

DOI: 10.11766/trxb202506250307

CSTR: 32215.14.trxb202506250307

孙家敬, 贺玉晓, 陈雅兰, 孙可. 生物质炭的土壤固碳效应研究进展及展望[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 53–64.

SUN Jiajing, HE Yuxiao, CHEN Yalan, SUN Ke. Research Progress on Soil Carbon Sequestration by Biochar[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 53–64.

生物质炭的土壤固碳效应研究进展及展望^{*}

孙家敬^{1, 2}, 贺玉晓¹, 陈雅兰², 孙可^{2†}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000; 2. 北京师范大学环境学院区域环境安全全国重点实验室, 北京 100875)

摘要: 土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库, 兼具碳源和碳汇的双重功能, 对实现碳中和目标具有关键作用。生物质炭是通过废弃生物质或有机体在限氧条件下热裂解制备的富碳材料, 因其显著的碳负效应和稳定性特点, 已成为土壤固碳与改良的重要技术手段。本综述系统阐述了生物质炭介导的土壤固碳机制, 重点探讨了其原料特性(来源、组分、结构)、制备参数(热解温度)及施用条件(剂量、作用时长)对土壤固碳效果的影响机制, 并解析了环境因素(氮添加/沉降、温度梯度和土壤质地)对生物质炭土壤固碳效应的调控作用。基于现有研究进展, 提出未来研究应着重关注底土碳库的动态响应机制、长期施用下的碳稳定性演变规律、生物质炭×无机碳库的互作效应等, 从而为构建基于生物质炭技术的碳中和应用体系提供理论支撑。

关键词: 生物质炭; 土壤有机碳; 土壤固碳; 影响因素

中图分类号: X830.2 文献标志码: A

Research Progress on Soil Carbon Sequestration by Biochar

SUN Jiajing^{1, 2}, HE Yuxiao¹, CHEN Yalan², SUN Ke^{2†}

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil is the largest organic carbon reservoir in terrestrial ecosystems. It serves as both a carbon source and a carbon sink and plays a critical role in achieving carbon neutrality goals. Biochar, a carbon-rich material, is produced by thermally cracking waste biomass or organic matter under oxygen-limited conditions. Due to its significant carbon sequestration effects and stability, biochar has become an important technical tool for improving and sequestering soil carbon. This review systematically elucidates the mechanisms of soil carbon sequestration mediated by biochar. It focuses on how the characteristics of the raw material(source, composition, and structure), the parameters of its preparation(pyrolysis temperature), and the conditions of its application(dose and duration of action) influence the efficacy of soil carbon sequestration. The review also analyzes the regulatory effects of environmental factors, such as nitrogen addition/deposition, temperature gradients, and soil texture, on biochar-mediated soil carbon sequestration. Based on the current state of research, future studies should focus on the dynamic response mechanisms of subsoil carbon pools, the evolution patterns of carbon stability under long-term application, and the interactive effects between

* 国家自然科学基金项目(42125703)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42125703)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sunke@bnu.edu.cn

作者简介: 孙家敬(1999—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事生物质炭及土壤碳循环地球化学过程研究。E-mail:sunjiajing@home.hpu.edu.cn

收稿日期: 2025-06-25; 收到修改稿日期: 2025-08-25; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-09-18

biochar and inorganic carbon pools. This will provide the necessary theoretical support for developing a carbon-neutral application system based on biochar technology.

