09-10 10:22:16 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/21.1253.Q.20260909.1636.004>

tracing, multitrophic interactions, cross-scale extrapolation, and responses under global change.

Key words ants; soil organic carbon; plant-derived carbon; microbial necromass carbon; mineral-associated organic carbon; micro-food web

土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 是陆地生态系统最大的活跃碳库, 其碳储量远超大气与植被碳库的总和^[1], 在全球碳循环调节和缓解气候变化中具有重要作用。长期以来, SOC 稳定性主要被归因于有机质自身的化学惰性。但近年来的研究表明, SOC 稳定并非由单一化学属性决定, 而是植物碳输入、微生物转化和矿物保护等过程共同作用的结果^[2-3]。根据形成来源与转化途径, SOC 可划分为植物源有机碳和微生物源有机碳^[4-5]。植物输入为土壤碳循环提供初始底物, 而微生物转化和残体积累则是形成长期稳定 SOC 的重要途径^[6], 尤其是微生物残体碳对矿物结合态有机碳 (mineral-associated organic carbon, MAOC) 的重要贡献已得到广泛证实^[7-8]。随着微生物效率-矿物稳定 (microbial efficiency-matrix stabilization, MEMS) 框架和土壤微生物碳泵 (soil microbial carbon pump, MCP) 理论的发展^[2,4], 从植物源碳向微生物源碳转化视角理解 SOC 的形成与稳定机制, 已成为当前土壤碳循环研究的重要方向。

在输入、转化、稳定这一连续过程中, 地下生物网络中的土壤动物发挥着重要调控作用。土壤动物是连接植物残体分解、微生物代谢周转与碳稳定化的核心生物纽带^[9-10]。土壤动物不仅能够通过破碎、搬运、取食和扰动直接改变植物源碳的输入格局与分解环境, 还可通过调节微生物群落结构和营养关系影响微生物源碳的形成与积累^[10-11]。已有研究表明, 蚯蚓、白蚁等大型土壤动物可通过生态工程作用改变土壤结构和有机质-矿物结合过程。例如, 蚯蚓通过消化道加工、粪团形成和土壤混合作用促进有机质转化与稳定^[12-13]; 白蚁则依赖共生微生物高效降解木质纤维素, 并通过筑巢行为改变局地土壤结构和养分循环^[14]。然而, 现有研究多聚焦于单一土壤动物类群或单一生态过程, 对不同生态过程如何协同影响植物源碳向微生物源碳转化和稳定 SOC 组分形成仍缺乏系统认识。

相较而言, 蚂蚁作为全球广泛分布且生物量巨大的社会性土壤动物, 其在 SOC 形成与稳定中的生态作用仍缺乏系统整合。蚂蚁不仅是典型的生态系统工程师, 同时还兼具捕食者、植食者和食碎屑者等多重功能角色^[15-17]。更重要的是, 其高度组织化的社会性行为使资源搬运、捕食调控、巢穴建设和环境改造等多个生态过程能够持续、协同发生。不同于蚯蚓主要依赖个体取食和消化排泄过程、白蚁主要依赖共生微生物降解木质纤维素, 蚂蚁的独特性在于其社会性行为能够通过群体分工和长期协同行为, 将资源迁移、营养级调控和环境改造整合于同一空间尺度内^[18]。现有研究主要关注蚂蚁对土壤理化性质、养分循环和局地生态效应的影响^[19-21], 但是对蚂蚁如何介导植物源碳向微生物源碳转化、如何通过资源再分配、微食物网调控、生物扰动和微环境重塑等多生态过程耦合影响 SOC 形成与稳定, 以及社会性行为如何连接植物-微生物-矿物连续转化过程, 仍缺乏系统性整合。基于上述认识, 本文将从植物源与微生物源有机碳耦合转化连续体视角出发, 系统梳理蚂蚁调控 SOC 形成与稳定的生态过程与机制, 构建“蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”概念框架, 同时指出当前研究的不足并提出未来重点突破方向, 为理解社会性土壤动物驱动地下碳稳定过程提供新的理论视角。

1 植物源与微生物源土壤有机碳的形成与稳定机制

SOC 的形成与稳定是由生物和非生物过程共同驱动的复杂动态过程^[2-3]。MEMS 框架和 MCP 理论强调了植物底物质量、微生物碳利用效率 (carbon use efficiency, CUE) 和微生物残体形成在 SOC 积累中的重要作用, 推动 SOC 研究由传统的“有机质自身化学惰性决定稳定性”转向“输入-转化-稳定”连续过程视角^[2,4,22]。在此框架下, 有机碳输入特征、微生物同化效率和矿物基质保护能力, 共同决定了不同来源碳组分的形成路径、积累方式和长期稳定潜力。

1.1 植物源有机碳的输入、转化与稳定

植物源有机碳主要来自地上凋落物、根系周转和根系分泌物等碳输入, 其化学组成包括易分解的糖类和氨基酸等活性组分, 以及木质素、纤维素和脂类等难降解组分^[7]。植物源碳进入土壤后, 并不会直接长期保存, 而是在分解者作用下经历物理破碎、酶促降解、微生物同化和矿物结合等连续转化

过程^[2-3]。

植物源碳的化学性质和空间分布是决定其后续转化路径的重要因素。通常，富含木质素且较高 C:N 比的植物残体具有较低的生物可利用性，更容易以未完全分解形式进入颗粒有机碳（particulate organic carbon, POC）库^[3]；而富含可溶性糖、氨基酸等活性组分的植物输入，则更容易被微生物吸收利用，进入微生物代谢循环。

当前普遍认为，部分植物残体可直接进入 POC 库并参与 SOC 积累，更重要的是，植物源碳作为微生物代谢底物，能够驱动微生物碳泵过程，促进微生物残体和相关代谢产物形成，进而推动稳定 SOC 形成^[4-5,23]。因此，植物源碳输入后的降解效率及其在呼吸损失、微生物同化和物理保护之间的流向分配，是决定长期 SOC 积累潜力的关键环节。同时，植物源碳的稳定过程还受到土壤物理化学保护机制调控：部分未完全分解的 POC 可通过团聚体包埋，降低微生物和胞外酶可及性；而经微生物转化形成的小分子有机组分，则可通过与黏土矿物和金属氧化物结合，进入更稳定的 MAOC 库^[24-25]。

