

韦婧, 蒙欣茹, 涂晨, 梁艳, 邓绍坡, WHITE C. Jason, 骆永明. 野火扰动下土壤有机碳稳定化的结构与界面机制研究进展[J]. 土壤学报, 2026,

WEI Jing, MENG Xinru, TU Chen, LIANG Yan, DENG Shaopo, WHITE C. Jason, LUO Yongming. Advances in Structural and Interfacial Mechanisms of Soil Organic Carbon Stabilization Under Wildfire Disturbance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

野火扰动下土壤有机碳稳定化的结构与界面机制研究进展 *

韦婧^{1,2}, 蒙欣茹^{1,3}, 涂晨^{4†}, 梁艳³, 邓绍坡^{1†}, WHITE C. Jason²,
骆永明⁴

(1. 生态环境部土壤环境管理与污染控制重点实验室, 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. The Connecticut Agricultural Experiment Station, NH 06511, USA; 3. 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004; 4. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘要: 野火是全球变化背景下影响陆地生态系统碳循环的重要自然扰动, 其发生频率和强度的增加正持续改变火后土壤有机碳的迁移、周转与稳定化过程。本文围绕野火后土壤有机碳稳定化的结构与界面机制, 系统综述土壤结构变化、矿物界面反应和微生物过程对火后碳库演化的调控作用。野火首先通过高温燃烧和热解作用造成表层有机碳快速损失, 并引起团聚体解体、孔隙结构重组、土壤斥水性增强和径流侵蚀加剧, 从而改变有机碳的暴露程度、剖面迁移及坡面-沉积区横向再分配。与此同时, 高温诱导的黏土矿物脱羟基化、Fe/Al 氧化物晶化及火生矿物相形成, 可重塑矿物表面反应性和界面结合条件, 进而影响热解溶解性有机质、热解碳、植物源有机质和微生物残体进入矿物保护体系的方式与效率。在生物层面, 火后微生物群落经历由快速重组到代谢策略转向的演替过程, 前期促进活性碳快速周转, 后期则通过酶促氧化、代谢产物释放、残体积累及微生物-矿物电子传递等过程, 推动有机碳由活性态或迁移态向矿物结合和物理保护状态转化。总体上, 火后土壤碳库的演化并非由单一过程控制, 而是结构变化、侵蚀-沉积再分配、矿物界面重构和微生物转化共同作用的结果。系统梳理这些过程及其耦合关系, 有助于深化对火扰动条件下土壤碳稳定化机制的认识, 并为火后碳汇评估和生态系统管理提供理论依据。

关键词: 野火; 土壤有机碳; 矿物结合态有机碳; 热解碳; 微生物-矿物互作; 碳稳定化

中图分类号: X53

文献标志码: A

Advances in Structural and Interfacial Mechanisms of Soil Organic Carbon Stabilization Under Wildfire Disturbance

WEI Jing^{1,2}, MENG Xinru^{1,3}, TU Chen^{4†}, LIANG Yan³, DENG Shaopo^{1†}, WHITE C. Jason², LUO Yongming⁴

* 国家自然科学基金项目(42477049)、生态环境部南京环境科学研究所优秀青年基金项目(ZX2024SZY079)和长三角生态环境保护一体化项目(ZX2023SZY124)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42477049), the Excellent Young Scientists Fund Program of NIES, MEE (No. ZX2024SZY079), and the Integration of Ecological and Environmental Protection in Yangtze River Delta of NIES, MEE (No. ZX2023SZY124)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ctu@issas.ac.cn, dsp@nies.org

作者简介: 韦婧(1987—), 女, 广西河池人, 博士, 研究员, 主要研究方向为污染土壤修复与可持续管理。E-mail: weijing@nies.org

收稿日期: 2026-04-27; 收到修改稿日期: 2026-06-17; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026- - -

(1. Key Laboratory of Soil Environment Management and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. The Connecticut Agricultural Experiment Station, New Haven 06511, USA; 3. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: Wildfire is an important natural disturbance affecting terrestrial ecosystem carbon cycling under global change, and the increasing frequency and intensity of wildfire events are continuously reshaping the migration, transformation, and stabilization of post-fire soil organic carbon. This review focuses on the structural and interfacial mechanisms of soil organic carbon stabilization following wildfire disturbance and systematically synthesizes the roles of soil structural change, mineral interfacial reactions, and microbial processes in regulating post-fire carbon pool dynamics. Wildfire first causes rapid losses of surface soil organic carbon through high-temperature combustion and pyrolysis, while also inducing aggregate breakdown, pore structure reorganization, enhanced soil water repellency, and intensified runoff and erosion. These changes alter the exposure of organic carbon, its vertical migration within soil profiles, and its lateral redistribution from hillslopes to depositional zones. At the same time, thermally induced dehydroxylation of clay minerals, crystallization of iron and aluminum oxides, and the formation of pyrogenic mineral phases can reshape mineral surface reactivity and interfacial binding conditions. These effects do not simply increase or decrease mineral protection, but depend on fire severity, mineral composition, heating duration, and soil background conditions, thereby influencing the pathways and efficiency by which pyrogenic dissolved organic matter, pyrogenic carbon, plant-derived organic matter, and microbial necromass enter mineral protection systems. At the biological level, post-fire microbial communities undergo a successional shift from rapid reassembly to metabolic strategy transition. In the early stage, microbial activity promotes rapid turnover of labile carbon, whereas in later stages, enzymatic oxidation, metabolite release, necromass accumulation, and microbe–mineral electron transfer can drive the transformation of organic carbon from labile or mobile forms toward mineral-associated and physically protected states. Overall, the evolution of post-fire soil carbon pools is not governed by any single process but results from the combined effects of structural disturbance, erosion–deposition redistribution, mineral interfacial reconstruction, and microbial transformation. A systematic synthesis of these processes and their coupling relationships is important for improving mechanistic understanding of soil carbon stabilization under wildfire disturbance and for supporting post-fire carbon sink assessment and ecosystem management.

Key words: Wildfire; Soil organic carbon; Mineral-associated organic carbon; Pyrogenic carbon; Microbe–mineral interaction; Carbon stabilization

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库，其碳储量显著高于植被和大气碳库之和，在维持土壤肥力、调节陆地生态系统功能和缓冲全球变化方面具有重要作用^[1-2]。按照来源、周转速率和稳定性的差异，土壤有机碳通常可划分为颗粒态有机碳（Particulate organic carbon, POC）和矿物结合态有机碳（Mineral-associated organic carbon, MAOC）两大类^[3]。其中，POC 主要来源于植物残体及其早期分解产物，周转较快，对环境变化响应敏感；MAOC 则更多来源于微生物转化产物及其与矿物结合形成的复合体，具有更长的滞留时间和更高的稳定性^[3-4]。不同碳组分在形成途径、迁移方式和稳定机制上存在显著差异，阐明土壤有机碳不同组分的转化、迁移与稳定过程，是认识土壤碳汇功能及其变化规律的基础。

野火是全球变化背景下影响陆地生态系统结构与功能的重要自然扰动之一^[5]。在气候变暖、极端天气事件频发以及人类活动加剧的共同作用下，野火的发生频率和强度均呈上升趋势，已成为驱动土壤碳库变化的重要因素^[6-7]。野火对土壤碳库的影响主要通过直接和间接两条路径实现。直接路径表现为高温燃烧和热解作用迅速矿化表层有机质，造成土壤有机碳的即时损失，并改变不同碳组分的相对比例^[8]。在这一过程中，热解碳（Pyrogenic carbon, PyC）作为野火作用下形成的特殊碳组分，因其高度芳香化结构和相对较强的化学惰性，成为火后土壤碳库的重要组成部分^[9-10]。间接路径则表