Key words: Biochar; Soil organic carbon; Soil carbon sequestration; Influence factors

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳 (Organic carbon, OC) 库, 约占全球陆地碳库的 70%, 远超全球植被和大气碳库的总和^[1]。土壤中的碳会以二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 等形式不断向大气碳库中输送, 这不仅会加剧全球气候变暖, 还会造成土壤碳损失和肥力减弱, 制约农业可持续发展; 同时土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 也是大气 CO₂ 的汇, 在调节全球气候变化方面发挥着重要作用。因此, 对于如何增加土壤碳储量、减少温室气体排放, 国内外学者进行了广泛研究。

生物质炭由于其在环境中具有稳定性的典型特征, 被视作一种有前景的减碳手段^[2], 并且由于其具有增加土壤碳汇功能的潜力而受到广泛关注^[3]。生物质炭是指废弃生物质或有机体在限氧条件下热裂解生成的固态物质, 具有较高的 pH、OC 含量和阳离子交换量, 并且具有丰富的孔隙、复杂的官能团以及巨大的比表面积, 是一种绿色的碳减排技术^[4-5]。因此, 在土壤中添加生物质炭, 不仅可以改良土壤理化性质、增加土壤养分, 还可以改变土壤 pH、降低土壤容重、增加土壤阳离子交换量, 使得土壤固碳减排能力得到提升。除具有固碳作用外, 生物质炭添加至土壤中还能改善土壤通气条件和土壤水分利用效率, 提高植物生物量, 并在很大程度上改变土壤温室气体通量^[6-8]。据测算^[9], 中国所有施用生物质炭的耕层土壤可实现 73.8 亿~125 亿吨固碳量, 并且在可持续方式下, 生物质炭每年具有高达 9.2 亿吨 CO₂ 减排潜力, 平均净成本为每吨 CO₂ 90 美元, 与中国 2060 碳中和目标下的多数负排放需求高度契合^[10]。

目前, 许多研究均指出了生物质炭在环境效益和农业领域展现出良好的应用潜力。在土壤中添加生物质炭必然会对 SOC 产生影响, 生物质炭所产生的 OC 与 SOC 混合, 增加了 SOC 的含量。此外, 生物质炭还能影响土壤的物理(如孔隙度)、化学(如土壤 pH) 和生物特性(如微生物活性和群落), 这些特性对于调节 OC 转化的土壤生物地球化学过程(如氧化/降解) 至关重要。比如, 生物质炭与土壤

矿物(如黏土、铁氧化物)通过静电作用或配位键形成有机-矿物复合体, 增强土壤团聚体稳定性, 从而将碳包裹在团聚体内部, 并且生物质炭的多孔性可降低土壤容重, 增加土壤微孔数量, 从而改善土壤通气性和水分渗透性。而生物质炭改变土壤 pH, 特别是提高酸性土壤的 pH^[11]。生物质炭中含有不同浓度的碱性灰分, 这些灰分以 Ca、Mg、K 和 Na 氧化物、氢氧化物和碳酸盐的形式直接添加至土壤中, 这些碱性物质加入土壤中后, 导致土壤 pH 的升高^[12-13]。而在碱性土壤中, 由于常规生物质炭本身呈碱性 (pH 8.0~10.0), 施用于碱性土壤(如石灰性黄土、盐碱土)后, 其灰分中的碳酸盐、氧化物等碱性物质与土壤高 pH 叠加, 可能导致 pH 短期上升。例如, 在盐化潮土中, 添加 5%玉米秸秆生物质炭使土壤 pH 显著升高 5.46%^[14]。此外, 由于生物质炭具有较大的比表面积和孔隙度, 因而可以给土壤微生物生长繁殖提供良好的环境, 能增加土壤中细菌的总丰度, 进而改变土壤微生物群落。此外, 添加生物质炭可显著提高土壤真菌与细菌的比例, 并且改善了养分土壤中总磷脂脂肪酸和细菌、真菌和放线菌的活性, 从而提高了土壤养分循环^[15]。这些特性均直接或间接地改变了 SOC 的组成和储量。此外, 生物质炭的添加不仅可以增强作物对高温等不利气候条件的抵抗能力, 还能进一步提高暖冬与充足降水等有利因素对作物产生的积极影响^[16]。同时, 生物质炭固碳机制在响应环境因素如氮添加/沉降(例如通过影响微生物活动改变碳矿化速率)、温度梯度(如高温下碳稳定性的变化)和土壤质地(如黏土含量调节碳封存效率)方面至关重要, 需要进一步厘清相关机制以优化碳封存策略。