1.2 微生物源有机碳的形成、积累与稳定

与直接源于植物输入的有机碳不同，微生物源有机碳的形成深度依赖地下微生物群落对有机底物的吸收、同化与周转。MCP 理论阐明了这一生物转化过程：微生物通过利用不稳定有机底物，将植物源碳转化为微生物生物量、残体和代谢产物，进一步促进碳在土壤中的长期保存^[4]。微生物源碳主要包括真菌和细菌死亡后残留的细胞壁组分，如氨基糖、几丁质、胞外聚合物和部分次生代谢产物^[8]。相较于通常周转较快且主要来源于植物残体输入的 POC，部分微生物源组分具有较高官能团密度和矿物亲和性，能通过吸附、络合和共沉淀等过程进入有机-矿物结合界面，形成周转较慢的 MAOC 库^[25]。其中，微生物残体碳被认为是 MAOC 的重要来源之一，对稳定 SOC 积累具有关键贡献^[5,26]。

微生物源碳的形成效率受到微生物群落结构、代谢策略和 CUE 的共同调节。较高 CUE 指示更多底物碳被分配至微生物生长和生物量形成，而非通过呼吸作用损失，有利于微生物残体前体的积累^[4]。同时，真菌和细菌在资源利用策略、细胞壁组成和残体稳定性方面存在差异，因此群落结构变化能够影响微生物源碳的形成效率与稳定化路径。例如，真菌细胞壁中的几丁质和黑色素等复杂聚合物具有较高的抗降解性，因此真菌主导的转化路径通常具有较高的长期固碳潜力^[24]。

近年来提出的“微生物碳泵 2.0”框架进一步强调，微生物源碳通常需通过与矿物基质结合或受到空间结构保护等机制，实现更长期稳定保存^[27-28]。因此，植物源碳向微生物源碳的转化效率，以及随后的矿物结合和团聚体保护过程，共同决定 SOC 形成与稳定过程。然而，在现有碳循环理论中，土壤动物作为连接资源输入、生物互作和土壤环境变化的生物因子，其调控作用仍未得到充分认识与重视。特别是蚂蚁这类具有高度组织化社会行为的生态系统工程师，可能通过资源再分配、微食物网调控、生物扰动和微环境重塑等多路径生态过程，成为连接植物-微生物-矿物连续转化过程的重要调控者。

2 蚂蚁调控植物源与微生物源碳形成、转化与稳定的多路径机制

现有 SOC 稳定理论主要围绕植物碳输入、微生物转化效率和矿物保护机制展开。例如，MEMS 框架强调植物源底物质量与微生物 CUE 对 SOC 形成的共同作用^[2]；MCP 理论突出微生物同化过程和残体积累在稳定碳库形成中的重要作用^[4]；土壤动物生态工程理论则强调土壤动物通过生物扰动和环境改造等过程重塑地下生境，影响生态系统功能^[12-13]。现有理论体系较少考虑具有高度社会组织性的土壤动物如何通过持续的群体行为，将资源空间重分配、多营养级互作和局地环境改造整合为连续的 SOC 调控过程。

众多研究证实，土壤动物可通过多种生态过程参与 SOC 形成与稳定。大型土壤动物如蚯蚓，通过破碎凋落物、混合有机质和矿物颗粒以及形成富含胶结物的粪团，改变植物源碳的分解环境，并促进有机质与矿物的物理化学结合^[12-13,29]。白蚁则依赖其独特的消化道共生微生物高效降解木质纤维素

类底物，并通过筑巢行为改变局地土壤结构和养分分布^[14,30]。此外，线虫和原生动物等微生物捕食者可通过下行效应（**top-down regulation**）调节细菌和真菌群落结构、代谢活性和碳利用策略，间接影响微生物源碳形成过程^[31-33]。这些研究表明，土壤动物对 SOC 的影响通常具有多路径、耦合性和环境依赖性特征。

然而，当前土壤动物的碳循环调控研究仍存在一定局限^[10]。一方面，现有研究多围绕单一功能类群或单一生态过程展开，重点关注生物扰动、凋落物分解或微生物调控等局部效应，对不同生态过程之间如何协同作用、共同影响 SOC 形成与稳定仍缺乏系统认识。另一方面，现有研究更多关注 SOC 含量和相关生态响应变化，对于植物源碳和微生物源碳在土壤动物调控下的连续转化路径、分配过程与稳定化机制关注不足。因此，有必要从碳源连续转化和多过程耦合视角重新认识土壤动物在地下碳循环中的综合调控作用。

蚂蚁作为全球陆地生态系统重要的土壤动物类群，在资源空间配置、食物网结构调节、土壤基质扰动和微环境重塑方面具有综合生态功能^[19-20,34]。与蚯蚓和白蚁等经典生态工程师相比，蚂蚁的独特性并不在于单一生态过程的增强，而在于其高度组织化的社会性行为。群体分工和行为协同使资源搬运、食物网调控、空间建设和环境改造等多个过程能够长期持续且同步发生，从而形成区别于其他土壤动物的多路径耦合调控模式（表 1）。尽管有研究关注蚂蚁对土壤肥力、养分循环和生态系统功能的影响^[19,35]，但蚂蚁如何连接植物源碳输入、微生物转化和矿物保护等环节影响 SOC 形成与稳定，仍缺乏系统性理论框架。

表1 蚯蚓、白蚁和蚂蚁生态工程功能及其调控土壤有机碳形成与稳定机制的比较
Table 1 Comparison of ecosystem engineering functions and mechanisms regulating soil organic carbon formation and stabilization among earthworms, termites and ants