现为野火通过改变土壤物理结构、矿物组成和微生物过程,在更长时间尺度上持续调控碳的迁移、周转与稳定化^[7]。

相比燃烧直接造成的碳损失,野火对土壤有机质稳定化的长期影响更为复杂。火后团聚体破碎、孔隙连通性改变以及水分运动受阻,都会改变有机碳在土壤中的暴露程度和迁移路径^[11-12]。与此同时,高温作用和灰分输入可进一步诱导矿物组成改变和表面反应性重构,从而改变有机碳在矿物表面的吸附、络合和共沉淀方式,影响其进入稳定碳库的效率^[13-14]。对于土壤生物,野火还会扰动微生物群落结构与代谢活动,改变胞外酶表达、代谢产物释放及微生物残体积累过程,进而影响有机-矿物复合体的形成与维持^[15-16]。这表明,火后土壤碳库的演化并非仅由短期燃烧损失决定,而是受到土壤结构变化、矿物界面反应和微生物转化等多过程共同调控。

近年来,关于火后土壤碳组成变化、矿物结合态碳形成以及微生物响应的研究取得了重要进展,但对野火扰动下土壤碳稳定化过程的系统认识仍然不足。现有研究多关注土壤结构变化、矿物相演变或微生物功能响应的某一方面,而对三者如何共同调控土壤有机碳稳定化缺乏统一认识^[8]。同时,火后土壤碳库的变化不仅表现为总量升降,还涉及 POC、MAOC、PyC 以及热解溶解性有机质 (Pyrogenic dissolved organic matter, pyDOM) 等不同碳组分在剖面中的迁移、再分配及转化过程,这仍缺乏系统梳理^[11, 17]。此外,现有土壤碳循环模型多基于短期观测数据构建,尚难准确表征火后土壤碳库在年际至年代尺度上的恢复轨迹与演化过程,这也限制了对野火扰动效应的机制模拟和碳汇评估。基于此,本文围绕野火后土壤有机碳稳定化这一主线,重点综述土壤结构变化、矿物界面反应和微生物过程对火后碳迁移、转化与保存的影响,进一步分析 PyC 及其与矿物、微生物耦合的多尺度机制,并在此基础上总结当前研究中的关键不足与未来发展方向,以期理解野火扰动下土壤碳库演化及其生态效应提供系统参考。

1 野火扰动下土壤结构与矿物界面过程对有机碳稳定化的作用

野火后土壤有机碳的稳定化,首先受到土壤结构和矿物界面条件的共同制约。土壤结构决定有机碳是否暴露于分解环境、能否随水分和细颗粒发生迁移;矿物界面则决定这些有机组分能否通过吸附、络合或共沉淀进入相对稳定的矿物保护体系。因此,理解火后土壤有机碳的演化,既需要关注结构破坏与恢复过程,也需要关注矿物界面反应环境的变化及其与微生物过程的衔接。

1.1 野火引起的土壤物理结构变化及其对碳暴露与迁移的影响

野火对土壤有机碳稳定化的影响,首先表现为物理结构破坏及由此引起的碳暴露和迁移变化。高温是火后土壤结构改变的主要驱动力。已有研究表明,当加热温度超过约 250 °C 时,土壤团聚体稳定性、阳离子交换量和持水能力开始明显下降,在 250~450 °C 区间变化最为显著,主要表现为团聚体解体、体积密度升高和水稳性下降等特征^[18]。团聚体的破坏会使土壤颗粒结构趋于松散,并打乱原有孔隙网络的组织和连通性,进而改变土壤对水分和溶质的滞留与传输能力,最终影响有机碳在土壤剖面中的空间分布和停留时间^[19]。

野火后,土壤有机质热解和矿物相变还会进一步改变孔隙结构与水分运动特征。大量研究表明,受野火影响的土壤往往表现为入渗速率降低、水力传导性改变以及表层壳化增强,这些变化会削弱土壤对降雨的缓冲能力,并增加地表径流与侵蚀风险^[20]。孔隙连通性和孔径分布的改变不仅影响水分下渗和气体扩散,也会通过改变有机碳与微生物及胞外酶的接触机会,间接影响其生物可及性。土壤斥水性是火后碳迁移过程中的另一个重要控制因素。高温条件下形成的疏水性有机膜覆盖矿物和团聚体表面,使土壤表层短期内表现出显著斥水性,进而抑制水分入渗并延缓微生物群落恢复^[21-22]。斥水性增强及入渗能力下降不仅改变垂直方向的水分运动,也会通过增加坡面径流和泥沙输出,强化火后的横向迁移与再分配过程。火后植被覆盖减少、枯落物层破坏以及团聚体稳定性下降,使

富含有机碳的细颗粒和热解形成的 PyC 更易被径流携带,并由坡面上部向坡脚、沟道及低势位沉积区迁移^[23]。严重火烧后首年泥沙产量可较火前增加 1~3 个数量级,说明火后侵蚀过程能够在短时间内输出大量表层土壤物质^[24]。在山地火烧流域中,侵蚀还可导致土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 发生显著横向再分配,使部分坡面土壤碳转移至坡脚和河道沉积环境,进而影响流域尺度碳收支评估^[25]。对于 PyC 而言,火后形成的炭质颗粒虽具有较高化学稳定性,但并不一定固定于原位。粒径较小的 PyC 更易随悬移质和泥沙向河流及沉积环境迁移,其迁移强度通常受降雨强度、径流系数、坡度、植被恢复状况以及斥水性持续时间等因素共同控制^[24, 26]。

侵蚀-沉积过程由此成为连接坡面结构破坏与沉积区碳保存的重要途径。在侵蚀区,团聚体破坏和颗粒剥离会增加原本受物理保护有机碳的暴露程度,提高微生物分解和进一步输出的风险;而在沉积区,细颗粒、有机质以及 Fe/Al 氧化物往往同步富集,埋藏作用可降低有机碳与微生物的接触机会,并通过矿物结合和新团聚体形成促进部分碳的再稳定化^[27-28]。因此,火后碳库变化不仅取决于局地 SOC 含量变化和剖面垂向迁移过程,还受到坡面尺度侵蚀输出、沉积再分配以及 SOC 和 PyC 最终归趋的共同影响。近年的火后坡面调查结果进一步印证了这一认识。针对 2024 年雅江火灾的研究表明,火后坡面土壤可形成高温燃尽层、强斥水层和相对未受明显影响层,其中高温层和强斥水层可沿坡面向沟道搬运,并在局部形成堆积物,成为火后早期物质再分配和沟道侵蚀的重要来源;同时,土壤有机质变化主要受峰值温度控制,而非单纯受热持续时间控制^[29]。

因此,火后土壤结构变化对碳稳定化具有双重效应。一方面,团聚体解体会暴露原先处于物理保护状态的有机碳,使其更易受到微生物和胞外酶的作用,从而加速矿化损失^[22];另一方面,火后部分残留有机质和 PyC 可随着团聚体重组重新进入受保护的结构单元^[10]。微尺度 X 射线计算机断层成像 (Micro-Computed tomography, Micro-CT) 和 PyC 空间分布研究表明,火后坡面及冲沟沉积区常形成 PyC 富集的微团聚体和“碳热点”,在这些微环境中,细孔网络可通过空间包埋降低 PyC 及相关有机组分的微生物和酶可及性,而 Fe/Al 氧化物则可通过表面吸附、阳离子桥联和共沉淀等作用增强芳香族有机组分与矿物界面的结合。因此,PyC 与细孔结构和反应性 Fe/Al 氧化物的共同富集,并不只是空间上的“共存”,而是物理隔离与界面固定共同作用的结果,有助于提高其长期保存潜力及向 MAOC 库转化的可能性^[24-25]。总体而言,野火引起的土壤物理结构变化会通过改变团聚体稳定性、孔隙特征和水分运动及侵蚀-沉积过程,持续影响碳在土壤中的迁移路径及其后续稳定化过程。与此同时,这些变化也会改变矿物界面的反应环境,而高温条件下矿物结构和表面性质如何变化,将进一步影响火后有机碳在矿物界面的结合方式。