本文结合国内外最新研究进展, 系统阐述了生物质炭自身特性对土壤固碳的影响(如热解温度、原料来源、施用量和作用时长)及其效应机制, 分析了氮添加、温度梯度变化及不同土壤质地等环境因素对生物质炭土壤固碳效应的影响, 并在此基础上, 提出了未来的研究方向, 以期为生物质炭实际应用和加快实现“碳达峰”和“碳中和”提供理论基础。

1 生物质炭的土壤固碳效应

生物质炭的土壤固碳效应是一个受多因素调控的复杂过程, 其核心在于生物质炭自身的特性以及与土壤环境的动态协作。热解温度作为生物质炭制备的关键参数, 对其理化性质(如芳香度、孔隙结构、稳定性)有重要影响^[17], 进而影响其输入土壤后的矿化速率与持久性(表1)。施用量则关联碳输入强度与土壤承载阈值, 过量或不足均会导致土壤固碳效率偏离最优状态^[18-19]。作用时长则关乎生物质炭在土壤环境中的老化过程及其与土壤有机碳库整合的长期动态^[20-22]。而生物质来源的不同也会影响生物质炭的理化性质。因此, 系统解析热解温度、施用量与作用时长以及生物质来源对生物质炭固碳效果的影响机制, 是优化其应用策略、实现高效且持久的土壤碳封存的核心前提。

1.1 生物质炭热解温度对土壤固碳的影响

生物质炭可通过生物质在200~900℃的温度下进行热化学分解产生, 分解过程中几乎不含氧, 这就是通常所说的热解^[23]。热解温度在改变生物质炭特性方面起着重要作用, 是影响生物质炭孔隙形态和导电性能的关键因素, 并且高温显著影响生物质炭的物理性质, 进而影响其对土壤理化性质的调控作用(如pH、孔隙度、含水量、土壤容重等)^[17]。低温生物质炭(≤400℃)通常具有较高的可溶性OC(如低分子量脂肪族化合物)和含氧官能团, 但其pH、孔隙率、芳香度、灰分和OC含量均低于在高温(>400℃)条件下热解产生的生物质炭^[24-25]。这些特性的改变会对土壤CO₂排放以及土壤固碳

产生影响, 比如低温生物质炭中较高的溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)容易被微生物利用, 矿化风险较高。并且有研究表明, 在500℃以下产生的低温生物质炭增强了几乎所有土壤酶的活性, 而大于500℃的高温生物质炭对C、N和P获取酶影响可忽略不计^[26]。这可能是因为低温生物质炭中的可溶性有机碳可作为微生物底物, 刺激酶活性提升, 而高温生物质炭的高度芳香化结构难以被酶分解, 同时其表面官能团减少, 与酶的结合能力减弱。而随着热解温度的升高, 生物质炭中挥发物的含量也随之降低, 提高了生物质炭的富碳性, 促进了生物质炭中的芳香结构形成, 产生了更高的比表面积和发达的孔隙^[27], 这种结构有利于物理吸附碳。黄康^[28]的一项研究也同样表明了制备温度的升高使生物质炭芳香性、碳化程度增强, 同时C元素与不易挥发的Si元素形成C-Si键, 稳定性显著增加, 所以生物质炭还田后促进了SOC的累积, 且促进效果随温度上升而上升, 800℃制备的生物质炭还田后SOC含量为空白组的5.5倍, 为秸秆还田组的4.14倍。同时发现生物质炭(400~800℃)有效抑制了土壤CO₂的排放, 抑制效果随温度上升而上升。但综合考虑生物质炭的产率以及能源消耗成本, 以及还田后促进土壤固碳的效果, 400℃是制备生物质炭的最佳选择, 在这种温度下制得的生物质炭具有更高的质量产率、能量回收率, 更多的挥发物含量和多种表面官能团^[29](利于短期的土壤改良)。此外, 升温速率和保温时间也会影响生物质炭的性质及其土壤固碳潜力, 这有待进一步研究^[17]。