项目 Item	蚯蚓 Earthworm ^[10,13,29-30,36-38]	白蚁 Termite ^[10,30,37-40]	蚂蚁 Ant ^[10,30,35,37-38,40-41]
生态角色 Ecological role	生态系统工程师、 碎屑转化者	生态系统工程师、 木质纤维素转化者	社会性生态系统工程师、 资源再分配者、多营养级调控者
工程行为 Engineering behavior	个体摄食植物残体等有 机质、 消化排泄、形成孔道	取食木质纤维素、利用肠道 共生微生物、构建巢体结构	群体分工协同行为、筑巢、 资源搬运、储存、捕食
空间作用尺度 Spatial scale of effect	微域-土壤剖面尺度	巢穴-局地景观尺度	巢穴-斑块尺度， 具有跨尺度影响潜力
对植物源碳影响 Effect on plant-derived C	加速凋落物破碎、 促进有机-矿物结合	强化木质纤维素降解、 加快植物残体转化	改变植物残体、种子的 输入数量、质量和空间分布
对微生物过程影响 Effect on microbial process	改变底物环境和 微生物活性	通过肠道共生微生物 直接参与复杂碳降解	通过资源聚集、微食物网级联和 微环境重塑等途径潜在调节
关键调控机制 Key mechanism	生物扰动、有机-矿物混 合、 团聚体形成	木质纤维素降解、 巢体形成、养分循环	资源再分配、微食物网调控、 生物扰动、微环境重塑
对SOC的稳定贡献 Contribution to SOC stabilization	促进有机-矿物结合和 提高部分SOC物理保护	促进植物残体转化并通过 巢体形成影响局地碳保存	影响植物源碳输入、POC保存和 MAOC形成潜力
代表性优势 Distinctive advantage	消化道驱动的 有机-矿物混合	共生微生物驱动的 木质纤维素降解	社会性行为驱动的 多过程耦合调控
当前研究不足 Current research gap	不同碳来源及稳定路径 的 贡献仍需进一步解析	植物残体转化与稳定碳形成的连接 机制仍需加强	植物-微生物-矿物耦合过程和 多路径贡献缺少定量解析

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; MAOC: 矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic carbon.

2.1 蚂蚁的关键生态功能与调控潜力

蚂蚁调控地下碳过程的核心优势来源于其独特的真社会性行为特征和功能多样性^[40,42]。作为典型的生态系统工程师，蚂蚁通常具有较高的种群密度和广泛的生态分布^[15,30]。与其他土壤动物相比，蚂蚁的代表性优势在于其社会性行为能够将多个生态过程整合于同一空间单元。杂食性蚂蚁可跨越捕食

者、植食者和食碎屑者等多个营养级,使其能够参与不同类型有机底物的获取、转运和转化过程^[43]。工蚁持续的资源搜索、搬运、储存和巢穴维护行为,使蚂蚁活动具有明显的空间聚集性和时间连续性,不仅会改变外源碳输入的空间格局,形成典型的“肥力岛”效应^[34,44],也将影响微生物及其消费者的资源可获得性和生态互作关系。这些由社会性行为驱动的资源调控、空间改造和生物互作过程,可能使蚂蚁对 SOC 形成与稳定的影响通过资源再分配、微食物网调控、生物扰动和微环境重塑 4 个相互关联的生态途径协同实现(图 1)。

具体而言,资源再分配首先改变植物源碳输入的数量、质量和空间格局,形成异质性资源富集斑块,为微生物转化提供底物基础;同时,资源空间重组改变有机质分布及其与矿物接触机会,进而影响生物扰动的埋藏和物理保护过程。资源可利用性的变化进一步调节地下微食物网结构,通过改变消费者压力、资源竞争和营养级联关系影响微生物群落组成、CUE 与残体形成。另一方面,微生物过程产生的代谢产物与残体积累又可改变有机质胶结和矿物结合过程,增强或削弱生物扰动产生的稳定化效应。生物扰动通过改变土壤孔隙结构、氧扩散和水分分布,不仅影响微环境形成,也改变微生物及其消费者的栖息条件;而微环境重塑则通过调节温湿度、pH、氧供应和养分有效性,作用于微食物网运转、微生物代谢策略和蚂蚁筑巢与资源搬运行为。因此,蚂蚁依托持续性社会行为,将资源再分配、微食物网调控、生物扰动和微环境重塑连接起来,形成相互促进、相互限制的多路径耦合网络,共同调控植物源碳向微生物源碳转化以及不同 SOC 组分的形成与稳定。