1.2 高温作用下矿物结构与界面反应性的重塑

在结构条件改变的同时,高温还会重塑矿物相组成和表面反应性。与团聚体和孔隙控制的物理保护不同,矿物界面过程主要决定有机碳能否通过吸附、络合或共沉淀进入更稳定的 MAOC 库。因此,火后矿物结构与界面性质的变化,是连接有机碳迁移、转化和长期保存的重要环节。

高温首先会改变黏土矿物和金属氧化物的晶体结构及反应位点。一般认为,当温度达到 300~400 °C 时,高岭石、伊利石等黏土矿物开始发生脱羟基化反应,形成大量结构缺陷位点,从而提高矿物表面的反应活性^[30]。同时,高温过程还可促进 Fe/Al 氧化物由无定形态向赤铁矿、针铁矿等晶态矿物转化,使 Fe(III)/Fe(II) 比例、八面体配位环境以及表面官能团构型发生重组^[31-32]。近期研究进一步表明,野火后表层灰分和土壤中可短期形成磁赤铁矿、赤铁矿及多种锰氧化物等火生矿物相,但这些矿物在后续恢复过程中可能因侵蚀、向深层迁移和化学风化而逐步消失;与此同时,微生物和根系分泌的配体还可增强 Fe、Mn 的活化^[32]。

这些变化会直接影响有机碳在矿物表面的结合方式。一方面,表面极性官能团数量减少可能削弱矿物对羧基、酚羟基等极性有机质的吸附能力;另一方面,晶面暴露度增加和表面疏水性增强,又可增强矿物对芳香结构与热解产物的亲和力,使火后形成的 PyC 和部分缩合有机组分更易在矿物表面富集和稳定^[32]。此外,火后灰分输入还会改变矿物表面的离子环境,并通过 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+}

和 Al^{3+} 等阳离子的桥联作用, 影响有机质与矿物之间的结合强度。由此可见, 高温对矿物界面反应性的影响并非单向增强或削弱, 而是取决于矿物反应位点生成、表面官能团损失和离子环境改变之间的相对平衡。

这种平衡进一步表现为明显的火强度依赖性和非线性阈值效应。在中等温度作用下, 黏土矿物脱羟基化、无定形 Fe/Al 氧化物活化和火生矿物形成可能增加表面缺陷位点和反应位点, 此时矿物对含氧官能团丰富的溶解性有机质 (Dissolved organic matter, DOM)、微生物代谢产物以及部分氧化 PyC 的吸附固定作用可能占优。相反, 在更高温度或持续受热条件下, 黏土层状结构坍塌、比表面积下降以及 Fe/Al 氧化物晶化会减少高反应性位点, 使矿物保护能力转而减弱。高强度野火常被认为在约 600 °C 以上更容易造成这类结构破坏和晶化转化, 但这一温度并非适用于所有土壤的固定阈值, 其实际效应会随黏土矿物类型、Fe/Al 氧化物形态、有机质含量、含水状态和受热持续时间而变化^[33-34]。例如, 富含无定形 Fe/Al 氧化物或短程有序矿物的土壤, 可能在中等火强度下表现出界面反应性增强; 而以层状硅酸盐为主且经历高温持续加热的土壤, 则更容易出现矿物保护能力下降^[11]。因此, 火后矿物结构与界面反应性的变化实质上重塑了有机碳在矿物表面的吸附、固定与稳定化条件, 也决定了不同碳组分在火后环境中的归趋。

1.3 野火后有机碳向矿物保护体系的转化及其稳定化

随着火后矿物结构和界面反应性的调整逐步显现, 矿物在火后环境中重新建立起对有机碳的保护作用。这种保护既包括微团聚体形成和孔隙包埋等物理过程, 也包括界面吸附、配位络合和共沉淀等化学过程, 两者共同推动火后土壤碳库向新的稳定状态演化。

从物理保护看, 火后恢复过程中形成的细颗粒集合体和微团聚体, 可为残留有机质、PyC 和部分微生物残体提供新的包埋空间。野外长期监测表明, 火后 3~5 年 MAOC 含量逐渐提高, 说明火后碳库恢复并不只是有机质输入增加的结果, 也与矿物结合过程和结构恢复密切相关。与此一致, 在美国南加州 Cleveland 国家公园森林火烧迹地开展的恢复序列研究表明, 野火造成的 POC 和 MAOC 损失可持续 4 年以上, 其中 POC 在火后即刻下降约 50%, MAOC 下降约 33%, 说明火后碳库恢复并非短期完成, 而是受后续植被恢复、微生物周转和矿物保护过程共同调节^[8, 33]。这一过程的重要性在于, 它使原本暴露于分解环境中的有机碳重新转入受物理限制和界面限制共同控制的保存状态。除物理包埋外, 火后矿物表面的化学保护更直接决定有机碳进入稳定库的效率。反应性矿物可更有效地固定热解溶解性有机质中的酚类、醌类和芳香族组分, 这些分子在火后具有较强迁移性, 能够随下渗和径流过程较快接触矿物活性表面, 并通过配位交换、阳离子桥联和氢键等作用转入矿物结合态, 从而延长其在土壤中的滞留时间并提高进入 MAOC 库的可能性^[8, 30]。已有研究表明, 火后产生的 pyDOM 的芳香性和氧化还原活性普遍增强, 这进一步影响了其与矿物表面的结合行为。分子尺度研究还表明, 火后土壤 DOM 中炭化残体和芳香族组分比例上升, 其在沿土壤剖面下移过程中分子组成仍会持续调整, 这一过程提高了其接触矿物活性表面的机会, 并增强了其由游离态向矿物结合态转化的可能性^[35]。对火后碳稳定化而言, 这一过程的关键不在于单纯减少分解, 而在于将具有较高迁移性的活性有机组分转入矿物保护体系。在这一过程中, PyC 构成了火后碳库中更为持久的一部分。在低势位沉积环境中, PyC 更容易与细颗粒物质和 Fe/Al 氧化物共同保存; 而这些低势位环境通常富含细颗粒物质和 Fe/Al 氧化物, 更有利于形成稳定的热解碳-矿物复合结构^[17]。核磁共振 (^{13}C NMR) 研究表明, 火后土壤中芳香碳比例显著升高, 这部分碳组分不仅构成火后碳库的重要组成部分, 也往往与 MAOC 的增加相联系^[36]。因此, 火后矿物介导的保护并不只作用于可溶性有机组分, 也通过对颗粒态热解碳的固定和保存, 持续影响多年尺度上的土壤碳积累与维持^[37]。

火后矿物介导的有机碳保护并非单一过程, 而是由多种物理化学机制共同驱动。相关机制、主要作用对象及其控制因素归纳至表 1。需要注意的是, 矿物介导的保护作用并不会持续增强。随着野火频率增加, Fe/Al 氧化物可能逐渐向结晶程度更高、反应性更低的矿物转化, 从而削弱对有机碳的吸附和固定能力^[38]; 同时, 植被恢复滞后也会减少根系分泌物和菌根真菌输入, 降低微生物-矿物协