表1 不同热解温度生物质炭特性

Table 1 Characteristics of biochar at different pyrolysis temperatures

生物质炭特性 Characteristics	低温生物质炭 Low-temperature biochar (≤400℃)	中温生物质炭 Intermediate-temperature biochar (400~500℃)	高温生物质炭 High-temperature biochar (>500℃)	参考文献 References
自身结构稳定性 ^①	效果较差/低	效果较好/中等	效果非常好/很高	[24-25, 28]
对微生物活性的影响 ^②	效果非常好/很高	效果较好/中等	效果较差/低	[26]
综合固碳效率 ^③	效果较差/低	效果较好/中等	效果非常好/很高	[17, 27, 28]

①Stability; ②Impact on microbial activity; ③Carbon sequestration efficiency

1.2 生物质炭施用量对土壤固碳的影响

生物质炭的使用通常会提升土壤碳储量, 但生物质炭的施用量与土壤固碳能力并非呈正相关性, 其固碳效率受土壤类型、环境条件及土壤碳饱和效应制约。多数研究表明, 在适宜范围内, 增加生物质炭施用量可以线性提高 SOC 总量^[30-31]。例如, Dong 等^[32]进行了一项为期 5 年的实地研究, 评估了以正常至非常高的施用量 (0、30、60 和 90 t·hm⁻²) 施用稻壳和棉籽壳制成的生物质炭后 SOC 的变化。研究发现, 生物质炭使 SOC 含量明显增加了 32.3%~104.7%, 且增加幅度随生物质炭施用量的增加而逐渐增大。这可能是因为生物质炭直接输入, 以及其促进了团聚体形成对原有 SOC 的保护。但长期高生物质炭用量可能导致土壤碳组分失衡, 一项 10 年田间试验发现^[33], 连续施用高剂量生物质炭 (9.0 Mg·hm^{-2·a}⁻¹) 虽增加了颗粒 OC 含量, 但显著降低了粉黏粒结合有机碳的含量, 后者也是土壤长期稳定碳库的重要组分。这可能是因为高剂量生物质炭的物理屏障作用过强, 抑制了微生物对粉黏粒结合碳的更新, 同时过量生物质炭与土壤胶体的竞争吸附导致碳-矿物结合位点饱和。并且在肥力较高的温带土壤中, 生物质炭对土壤团聚体稳定性的促进作用随用量增加而饱和, 高生物质炭用量 (9.0 Mg·hm^{-2·a}⁻¹) 对土壤固碳增益有限^[34]。所以对于土壤的最佳生物质炭施用量, 需要综合考虑土壤类型、环境条件及施用成本等因素, 具体问题具体分析。

1.3 生物质炭作用时长对土壤固碳的影响

许多研究表明, 短期内在土壤中施用生物质炭可以增强土壤固碳能力, 改善土壤的理化性质, 减少温室气体的排放等。但生物质炭输入土壤是一项永久性的改变^[35], 所以研究生物质炭对土壤的长期效应至关重要。Gross 等^[36]在德国进行了两次长期田间试验, 分别在 12 和 14 年前将不同类型的生物质炭掺入两种类型土壤中, 研究表明对土壤碳储量的长期影响受生物质炭质量和数量的控制, 并且通过使用生物质炭固存 SOC 是可行的, 尤其是在壤土中。生物质炭在土壤的老化过程中经历物理破碎、化学氧化、生物降解等过程, 并且更深入地与土壤矿物 (黏土、Fe/Al 氧化物) 结合形成矿物结合有机碳^[37] (MAOC), 这是其长期稳定的关键机制。Feng 等^[38]的一项 Meta 分析表明, 添加生物质炭后, 短期内 (<1 年) 土壤碳固存增加了 87.5%, 而长期 (≥