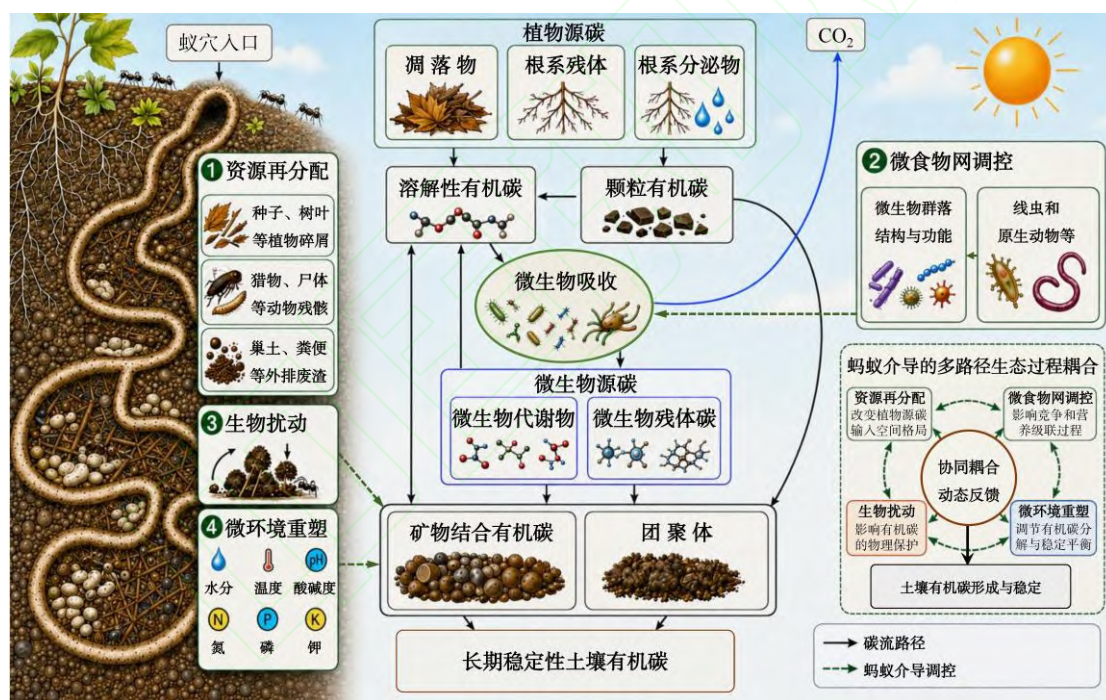


图 1 “蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”土壤有机碳形成与稳定机制框架

Fig.1 Mechanistic framework of ant-mediated plant-microbe-mineral coupling regulating soil organic carbon formation and stabilization.

2.2 资源再分配对碳源输入格局的重塑

资源再分配是蚂蚁调控 SOC 转化的重要起始过程。工蚁能够持续将蚁巢周边的凋落物残片、种子、动物尸体和蜜露等有机资源搬运至巢穴内部,在局部微域形成资源聚集。研究已表明,蚁巢土壤通常拥有较高的总有机碳、可溶性有机碳和微生物生物量碳,其有机碳与养分含量最高可达周边土壤的 8 倍^[34-35]。大量植物残体的输入还可能促进木质素和纤维素等复杂组分的分解,增加微生物可利用底物供给,改变局部碳循环速率^[45]。而巢穴周边的废物堆积区(middens)通常形成高可溶性有机碳、低 C:N 比资源富集热点,进一步促进局地微生物过程和养分循环^[46]。蚂蚁掘穴行为还能够驱动有机碳在土壤剖面上的垂直迁移,将表层有机质带入深层土体,为深层土壤微生物提供潜在碳源^[47]。

不同功能群蚂蚁可能形成差异化碳输入路径。例如,切叶蚁通过收割和搬运植物叶片,利用共生真菌培养系统促进植物源碳转化,使部分植物碳进入微生物代谢通道^[48];土栖蚁主要通过土壤颗粒搬运和垂直混合作用改变有机质的空间分布及其与矿物接触的机会^[49];蜜露采集蚁通过蜜露输入,向土壤系统补充大量不稳定单糖和低聚糖等易利用可溶性有机碳底物,可能增强局部微生物活性和碳周转^[50]。此外,工蚁的收种和散种行为还可能长期改变植物群落组成和根系资源分布,从而影响地下碳输入质量和空间格局^[51]。

目前,蚂蚁资源再分配对 SOC 的影响已有较充分的资源富集和空间重构证据支持,但其如何进一步改变植物源碳向微生物源稳定碳库的转化效率,仍需要结合稳定同位素等碳流追踪方法进行验证。

2.3 微食物网级联对微生物源碳转化的调控

蚂蚁作为土壤食物网中的较高营养级消费者,可通过捕食或干扰跳虫、线虫和原生动物等中小型土壤动物,影响地下营养级联过程^[38]。与直接作用于微生物代谢的调控模式不同,地下微食物网调控主要通过改变捕食压力、资源竞争关系和群落组装过程,影响微生物的碳利用策略。除少数具有真菌培养习性的切叶蚁,多数蚂蚁主要通过食物网下行效应间接调节微生物过程^[52-53]。捕食者数量变化可能降低线虫等微生物捕食者对细菌和真菌的取食压力,进而改变微生物群落结构、代谢活性和 CUE^[54]。这种微食物网级联过程可能进一步影响微生物残体和胞外次生代谢物的生成与积累^[55],以及植物源碳向微生物源碳的转化效率。因此,源于微食物网调控的营养级联效应,可能构成蚂蚁影响植物源碳向微生物源碳转化的重要间接调控途径^[29]。

目前关于蚂蚁介导土壤微食物网级联对 SOC 形成与稳定贡献的直接证据仍较有限,相关认识主要来自蚂蚁对土壤动物群落变化、微生物响应和养分循环效应的间接推断。未来需结合多营养级操纵试验、稳定同位素示踪和微生物功能分析,定量解析蚂蚁介导的捕食压力变化在微生物 CUE、残体形成比例和 MAOC 积累过程中的实际贡献。

2.4 生物扰动对有机碳物理保护过程的调节

蚂蚁频繁的掘土筑巢和对蚁道的精细拓展构成了持续性生物扰动,显著影响了植物源碳和微生物源碳组分在土壤三相体系中的保存环境。通过颗粒搬运与机械混合作用,蚂蚁能够打破原有的土壤层理,系统改变容重、孔隙结构和通气条件以及团聚体形成过程^[56-57]。例如,墨西哥半干旱地区,尖光胸臭蚁(*Liometopum apiculatum*)巢穴区的土壤容重显著低于周边土壤;在切叶蚁族群中,工蚁持续的挖掘和搬土能大幅提高土体内部的通气状况,但其物理扰动的强烈程度受到局地水分条件的严格调节^[57-59]。

在不同碳组分的分流方面,生物扰动的作用路径各异。蚂蚁对植物粗残体的机械破碎、搬运和埋藏可影响植物源碳的空间分布与周转环境^[47,60]。虽然蚂蚁缺乏蚯蚓消化道中的强烈有机-矿物混合作用^[61],但其巢穴构建、排泄物输入和长期扰动过程可能改变颗粒胶结特征、微生物残体碳和小分子有机组分与矿物的接触关系、以及胞外酶对此类碳源的可及性,从而增强有机碳的物理保护潜力^[38,62-63]。