同作用的强度，进而限制新有机-矿物复合体的持续形成^[17]。因此，矿物介导的物理化学保护既受火后矿物表面性质控制，也受后续生态恢复过程制约。只有当界面反应性维持、碳源持续输入和结构恢复三者相互配合时，火后土壤碳库才更可能向稳定化方向演化。

表 1 野火后矿物介导的有机碳保护机制、主要作用对象及其控制因素

Table 1 Mineral-mediated organic carbon protection mechanisms after wildfire, their main targets, and controlling factors

机制类型 Protection mechanism	主要作用对象 Main targets	关键控制因素 Controlling factors	稳定化效果 Stabilization effect	参考文献 References
物理包埋	残留有机质、PyC、 部分微生物残体	团聚体重组、细颗粒比例、孔隙 结构、沉积环境	降低生物可及性，延长有机 碳在土壤中的滞留时间	[25, 28]
界面吸附	pyDOM、芳香族溶解性组 分、微生物来源小分子有 机质	矿物比表面积、表面电荷、官能 团类型、土壤 pH	促进活性碳由游离态向矿物 结合态转化	[28,32, 35]
配位络合与共沉淀	含羧基/酚羟基的有机分 子、部分 pyDOM、微生物 残体	Fe/Al 氧化物活性、多价阳离子、 氧化还原条件	形成较稳定的有机-矿物复合 体，是 MAOC 形成的重要途 径	[32-33,39]
矿物-微生物协同保护	微生物残体、胞外多糖、 根系输入衍生碳	植被恢复、根系分泌物、菌根活 性、土壤水分与养分有效性	持续补充稳定碳前体，增强 矿物结合与结构保护	[8,17,34]

2 野火后微生物响应及其对土壤碳周转的调控

微生物是土壤碳循环的核心驱动力，其代谢活动不仅调控有机质的分解、转化和再合成速率，也决定有机碳向稳定库转化的路径和效率。野火扰动显著改变土壤理化性质和底物组成，打破原有的微生物群落结构与功能平衡，并推动其向新的代谢状态和生态策略转变。总体而言，火后微生物响应具有明显阶段性：短期表现为群落损伤与快速重组，中期表现为底物利用方式和功能基因表达的调整，长期则表现为微生物残体积累及其进入矿物保护体系。因而，微生物既可能加速火后活性碳损失，也可能通过残体碳积累和有机-矿物复合体形成参与稳定碳库重建。

2.1 野火后短期扰动驱动微生物群落结构快速重组

野火对微生物群落的初始影响主要受野火强度、持续时间及恢复时长的控制。高强度野火可使土壤表层温度超过 400 °C，直接杀灭大部分热敏感性微生物，导致微生物生物量急剧下降并促发群落结构重组^[40]。相比之下，低强度野火仅引起部分功能群丰度的短期波动，而不彻底破坏群落结构^[41]。

火后数周至数月内，微生物群落进入快速调整阶段。耐热类群如放线菌和变形菌门往往显著富集，部分革兰氏阴性细菌的 *rrn* 操纵子拷贝数升高，代谢活性增强，群落策略由寡营养型、竞争维持的 K-策略向富营养型、快速增殖的 r-策略转变^[16, 33]。这一转变与 pyDOM 脉冲式输入密切相关，也反映出微生物对资源快速释放的敏感响应^[30]。

不同生态系统中，微生物对野火的响应并不完全一致。低强度火灾甚至可能促进特定功能群的生长。在温带森林中，火后土壤 pH 升高和铵态氮释放可刺激革兰氏阴性细菌和放线菌增殖；而在草原生态系统中，计划性烧除通过减少凋落物积累和改善土壤通气，维持部分功能菌群的多样性和稳定性^[15]。这些差异说明，火后微生物响应不仅取决于野火强度，也受植被类型、土壤理化性质和资源供给条件共同影响。从恢复过程看，细菌和真菌表现出明显不同的时间尺度。细菌群落通常在 3 至 6 个月内可恢复至扰动前多样性的 60%~80%，而真菌群落恢复时间则超过一年^[33-34]。这与两类微生

物的生理特征和生态依赖性有关：细菌世代时间较短，可迅速利用火后释放的无机养分和易降解碳源实现数量回升；真菌菌丝结构对高温更为敏感，其恢复通常依赖于植被重建、根系输入和共生网络的重新建立^[42]。若野火导致植被组成发生改变，与之相关的共生微生物功能群也会随之更替，从而进一步影响火后土壤碳循环路径与效率^[13]。

需要指出的是，微生物多样性的较快恢复并不意味着生态功能同步恢复。多样性指标主要反映物种丰富度或群落组成的结构性回升，而碳氮循环功能还取决于优势类群更替、功能基因表达、底物供给和矿物界面条件等过程。近年的火后恢复研究也表明，微生物群落的变化具有明显的持续性。例如，在大型火灾后 3~4 年的恢复过程中，细菌群落功能轨迹仍在变化，第 3 年以厌氧分解类群增加为特征，第 4 年则表现为硝化菌和固氮菌增加^[43]。这说明火后微生物恢复并不是简单回到扰动前状态，而是经历一个由结构恢复到功能重组的连续过程。因此，火后细菌群落可能在数月内表现出多样性回升，但其结构功能及碳氮循环相关过程仍可能需要数年才能重新趋于稳定。

2.2 野火扰动下微生物代谢策略与功能基因表达重构

在群落结构快速重组之后，微生物对底物的利用方式和代谢通路也会发生明显调整。野火高温可热解部分有机质，释放糖类、氨基酸和短链脂肪酸等易降解碳源，这些底物会优先刺激糖苷水解酶（GHs）和 β -葡萄糖苷酶（bglX）等分解酶相关基因的表达，从而支持微生物对短期释放活性底物的快速利用^[15]。在这一阶段，土壤呼吸通量显著增加，大量活性碳以 CO_2 形式损失^[13, 34]。田间研究表明，野火后活性碳组分在季节尺度上的重新分配与微生物由 K-策略向 r-策略转变密切相关，这种变化不仅表现为短期呼吸增强，也反映在不同季节和不同土层活性碳库分配格局的变化上^[16]。

随着易降解底物逐渐耗竭，微生物代谢重点开始转向更难利用的芳香族和缩合有机组分。与木质素和 PyC 氧化分解相关的多酚氧化酶、过氧化物酶等氧化酶表达增强^[38-39]，部分白腐真菌中与 PyC 缓慢分解相关的基因簇也会被激活^[44]。这些功能变化并不代表 PyC 被快速彻底分解，而更多表现为对其表面或边缘结构的缓慢氧化、官能团变化和部分解聚，氧化后产物一部分矿化，一部分因含氧官能团增加更易与 Fe/Al 氧化物结合并进入 MAOC。这意味着，火后微生物代谢并非简单减弱，而是在不同恢复阶段针对底物性质发生转向：前期侧重快速利用活性碳源，后期则逐渐适应芳香族和难降解组分占优的环境。

矿物界面条件的变化也会进一步影响微生物代谢策略。火后铁氧化物的反应性和氧化还原状态发生变化后，部分铁还原菌（如 *Geobacter*）可增强与胞外电子传递相关基因的表达，以利用高温改性的铁氧化物作为电子受体；而当氧气重新进入土壤，铁氧化菌（如 *Gallionella*）则可能通过促进铁氧化过程，间接增强新生铁氧化物对有机碳的固定能力^[13, 41]。与此同时，一些细菌还会通过增强胞外多糖和表面活性蛋白的合成，提高其在矿物表面的附着和聚集能力，从而促进有机-矿物复合体形成^[45]。火后微生物功能重构不仅决定有机质被分解的速率，也影响不同碳组分进入矿物结合和长期稳定化的途径。因此，火后微生物代谢策略的变化不仅反映在底物利用偏好上，也体现在其与矿物界面的相互作用方式上。