此外,蚂蚁生物扰动对 SOC 的影响具有明显背景依赖性。在热带森林,蚂蚁持续掘穴和土壤颗粒搬运可改变土壤孔隙结构和有机质空间分布,增加有机质与矿物接触机会,可能促进部分碳组分的物理保护^[64],但高强度扰动可能提高土壤通气性,增强微生物氧化分解过程,导致 CO₂释放增加^[48];在干旱和半干旱生态系统,蚂蚁可通过改变土壤结构和水分保持能力形成局部水养分异质斑块,影响植物输入和地下碳循环过程^[34];在植被恢复处理的沙漠地区,蚂蚁扰动可能增强土壤通气和有机质矿化,使蚁丘 SOC、微生物生物量碳和 POC 含量低于周边对照土壤^[65];在高有机质泥炭地,蚂蚁造成的土壤结构开放和氧扩散增强可能促进有机质氧化分解,加速 SOC 损失^[45];在农田生态系统,蚂蚁扰动对 SOC 的影响可能受土地利用强度、土壤结构背景和蚂蚁功能性状共同调节,其中耕作管理可能通过改变土壤扰动和蚂蚁群落组成影响其碳调节效应^[66]。上述差异表明,蚂蚁生物扰动主要通过改变有机碳在土壤剖面的迁移与埋藏、有机-矿物接触和团聚体保护过程影响 SOC 保存,但不

同过程的相对作用及其净碳效应取决于扰动强度与环境背景之间的交互作用。

2.5 微环境重塑对有机碳降解与固持平衡的调节

蚂蚁活动能够通过巢穴结构建设、代谢产物输入和资源聚集过程,形成区别于周边土壤的局部微环境,包括水分、温度、pH、通气性和底物浓度等^[58,67-68]。这种微环境重塑对 SOC 具有促进分解与增强固持并存的双重影响。一方面,较高的水分和养分水平以及增强的通气条件可能提高水解酶和氧化酶(如纤维素酶、酚氧化酶)活性,加速不稳定有机碳的分解和矿化过程,缩短活性碳组分的驻留寿命^[69-71]。另一方面,巢穴内部的资源富集和适宜微环境可能促进微生物生长与残体形成,并通过团聚体包埋和矿物吸附进一步获得长期较强的抗降解能力^[25,72]。

此外,蚂蚁活动形成的异质性微环境还可能改变细菌和真菌群落结构和代谢策略,进而通过激发效应(priming effect)影响已有 SOC 的矿化速率^[73-74]。因此,蚂蚁介导的微环境调控最终表现为降解矿化与形成稳固过程之间动态平衡的净固碳效应,其方向和强度取决于蚁种特征、底物供给、土壤性质和生态系统背景。这一过程体现了蚂蚁行为驱动的生物过程与非生物环境之间的耦合作用。

总体而言,蚂蚁调控 SOC 的多路径耦合过程具有不同程度的证据基础。其中,资源再分配、土壤结构改变和局部资源富集已有较充分实证支持;而微食物网级联对 CUE、微生物残体形成和 MAOC 积累的影响,目前仍主要基于生态过程推断。另外,不同生态系统和功能群背景下,各调控路径对 SOC 形成与稳定的相对贡献及其转换阈值仍缺乏统一量化。

3 研究展望

尽管近年来土壤动物参与地下碳循环调控的研究取得重要进展,但蚂蚁如何通过多路径生态过程连接植物碳输入、微生物转化和矿物保护仍缺乏系统验证和理论整合。未来需围绕“蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”框架,结合功能性状解析、多源碳示踪、多营养级操纵实验、跨尺度观测和过程模型模拟等方法(图 2),系统揭示蚂蚁调控 SOC 形成与稳定的过程机制、尺度效应和生态意义。

3.1 蚂蚁功能性状与碳流调控机制

未来研究需要突破单一物种或单一生态系统研究的限制,转向基于功能群(functional groups)和功能性状(functional traits)的机制解析框架。不同功能群蚂蚁在资源获取方式、营养生态位、筑巢策略和扰动强度等方面存在显著差异,相关功能性状可能决定了植物源碳进入不同转化路径的效率。因此,应结合野外长期控制试验和跨生态系统调查,系统比较切叶蚁、捕食蚁、蜜露采集蚁和土栖筑巢蚁等类群对植物源碳输入、微生物 CUE、残体形成和 MAOC 积累潜力的差异化影响^[48,50]。重点解析筑巢深度、蚁群规模、劳动分工、资源搬运效率、扰动频率和营养级偏好等关键功能性状,如何影响碳输入、微生物转化、矿物稳定耦合过程,构建蚂蚁功能性状、碳流路径与 SOC 稳定效应的关联模型,从而明确蚂蚁群落变化对地下碳循环的影响^[75]。

3.2 多元碳示踪解析蚂蚁介导的碳流路径

目前,蚂蚁调控 SOC 的研究仍主要依赖 SOC 含量、微生物量和土壤理化性质等间接指标,对不同来源碳在地下连续转化过程中的真实流向仍缺乏直接定量证据。因此,未来研究需要加强多源生物标志物与稳定同位素技术的综合应用。通过结合木质素酚、脂类标志物、氨基糖等指标,进一步区分植物源碳与微生物源碳对 SOC 形成与稳定的相对贡献^[8,76]。在此基础上,借助 ¹³C、¹⁵N 连续双标记、单体同位素分析、宏基因组和宏转录组技术,动态追踪植物输入碳流经蚂蚁搬运、资源富集、微食物网传递、微生物同化和矿物结合等过程中的迁移路径与分配系数,重点明确蚂蚁活动是否改变植物源碳向微生物源碳的转化效率,以及微生物源碳进入 MAOC 等稳定碳库的比例^[24,77],从而为验证“蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”框架提供直接证据。