2.3 微生物残体积累及其对稳定碳库重建的长期贡献

微生物对野火后碳循环的影响并不止于分解过程，其残体积累同样是火后碳库重建的重要环节。火后早期 r-策略微生物快速增殖和死亡，使大量残体碳进入土壤体系，其中的肽聚糖、脂多糖等结构性分子较易与矿物表面发生吸附或共沉淀，从而形成相对稳定的有机-矿物复合体。已有研究表明，微生物残体碳可占 SOC 的重要比例，部分综合评估甚至显示其贡献可超过 SOC 的 1/2^[45-46]，这说明微生物残体并非短暂的中间产物，而是稳定有机碳形成的重要来源之一。与此同时，MAOC 的来源并不局限于微生物残体。植物残体分解形成的低分子量可溶性有机物、根系分泌物以及部分氧化后的植物源有机分子，也可通过直接吸附或经微生物转化后进入矿物保护体系^[47-48]。因此，火后 MAOC 形成应理解为植物输入、微生物转化和矿物保护共同作用的结果；其中，植物源有机质提供初始碳源，微生物转化提高其与矿物结合的可能性，而矿物表面则决定这些碳组分能否被长期保存^[16]。

从更长时间尺度看, 火后碳库恢复的程度取决于植被恢复、微生物残体积累和矿物保护能否重新形成连续过程。植被恢复可增强凋落物和根系输入, 为微生物提供持续底物, 并促进有机-矿物复合体更新^[15]; 但频繁野火可能反复中断植物输入和微生物-矿物互作, 使稳定碳前体难以持续积累。已有研究指出, 微生物残体对 SOC 或 MAOC 的贡献并非固定比例, 而会随恢复阶段、植被类型、底物质量、矿物组成和土壤 pH 等条件变化。基于全球数据的定量评估表明, 微生物残体碳可占 SOC 的重要比例, 但不同生态系统间差异明显, 其保存效率受矿物保护能力和环境条件共同调控^[47]。与此同时, 植物源有机质也可通过直接吸附或经微生物转化后进入 MAOC 库。微生物效率-基质稳定 (Microbial Efficiency-Matrix Stabilization, MEMS) 框架及后续研究均表明, 植物输入的化学性质、微生物转化效率和矿物基质保护共同决定有机碳进入矿物结合库并长期保存的潜力^[48-49]。一般而言, 富含反应性黏土矿物和 Fe/Al 氧化物的土壤更有利于残体碳保存, 而在植被恢复较快、根系分泌物输入充足或矿物表面存在大量可利用位点的条件下, 植物源低分子量有机物也可直接参与 MAOC 形成。相反, 当植被恢复缓慢、底物供给不足或矿物反应位点受限时, 植物源有机质和微生物残体进入 MAOC 库的效率都会下降。总体而言, 火后 MAOC 的形成来源于植物输入、微生物转化和矿物保护的共同作用, 不同来源碳组分的贡献会随环境条件和恢复进程而变化。火后微生物群落重组、代谢策略转向及残体进入稳定碳库的阶段关系如图 1 所示。

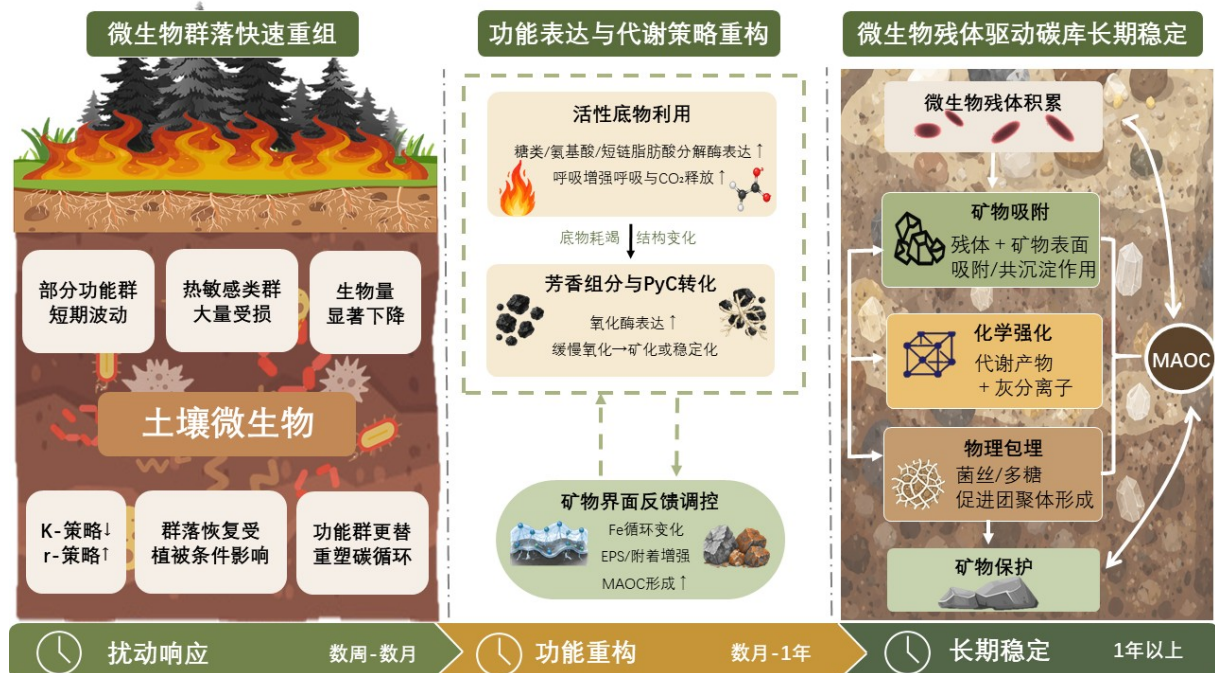


图 1 野火扰动下土壤微生物响应与碳稳定机制

Fig. 1 Soil microbial responses and carbon stabilization mechanisms under wildfire disturbance

3 微生物-矿物界面互作在有机碳稳定化中的关键作用

微生物代谢产物和残体碳是火后稳定碳形成的重要前体, 其后续保存与转化在很大程度上取决于矿物界面的反应过程。火后土壤中的微生物-矿物互作并非单一吸附或简单附着, 而是涉及电子传递、络合沉淀、颗粒聚集和复合体组装等多个层面的连续过程。这些过程共同影响有机碳在土壤中的转化路径、赋存形态及其长期稳定性。微生物不仅参与有机质的分解、再合成和残体生成, 还可通过代谢产物改变矿物表面性质和局部氧化还原环境^[50]; 矿物则既为有机碳和微生物残体提供结合

位点,也通过调节养分和电子受体供给影响微生物群落功能^[51]。因此,火后有机碳稳定化应被视为一个由碳前体生成、界面反应调节、复合体形成、长期保存组成的连续过程。

3.1 微生物代谢产物进入矿物保护体系的界面过程

微生物代谢产物是连接有机质与矿物界面的重要化学组分,其关键作用不仅在于增加可结合的有机组分,更在于通过改变矿物表面电荷、润湿性和局部反应条件,重塑有机碳进入矿物保护体系的界面环境。野火显著改变土壤底物组成和养分供给格局后,微生物代谢通量和产物谱系也随之调整,从而影响有机碳进入矿物保护体系的路径与效率。火后早期,微生物为适应升高的 pH、无机离子脉冲和底物质量下降等环境变化,通常会增强低分子有机酸的合成与分泌。草酸、柠檬酸等有机酸可与灰分输入的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及土壤中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等金属离子发生络合或共沉淀反应,促进次生矿物相或 Fe/Al 氧化物-有机质复合体,使部分有机碳更容易被固定在矿物表面或无定形氧化物相^[32]。热重分析、红外光谱及质谱联用研究表明,经矿物结合保护的土壤有机质在升温过程中具有更高的分解起始温度和更集中的放热峰,说明微生物来源有机组分一旦进入矿物保护体系,其热稳定性会明显增强^[32, 37]。