3.3 蚂蚁介导微食物网级联与微生物源碳形成机制

未来研究需要突破单一土壤动物功能研究的限制,将蚂蚁作为地下食物网中的关键调控节点,解析蚂蚁与其他土壤动物类群之间的协同和反馈关系。应通过物种排除、添加等组合操纵试验,进一步揭示蚂蚁与蚯蚓、白蚁、马陆、线虫和原生动物等类群之间在资源利用、空间占据、营养级联和生态

工程作用方面的互作机制,明确这些互作如何影响植物源碳向微生物源碳转化及其稳定化过程^[10,30]。尤其需要重点验证蚂蚁对线虫和原生动物等微生物捕食者的调控,是否能够通过地下营养级联改变微生物群落结构、微生物 CUE 和残体形成效率。相关研究将推动土壤动物固碳研究由对单一类群的效应解析向多类群互作调控地下碳稳定的综合理论体系拓展^[10,77]。

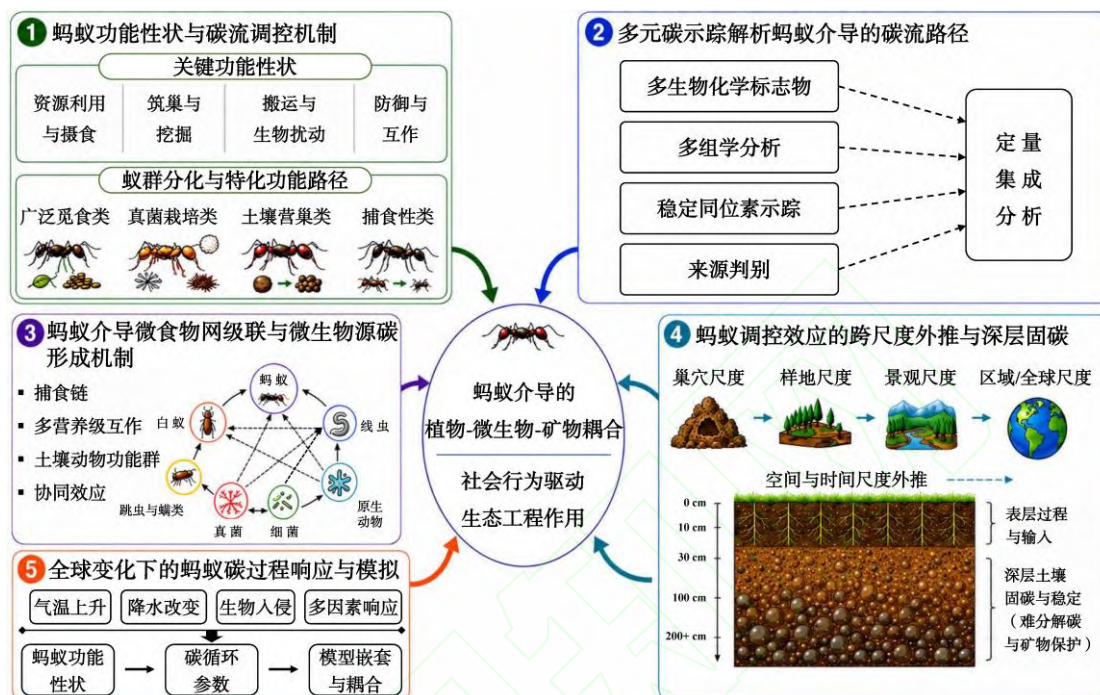


图2 蚂蚁介导植物-微生物-矿物耦合碳循环的未来研究方向
Fig.2 Future research directions for ant-mediated plant-microbe-mineral coupling in soil carbon cycling.

3.4 蚂蚁调控效应的跨尺度外推与深层固碳

蚂蚁活动具有明显的空间斑块特征,其生态影响通常先表现于蚁巢尺度,但可能进一步扩展到景观甚至区域尺度。未来需要结合遥感、无人机测绘和空间模型等方法,建立由蚁巢尺度向景观尺度外推的蚂蚁介导土壤碳调控效应评估体系^[15,44]。此外,部分蚂蚁具有深掘筑巢和长期改造地下结构的能力,拥有影响深层土壤中的碳输入、微生物转化和矿物保护潜力。因此,需进一步关注蚂蚁垂直搬运和结构扰动如何改变深层植物源碳输入位置、微生物源碳形成过程和矿物结合保护潜力^[47],从而拓展对地下隐性碳汇形成机制的认识。

3.5 全球变化下的蚂蚁碳过程响应与模拟

全球变化背景下,升温、降水变化、土地利用转变和外来物种入侵等因素正在改变蚂蚁的地理分布格局、群落组成、筑巢行为、活动强度和资源利用策略。未来需要系统解析这些环境变化如何影响蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合过程,并进一步改变植物碳输入、微生物转化和保护过程效率^[56,64,78]。同时,现有 SOC 过程模型(如 CENTURY、RothC)通常将土壤动物视为黑箱或简化为常量调节因子^[9],尚未充分考虑蚂蚁等关键土壤动物对碳循环过程的主动调控作用。未来应将蚂蚁功能性状、资源迁移效率、扰动强度和微食物网级联参数纳入 SOC 模型体系,实现从土壤动物作为影响因子向土壤动物作为碳循环过程调控模块的转变,提高全球变化背景下陆地生态系统 SOC 动态和固碳潜力预测能力。

4 结 论

基于“植物源与微生物源有机碳耦合转化连续体”视角,本文提出“蚂蚁介导的植物-微生物-矿物耦合”概念框架,强调蚂蚁依托高度组织化的社会性行为,将资源再分配、微食物网调控、生物扰

动和微环境重塑等相互关联的多路径生态过程连接起来,形成影响 SOC 形成与稳定的耦合调控网络。该框架拓展了传统 SOC 形成与稳定理论主要围绕植物输入、微生物转化和矿物保护展开的研究视角,将蚂蚁介导的多过程耦合机制纳入地下碳循环研究体系,为认识社会性土壤动物参与地下碳稳定化过程提供了新的理论视角。然而,当前蚂蚁介导 SOC 调控仍面临功能性状贡献难以量化、多营养级互作机制缺乏直接证据和跨尺度效应预测不足等挑战。未来需结合稳定同位素示踪、多类群操纵试验、多源生物标志物和过程模型模拟,解析蚂蚁介导碳流传递、转化与稳定化的关键机制,完善地下生物过程驱动 SOC 形成与稳定的理论体系,并提升对地下碳循环过程和陆地生态系统 SOC 动态变化的预测能力。

责任编辑 王晓玥

责任编辑 肖红

参考文献

- [1] Jackson RB, Lajtha K, Crow SE, et al. The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48: 419-445
- [2] Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 2013, 19: 988-995
- [3] Lavelle JM, Soong JL, Cotrufo MF. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 2020, 26: 261-273
- [4] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论. *中国科学(地球科学)*, 2021, 51(5): 680-695
- [5] 杨阳, 王宝荣, 窦艳星, 等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 111-123
- [6] Liang C, Schimel JP, Jastrow JD. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105
- [7] Whalen ED, Grandy AS, Sokol NW, et al. Clarifying the evidence for microbial- and plant-derived soil organic matter, and the path toward a more quantitative understanding. *Global Change Biology*, 2022, 28: 7167-7185
- [8] Sokol NW, Sanderman J, Bradford MA. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Global Change Biology*, 2019, 25: 12-24
- [9] Filser J, Faber JH, Tiunov AV, et al. Soil fauna: Key to new carbon models. *Soil*, 2016, 2: 565-582
- [10] Angst G, Potapov A, Joly FX, et al. Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter. *Nature Communications*, 2024, 15: 5005
- [11] Li KY, Song LH, Ran QY, et al. Global meta-analysis reveals differential effects of climate and litter quality on soil fauna-mediated litter decomposition across size classes. *Geoderma*, 2024, 450: 117042
- [12] Angst G, Mueller CW, Prater I, et al. Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass. *Communications Biology*, 2019, 2: 441
- [13] Li YY, Liao JH, Reich PB, et al. Earthworms enhance global soil carbon storage through microbial-mineral stabilization. *Global Change Biology*, 2026, 32: e70815
- [14] Jouquet P, Bottinelli N, Shanbhag RR, et al. Termites: The neglected soil engineers of tropical soils. *Soil Science*, 2016, 181: 157-165
- [15] Schultheiss P, Nooten SS, Wang RX, et al. The abundance, biomass, and distribution of ants on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119: e2201550119
- [16] Lavelle P, Spain A, Fonte S, et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecologica*, 2020, 105: 103561
- [17] Holway DA, Cameron EK. The importance of scavenging in ant invasions. *Current Opinion in Insect Science*, 2021, 46: 39-42
- [18] Del Toro I, Ribbons R, Pelini S. The little things that run the world revisited: A review of ant-mediated ecosystem services and disservices (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*, 2012, 17: 133-146
- [19] Luo BY, Huang M, Wang WY, et al. Ant nests increase litter decomposition to mitigate the negative effect of warming in an alpine grassland ecosystem. *Proceedings B: Biological Sciences*, 2023, 290: 20230613
- [20] Zhou W, Zhan PM, Zeng M, et al. Effects of ant bioturbation and foraging activities on soil mechanical properties and stability. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 46: e02575
- [21] Wang MD, Fan LC, Zamanian K, et al. A meta-analysis of ant-mediated effects on soil carbon cycling and organic matter stability. *Nature Communications*, 2026, 17: 6060
- [22] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528: 60-68
- [23] Angst G, Mueller KE, Nierop KGJ, et al. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108189
- [24] Buckeridge KM, Creamer C, Whitaker J. Deconstructing the microbial necromass continuum to inform soil carbon sequestration. *Functional Ecology*, 2022, 36: 1396-1410
- [25] Kleber M, Bourg IC, Coward EK, et al. Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 402-421
- [26] Wang BR, An SS, Liang C, et al. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108422
- [27] 朱雪峰, 孔维栋, 黄懿梅, 等. 土壤微生物碳泵概念体系 2.0. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 102-110
- [28] Xiao KQ, Zhao Y, Liang C, et al. Introducing the soil mineral carbon pump. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 135-136
- [29] Vidal A, Watteau F, Remusat L, et al. Earthworm cast formation and development: A shift from plant litter to mineral associated organic matter. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 55