除低分子有机酸外,胞外多糖、蛋白质和表面活性分子等高分子代谢产物同样参与界面过程。这些物质可在矿物颗粒和有机分子之间形成连续的黏结层,通过改变矿物表面电荷与润湿性,增强有机质在界面上的附着与滞留,并为后续复合体形成提供分子基础^[35]。因此,微生物代谢产物的关键作用不只是增加有机质,更在于重塑矿物表面的反应环境,使原本处于游离态或高迁移性的有机组分更容易转入矿物保护体系。

多尺度表征技术为上述矿物-有机碳互相作用过程提供了直接证据。针对 2024 年雅江火灾的研究中,利用扫描电子显微镜结合能谱分析发现,火后表层土壤中常形成富含灰分和金属氧化物的薄层结构,其内可识别到纳米级有机-铁铝复合颗粒,C、O、Fe、Al 信号在这些颗粒中高度共定位,指示有机配体参与了矿物相的共沉淀与包裹过程^[52]。同时,C、N 元素的同步辐射 X 射线近边谱解析和热解场电离质谱(py-FIMS)实验表明,在 300~500 °C 区间,不饱和取代芳香碳和含氮芳香碳相对富集,而羧基碳、脂肪族和多糖组分逐渐衰减,这种分子组成变化使有机质更易与 Fe/Al 氧化物发生配位和 π - π 相互作用,从而提高其进入稳定库的可能性^[33, 38]。总体而言,界面反应决定了微生物来源碳前体能否由活性态或迁移态转入矿物结合态,是火后稳定化过程中的关键筛选环节。

3.2 微生物电子传递与矿物氧化还原动态对界面反应的调节

除分子络合与共沉淀外,火后土壤中微生物与矿物之间的电子传递过程也会持续改变界面反应条件。矿物不仅是有机质的重要吸附载体,也是微生物代谢过程中的关键电子受体与供体。高温作用及后续水文和氧化还原环境的变化,可驱动 Fe/Al 氧化物在不同价态之间转换,暴露新的反应位点,并改变其与有机质和养分元素的结合方式^[53]。因此,电子流动并不是附属于碳转化的次要过程,而是界面反应性变化的重要来源。

火后输入的 pyDOM 中往往富含酚类、醌类和共轭芳香结构,这些分子具有较强的氧化还原活性。环境基因组和反应组学研究表明,这类组分的输入可增强微生物群落中与氮代谢、反硝化和有机物氧化相关的功能通路,促进有机质、矿物与微生物之间的电子传递^[53]。其中,醌类结构可作为典型的电子穿梭介质:微生物在代谢过程中将电子传递给醌类分子,使其转化为还原态;还原态醌类随后又可将电子传递给 Fe(III)氧化物,促进 Fe(III)向 Fe(II)转化。当氧气或其他氧化剂重新进入土壤时,Fe(II)可再次被氧化并形成新的铁氧化物表面。由此形成的“微生物-pyDOM-铁氧化物”电子传递过程,会不断改变铁氧化物的价态、表面羟基位点和反应性,从而影响其对 pyDOM、微生物残体和氧化 PyC 等有机组分的吸附、桥联与共沉淀能力。最新研究也表明,pyDOM 可显著增强环境中 DOM 反应活性并重塑氮代谢过程,说明其在火后土壤中不仅是可利用的底物,也可作为反应性分子参与电子与物质再分配^[54]。

部分功能类群对这种界面氧化还原变化表现出明确响应。当火后铁氧化物反应性增强或价态发

生变化时,铁还原菌如 *Geobacter* 可增强与胞外电子传递相关基因的表达,并利用改性的铁氧化物作为电子受体;而在氧气重新进入土壤、局部氧化条件恢复后,铁氧化菌如 *Gallionella* 则可能通过促进 Fe(II)氧化,推动新生铁氧化物形成^[17]。这一还原-再氧化过程不仅影响微生物能量代谢,也会通过矿物相转化和表面位点更新,改变矿物对有机碳的固定能力。因此,微生物电子传递并不是孤立的代谢过程,而是连接 pyDOM 反应性、铁氧化物转化和有机碳界面保存的重要机制。

这一氧化还原过程还与 N、P 等养分循环高度耦合,并通过竞争吸附、位点重排和资源供给变化间接影响有机阴离子和微生物残体在矿物表面的结合效率。长期火后恢复序列研究发现,重度野火五年后,冷温带针叶林土壤总磷和无机磷升高,而有机磷下降;同时,正磷酸盐与肌醇六磷酸的吸附容量增强,并与 Fe/Al 氧化物含量和 SOM 水平密切相关^[33]。这说明,矿物-养分界面反应不仅影响植被和微生物恢复所需的资源供给,也会通过竞争吸附和表面位点重排,改变有机阴离子在矿物表面的结合机会^[27, 32]。此外,稳定同位素示踪与结构方程模型研究表明,火后土壤中硝化与反硝化过程的增强,常伴随以热解有机组分为电子供体或介质的脱氮途径强化,这些变化可能进一步影响矿物表面的吸附位点更新,从而间接改变碳封存空间^[55]。总体上,微生物电子传递与矿物氧化还原动态并不直接形成稳定碳库,但持续改变着矿物相状态、界面反应位点及养分循环背景,从而为后续有机碳固定和复合体形成提供动态条件。

3.3 有机-矿物复合体多尺度形成机制及其稳定化模式

微生物代谢过程与矿物反应性的协同作用,最终会体现在多尺度有机-矿物复合体的形成与演化上。分子和纳米尺度上的络合、吸附与氧化还原过程,为更大尺度的颗粒聚集和结构组装奠定了基础,也决定了火后有机碳最终以何种形式进入稳定库。

在分子与纳米尺度上,微生物代谢产物、微生物残体以及火后形成的芳香有机组分可在矿物表面发生定向吸附和配位,形成单分子层或纳米级薄膜^[8]。其中,多肽、脂多糖和芳香族有机分子可通过内配位或氢键作用与 Fe/Al 氧化物紧密结合,降低有机碳对胞外酶和氧化剂的可达性,这一界面尺度的结合被认为是 MAOC 形成的最初环节^[43, 45]。

在微米尺度上,胞外多糖与真菌菌丝等高分子聚合物发挥胶结剂作用,将有机残体、热解碳和矿物颗粒桥联为稳定的微团聚体。扫描电子显微镜和 X 射线断层成像研究表明,火后土壤中真菌菌丝及其分泌物构成了微团聚体的重要骨架,不仅增强了颗粒间的物理连结,也扩展了有机-矿物界面反应面积,为复合体进一步稳定提供结构支撑^[39, 46]。

在更大的空间尺度上,这些微团聚体继续组装形成宏观团聚体网络,构建出复杂的孔隙结构与反应微环境,从而降低有机碳在土壤中的扩散速率和生物可达性。与此同时,坡位差异和侵蚀-沉积过程还会影响复合体的空间分布,坡面上部更容易发生碳流失,而低势位和沉积区则更有利于细颗粒、PyC 及 Fe/Al 氧化物共同富集,从而形成相对稳定的热解碳-矿物复合结构^[40, 47]。由此可见,有机-矿物复合体并不是单一尺度上的产物,而是分子反应、颗粒组装和地貌过程共同作用的结果。

从时间尺度看,火后数月至一年内,r-策略微生物快速周转,推动易降解碳的矿化并大量生成残体,这些残体碳成为后续 MAOC 的重要前体。随着底物质量下降和植被逐步恢复,K-策略微生物及真菌占比增加,碳稳定化逐渐由前期的快速损失阶段转向以“微生物残体-矿物复合体”为特征的长期保护阶段^[16, 39]。近年来,光谱与机器学习方法的结合也为识别此类多尺度结构及其对应的碳稳定形态提供了新手段。在高火频区域开展的研究表明,利用漫反射光谱结合树模型等算法可有效区分可溶性、易降解和惰性土壤有机碳组分,并揭示野火频率对不同碳组分相对丰度的调控作用,从而在区域尺度上刻画微生物-矿物复合体的空间异质性及其固碳功能^[56]。因此,火后稳定化模式并非静态存在,而是随恢复进程在不同尺度上不断重组和积累。

3.4 野火扰动下土壤碳稳定化的结构-界面-生物耦合路径

综合前述过程,野火后土壤碳稳定化可概括为一条由“结构扰动-界面重构-生物转化”组成的阶段性耦合路径,这一耦合路径的核心,不在于某一类碳组分是否能够单独保存,而在于碳能否在

迁移、界面固定和残体累积之间形成持续衔接的转化链。该路径并不表现为单一机制持续增强,而是在不同恢复阶段由不同过程主导,并受野火行为、地貌位置、矿物组成和生态恢复进程共同控制。

在野火后早期,结构破坏和活性碳释放占主导地位。团聚体解体、孔隙扰动和水斥性增强使原本受保护的有机碳暴露于分解和迁移环境中^[22];同时,高温热解和灰分输入造成溶解性有机组分、无机离子和 PyC 增加。此时微生物群落处于快速重组阶段,活性碳矿化和坡面迁移往往超过稳定化过程,因此碳库变化主要表现为损失和再分配。进入野火后中期,随着水文过程重建及矿物表面反应性逐步显现,界面固定过程的重要性开始显现。pyDOM、微生物代谢产物和早期形成的微生物残体更容易与反应性矿物表面接触,并通过吸附、络合、阳离子桥联和共沉淀进入矿物保护体系。在野火后长期恢复阶段,植被重建、根系输入恢复和真菌网络发育逐渐增强,微生物残体和胞外聚合物持续输入土壤,并与矿物颗粒、PyC 和细颗粒组分共同参与微团聚体及有机-矿物复合体累积^[41, 50]。这一阶段稳定碳库的增长主要依赖 MAOC 形成、有机-矿物共保存以及微团聚体包埋等过程,因此碳库演化更表现为长期积累和结构性稳定。因此,火后碳库变化不能简单归因于燃烧损失、矿物吸附或微生物代谢中的某一单一机制,而应理解为结构、水文、矿物界面和微生物过程共同驱动的动态耦合结果。要提高对火后碳汇效应的预测能力,需进一步将这一阶段性耦合路径、火强度梯度和长期恢复序列结合起来,建立能够连接分子机制与生态过程的综合框架。

4 研究挑战与展望

在全球气候变暖和极端天气事件频发的背景下,野火已成为影响陆地生态系统碳循环的重要扰动因素。野火不仅可通过高温燃烧造成土壤有机碳的快速损失,还会持续改变土壤结构、水文过程、矿物界面性质和微生物活动,从而影响火后碳库的迁移、重分配与长期稳定。火后土壤碳库的演化并非由单一过程控制,而是结构变化、矿物界面反应和微生物转化共同作用的结果。现有研究已从团聚体破坏、矿物反应性变化和微生物群落演替等方面揭示了野火对土壤碳库的影响,但仍需进一步贯通结构-矿物-微生物过程,阐明其如何协同调控 POC、MAOC、PyC 和 pyDOM 的迁移、转化与稳定。与此同时,火后碳库恢复具有显著的长期性和阶段性特征,植被恢复、微生物群落重组、矿物风化以及侵蚀-沉积过程往往持续多年甚至数十年,亟待通过长期定位观测揭示碳库由损失到重新稳定的动态轨迹。此外,火后碳循环模型仍需更充分地表达微生物残体积累、矿物保护作用、PyC 长期保存以及侵蚀-沉积再分配等关键过程,以降低对火后碳库恢复轨迹和稳定状态预测的不确定性。野火强度与频率、地貌条件、水文过程以及植被恢复之间的复杂交互作用,也要求在更综合的框架下评估火后碳稳定化过程。

围绕上述方向,后续研究应重点开展多过程协同观测与实验,系统解析不同碳组分从释放、迁移到固定和积累的连续转化过程;同时,亟待建立长期火后序列观测网络,结合不同火强度、土壤类型、地貌条件和恢复阶段,持续跟踪 SOC、PyC 和 pyDOM 的演变及其驱动机制。在模型方面,需要开发整合微生物-矿物互作、水文输移和侵蚀-沉积过程的新一代碳循环模型,并将火强度、受热持续时间、矿物组成和植被恢复等关键因子纳入参数化体系,以提高火后碳循环模拟和碳汇评估的准确性。对于高频野火、坡面侵蚀和沉积区碳保存等复杂情景,还应结合多因素耦合试验、跨尺度监测和模型-数据融合,明确不同环境条件下火后碳库演变的主控因素及其相互作用机制。随着同步辐射表征、稳定同位素示踪、原位成像、多组学和机器学习方法的发展,火后土壤碳稳定化研究正逐步具备从分子界面到生态系统尺度贯通分析的技术基础。加强多尺度观测与模型模拟结合,系统揭示结构重组、矿物保护和微生物转化对火后碳稳定化的协同调控机制,将有助于完善火扰动背景下土壤碳循环理论,并为陆地碳汇评估和火后生态系统管理提供更加坚实的科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, et al. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 156: 108189.
- [2] Rocci K S, Lavallee J M, Stewart C E, et al. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148569.
- [3] Feng X J, Dai G H, Liu T, et al. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2024, 54(11): 3421-3432. [冯晓娟, 戴国华, 刘婷, 等. 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(11): 3421-3432.]
- [4] Wang J K, Xu Y D, Ding F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 528-540. [汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540.]
- [5] Pellegrini A F A, Ahlström A, Hobbie S E, et al. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity[J]. *Nature*, 2018, 553(7687): 194-198.
- [6] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, et al. A review of effects of fire on soil organic carbon in forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2800-2809. [郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2800-2809.]
- [7] Salgado L, Alvarez M G, Díaz A M, et al. Impact of wildfire recurrence on soil properties and organic carbon fractions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 354: 120293.
- [8] Krichels A H, Stephens E Z, Reid C, et al. Wildfire-induced losses of soil particulate and mineral-associated organic carbon persist for over 4 years in a chaparral ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(8): e70404.
- [9] Hanke U M, Reddy C M, Braun A L L, et al. What on earth have we been burning – Deciphering sedimentary records of pyrogenic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12972-12980.
- [10] Santin C, Doerr S H, Jones M W, et al. The relevance of pyrogenic carbon for carbon budgets from fires: Insights from the FIREX experiment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(9): e2020GB006647.
- [11] Cheng Y, Luo P, Yang H, et al. Fire effects on soil carbon cycling pools in forest ecosystems: A global meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 895: 165001.
- [12] Johnson D B, Yedinak K M, Sulman B N, et al. Effects of fire and fire-induced changes in soil properties on post-burn soil respiration[J]. *Fire Ecology*, 2024, 20(1): 90.
- [13] Wang Q K, Zhong M C, Wang S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 271: 91-97.
- [14] Negri S, Giannetta B, Till J, et al. Fire simulation effects on the transformation of iron minerals in alpine soils[J]. *Geoderma*, 2024, 444: 116858.
- [15] Fultz L M, Moore-Kucera J, Dathe J, et al. Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99: 118-128.
- [16] Qin Q Q, Wang Y, Liu Y H, et al. Forest wildfire increases the seasonal allocation of soil labile carbon fractions due to the transition from microbial K- to r-strategists[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(7): 3537-3547.
- [17] Hewitt R E, Day N J, DeVan M R, et al. Wildfire impacts on root-associated fungi and predicted plant-soil feedbacks in the boreal forest: Research progress and recommendations[J]. *Functional Ecology*, 2023, 37(8): 2110-2125.
- [18] Ebel B A, Moody J A. Synthesis of soil-hydraulic properties and infiltration timescales in wildfire-affected soils[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2): 324-340.
- [19] Akin I D, Akinleye T O, Robichaud P R. Changes in soil properties over time after a wildfire and implications to slope stability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2023, 149(7): 04023045.
- [20] Girona-García A, Vieira D, Doerr S, et al. Into the unknown: The role of post-fire soil erosion in the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17354.