- [30] Wu DH, Du EZ, Eisenhauer N, et al. Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions. *Nature*, 2025, 640: 120-129
- [31] Geisen S. The bacterial-fungal energy channel concept challenged by enormous functional versatility of soil protists. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 102: 22-25
- [32] Jiang YJ, Qian HY, Wang XY, et al. Nematodes and microbial community affect the sizes and turnover rates of organic carbon pools in soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 119: 22-31
- [33] Hungate BA, Marks JC, Power ME, et al. The functional significance of bacterial predators. *mBio*, 2021, 12: e00466-e00421
- [34] Farji-Brener AG, Werenkraut V. The effects of ant nests on soil fertility and plant performance: A meta-analysis. *Journal of Animal Ecology*, 2017, 86: 866-877
- [35] 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. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4301-4311
- [36] Liu T, Chen XY, Gong X, et al. Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions. *Current Biology*, 2019, 29: 3420-3429.e5
- [37] Lavelle P, Bignell D, Lepage M, et al. Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 1997, 33: 159-193
- [38] Jouquet P, Dauber J, Lagerlöf J, et al. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32: 153-164
- [39] Dangerfield JM, McCarthy TS, Ellery WN. The mound-building termite *Macrotermes michaelseni* as an ecosystem engineer. *Journal of Tropical Ecology*, 1998, 14: 507-520
- [40] King JR. Where do eusocial insects fit into soil food webs? *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 102: 55-62
- [41] Folgarait PJ. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review. *Biodiversity & Conservation*, 1998, 7: 1221-1244
- [42] Sousa-Souto L, de Jesus Santos DC, Ambroggi BG, et al. Increased CO₂ emission and organic matter decomposition by leaf-cutting ant nests in a coastal environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44: 21-25
- [43] Richter A, Economo EP. The feeding apparatus of ants: An overview of structure and function. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2023, 378: 20220556
- [44] Cammeraat ELH, Risch AC. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. *Journal of Applied Entomology*, 2008, 132: 285-294
- [45] Zhang XH, Zhang ZS, Xin Y, et al. Effects of ant mounds construction on the carbon cycle in a drained peatland, Northeast China. *Catena*, 2024, 243: 108191
- [46] Shukla RK, Singh H, Rastogi N, et al. Impact of abundant *Pheidole* ant species on soil nutrients in relation to the food biology of the species. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71: 15-23
- [47] Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 2018, 332: 161-172
- [48] Fernandez-Bou AS, Dierick D, Swanson AC, et al. The role of the ecosystem engineer, the leaf-cutter ant *Atta cephalotes*, on soil CO₂ dynamics in a wet tropical rainforest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124: 260-273
- [49] Frouz J, Jilková V. The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*, 2008, 11: 191-199
- [50] Wang SJ, Wang H, Li JH, et al. Ants can exert a diverse effect on soil carbon and nitrogen pools in a Xishuangbanna tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 45-52
- [51] Zelikova TJ, Sanders NJ, Dunn RR. The mixed effects of experimental ant removal on seedling distribution, belowground invertebrates, and soil nutrients. *Ecosphere*, 2011, 2: art63
- [52] Nygaard S, Hu HF, Li C, et al. Reciprocal genomic evolution in the ant-fungus agricultural symbiosis. *Nature Communications*, 2016, 7: 12233
- [53] 刘任涛. 干旱半干旱区蚂蚁的生态功能综述. *中国沙漠*, 2024, 44(3): 213-221
- [54] Wu WJ, Liu ZF. Soil food webs regulate carbon persistence across succession. *Global Change Biology*, 2026, 32: e70726
- [55] 刘占锋. 土壤次生代谢产物: 连接微生物残体与土壤有机碳库的生态纽带. *中国生态农业学报(中英文)*, 2026, 34(1): 6-11
- [56] Garc á Ibarra F, Jouquet P, Bottinelli N, et al. Experimental evidence that increased surface temperature affects bioturbation by ants. *Journal of Animal Ecology*, 2024, 93: 319-332
- [57] Domingo Cruz-Labana J, Antonio Tarango-Ar ámbula L, Luis Alc ántara-Carbajal J, et al. Physical and chemical variables of the soil of nests of *Liometopum apiculatum* MAYR in north-central Mexico. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2024, 27: 102214
- [58] Li XR, Gao YH, Su JQ, et al. Ants mediate soil water in arid desert ecosystems: Mitigating rainfall interception induced by biological soil crusts? *Applied Soil Ecology*, 2014, 78: 57-64
- [59] Pielström S, Rocas F. Soil moisture and excavation behaviour in the *Chaco* Leaf-cutting ant (*Atta vollenweideri*): Digging performance and prevention of water inflow into the nest. *PLoS One*, 2014, 9: e95658
- [60] Angst G, Hinkelthein L, Liu Q, et al. Soil mesofauna promote mineral-associated organic matter formation under ambient and future climates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2026, 401: 110294
- [61] Song C, Zi Y, Dignac MF, et al. The role of earthworms in the transformation of labile plant litter into mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 208: 109859
- [62] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1297-1308
- [63] J íkov á V, Macek P, Angst G, et al. Macrofauna amplify plant litter decomposition and stabilization in Arctic soils in a warming climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 188: 109245
- [64] 王郑钧, 王郡军, 肖博, 等. 西双版纳热带森林土壤有机碳积累-分配动态对蚂蚁筑巢活动的响应. *生态环境学报*, 2024, 33(1): 35-44
- [65] Zhang P, Pan YX, Wang ZR. Lower carbon fractions and microbial carbon use efficiency in ant-mound surface soils than in adjacent biocrusted soils of a revegetated desert. *Geoderma*, 2026, 472: 117948
- [66] Mor-Mussery A, Cohen S, Leu S. Interrelation between harvester ant activity, soil fertility, and land management in the arid lands of the Negev Desert, Israel. *Catena*, 2021, 207: 105700
- [67] 李少辉, 王郡军, 张哲, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 413-419
- [68] Wang SJ, Li JH, Zhang Z, et al. Feeding-strategy effect of *Pheidole* ants on microbial carbon and physicochemical properties in tropical forest soils. *Applied Soil Ecology*, 2019, 133: 177-185

- [69] Mora P, Miambi E, Jiménez JJ, et al. Functional complement of biogenic structures produced by earthworms, termites and ants in the neotropical savannas. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1043-1048
- [70] Razavi BS, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 15-22
- [71] Witzgall K, Vidal A, Schubert DI, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, 2021, 12: 4115
- [72] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型. *北京林业大学学报*, 2022, 44 (10): 11-22
- [73] Duan YL, Zhang JB, Petropoulos E, et al. Soil acidification destabilizes terrestrial ecosystems *via* decoupling soil microbiome. *Global Change Biology*, 2025, 31: e70174
- [74] Kuzyakov Y, Friedel JK, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1485-1498
- [75] Bonfanti J, Potapov AM, Angst G, et al. Linking effect traits of soil fauna to processes of organic matter transformation. *Functional Ecology*, 2025, 39: 446-461
- [76] Liang C, Amelung W, Lehmann J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global Change Biology*, 2019, 25: 3578-3590
- [77] Bai Y, Li YB, Du XF, et al. Effects of soil fauna on soil carbon accumulation under organic amendments: Insights from community composition and energy flux. *Applied Soil Ecology*, 2025, 212: 106221
- [78] Li XF, Risch AC, Sanders D, et al. A facilitation between large herbivores and ants accelerates litter decomposition by modifying soil microenvironmental conditions. *Functional Ecology*, 2021, 35: 1822-1832