- [21] Farid A, Alam M K, Goli V S N S, et al. A review of the occurrence and causes for wildfires and their impacts on the geoenvironment[J]. Fire, 2024, 7(8): 295.
- [22] Negri S, Arcenegui V, Mataix-Solera J, et al. Extreme water repellency and loss of aggregate stability in heat-affected soils around the globe: Driving factors and their relationships[J]. Catena, 2024, 244: 108257.
- [23] Vahedifard F, Abdollahi M, Leshchinsky B A, et al. Interdependencies between wildfire-induced alterations in soil properties, near-surface processes, and geohazards[J]. Earth and Space Science, 2024, 11(2): e2023EA003498.
- [24] Moody J A, Shakesby R A, Robichaud P R, et al. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 122: 10-37.
- [25] Abney R B, Sanderman J, Johnson D, et al. Post-wildfire Erosion in mountainous terrain leads to rapid and major redistribution of soil organic carbon[J]. Frontiers in Earth Science, 2017, 5: 99.
- [26] Abney R B, Berhe A A. Pyrogenic carbon erosion: Implications for stock and persistence of pyrogenic carbon in soil[J]. Frontiers in Earth Science, 2018, 6: 26.
- [27] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink[J]. BioScience, 2007, 57(4): 337-346.
- [28] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 102-122.
- [29] Yin C Y, Bai C Y, Zhu Y J, et al. Future soil erosion risk in China: Differences in erosion driven by general and extreme precipitation under climate change[J]. Earth's Future, 2025, 13(3): e2024EF005390.
- [30] Zhang Q, Wang Y H, Guan P, et al. Temperature thresholds of pyrogenic dissolved organic matter in heating experiments simulating forest fires[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(45): 17291-17301.
- [31] Xu J L, Zhao A X, Yang Y N, et al. Effect of Al substitution on surface reactivity of iron(hydr) oxides: A review[J]. Soils, 2023, 55(5): 943-953. [徐晋玲, 赵爱霞, 杨雅楠, 等. 铝同晶替代对铁(氢)氧化物表面活性的影响研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(5): 943-953.]
- [32] Kang K, Whelan E M, Bone S, et al. Wildfire produces transient minerals: Speciation, reactivity, and fate of iron and manganese in surface soils post wildfire[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(50): 27342-27353.
- [33] Ketterings Q M, Bigham J M, Laperche V. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1108-1117.
- [34] Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, et al. Fire effects on soil aggregation: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 109(1/2): 44-60.
- [35] Cao X H, Li S A, Huang H, et al. Wildfire impacts on molecular changes of dissolved organic matter during its passage through soil[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(26): 11436-11446.
- [36] Merino A, Ferreira A, Salgado J, et al. Use of thermal analysis and solid-state ^{13}C CP-MAS NMR spectroscopy to diagnose organic matter quality in relation to burn severity in Atlantic soils[J]. Geoderma, 2014, 226/227: 376-386.
- [37] Duguy B, Rovira P. Differential thermogravimetry and differential scanning calorimetry of soil organic matter in mineral horizons: Effect of wildfires and land use[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(8): 742-752.
- [38] Knicker H, González-Vila F J, González-Vázquez R. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soils of Southern Spain[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 56: 31-39.
- [39] Nelson A R, Narro A B, Rhoades C C, et al. Wildfire-dependent changes in soil microbiome diversity and function[J]. Nature Microbiology, 2022, 7(9): 1419-1430.
- [40] Merino A, Fonturbel M T, Fernández C, et al. Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate[J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 622-632.
- [41] Philpott T J, Danyaghi G, Wallace B, et al. Low-severity wildfire prevents catastrophic impacts on fungal communities and soil carbon stability in a fire-affected Douglas-fir ecosystem[J]. Geoderma, 2025, 454: 117189.
- [42] Shen H J, Zhou Y Q, Lin J H, et al. Thermal compensatory response of soil heterotrophic respiration following wildfire[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(10): 5034-5044.

- [43] Pinto R, Ansola G, Calvo L, et al. Medium-term response of soil bacterial communities to two post-fire management strategies after a large wildfire[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 395: 127714.
- [44] Rivas Y, Matus F, Rumpel C, et al. Black carbon contribution in volcanic soils affected by wildfire or stubble burning[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 47: 41-50.
- [45] Bonhage A, Raab T, Schneider A, et al. Vertical SOC distribution and aromatic carbon in centuries old charcoal-rich Technosols[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(4): e13293.
- [46] Soong J L, Cotrufo M F. Annual burning of a tallgrass prairie inhibits C and N cycling in soil, increasing recalcitrant pyrogenic organic matter storage while reducing N availability[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2321-2333.
- [47] Liang C, Amelung W, Lehmann J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578-3590.
- [48] Tian J, Dungait J A J, Hou R X, et al. Microbially mediated mechanisms underlie soil carbon accrual by conservation agriculture under decade-long warming[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 377.
- [49] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, 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 [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [50] Cotrufo M F, Haddix M L, Kroeger M E, et al. The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 168: 108648.
- [51] Zhu S H, Yang P J, Yin Y G, et al. Influences of wildfire on the soil dissolved organic matter characteristics and its electron-donating capacity[J]. *Water Research*, 2024, 266: 122382.
- [52] Zhou Y H, He K, Hu X W, et al. Post-wildfire soil properties changes: Insights into hillslope erosion after the March 2024 Yajiang fire[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2025, 130(3): e2024JF008115.
- [53] Wang C Q, Cheng T F, Tang S T, et al. Protective-mechanism-exclusive thermal stability modes of soil organic matter: Novel implication for wildfire effect on soil organic carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160734.
- [54] Cao M X, Ma H, Ye Y X, et al. Wildfire-derived pyrogenic dissolved organic matter (pyDOM) enhances riverine DOM reactivities and nitrogen metabolisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(23): 11597-11606.
- [55] McAulay J, Querejeta J I, Danyagri G, et al. Stable isotopes reveal the drivers of post-wildfire natural regeneration of interior Douglas-fir seedlings in British Columbia[J]. *Ecology and Evolution*, 2025, 15(3): e71078.
- [56] Salgado L, Forján R, Rodríguez-Pérez J R, et al. Soil organic carbon fractionation assessment in areas with high fire activity using diffuse spectroscopy and tree-based machine learning algorithms[J]. *Earth Systems and Environment*, 2025, 9(4): 3101-3115.

(责任编辑: 卢 萍)