1 年) 添加生物质炭仅使得土壤碳固存增加了 25.1%。这是因为生物质炭的添加抑制了负责简单多糖降解的纤维素酶活性, 并且提高了针对复杂酚类大分子的木质素酶活性, 这加快了稳定的 SOM 的降解, 并且随着生物质炭添加时间的推移, 木质素酶: 纤维素酶的比率也在不断增加, 从而限制了生物质炭添加对土壤碳的长期固碳作用。Jin 等^[39]的一项研究也证明了这一观点, 即添加生物质炭两个月后的土壤化学性质 (可利用磷、pH、SOC、全氮和碳/氮比) 较添加生物质炭 6 年后对应的土壤化学性质有更显著的提高。因此, 在土壤中添加生物质炭也要考虑生物质炭老化对于土壤固碳的影响, 目前超长期 (>10 年, 特别是数十年尺度) 的田间观测数据仍然匮乏, 对生物质炭老化后期的性质研究不足, 今后研究可关注于此。

1.4 不同原料来源生物质炭对土壤固碳的影响

生物质炭的内在理化性质随原料来源 (如秸秆、木材和粪便) 的不同而有很大差异^[40-41], 导致其固碳机制和效率侧重不同 (表 2)。以木材为原料 (如木屑、竹子) 的生物质炭含碳量和比表面积较高; 而以动物粪便为原料 (如禽畜粪便) 的生物质炭的灰分含量最高, 其次则是以农作物和木材为原料的生物质炭^[42-43]。由于木材生物质炭原料富含木质素和纤维素, 经热解后形成高度芳香化、缩合度高的结构, 使其具有极高的化学稳定性和抗分解能力 (矿化率平均仅为 1.52%), 高于粪便和农作物衍生生物质炭 (4.35%), 这是其长期稳定的核心机制^[41, 44]。土壤团聚体在很大程度上决定了土壤结构, 是土壤功能的基础。SOC 在土壤团聚体中的赋存是其长期稳定的关键机制, 因为团聚体不仅能从物理上保护有机碳不被降解, 还能影响微生物群落结构、限制氧气扩散并减少有机碳的径流和侵蚀。SOC 在土壤团聚体中的保存有助于维持土壤肥力与结构^[45-46]。与大团聚体 (>0.25 mm) 相比, 微团聚体 (<0.25 mm) 更加稳定, 添加以粪便为原料的生物质炭可以使土壤中微团聚体平均增加约 43%, 这较农作物生物质炭 (22.1%) 和木材生物质炭 (16.3%) 均要高^[44], 这可能与粪便生物质炭中较高的钙、镁等阳离子含量有关, 可通过桥接作用促进微团聚体的形成。而以秸秆为原料的生物质炭具有较多的表面官能团, 增强了其表面活性和吸附能力, 但大量表面官能团的引入也可能导致难分解碳的分解, 从而可能缩短生物质炭的使用寿命, 并在土壤改良应用中

增加土壤温室气体的排放^[47]。所以不同生物质来源的生物质炭通过差异化路径调控土壤碳库稳定性(如木材生物质炭通过高芳香性固碳, 粪便生物质炭通过增

加土壤团聚体固碳等), 实际应用中需要依据固碳目标匹配原料类型, 以协同优化化学惰性、物理保护与生物有效性。

表 2 不同生物质来源生物质炭特性

Table 2 Characteristics of biochar from different biomass sources

特性 Characteristics	木材生物质炭 Wood-derived biochar	粪便生物质炭 Manure-derived biochar	秸秆生物质炭 Straw-derived biochar	参考文献 References
自身稳定性 ^①	极高	中等	中等	[41, 44]
固碳主导机制 ^②	芳香结构化学稳定性	促进团聚体形成	官能团介导吸附与转化	[41, 44, 47]
潜在风险 ^③	低	高 pH 抑制微生物活性	可能增加温室气体排放	[12, 47]

①Stability; ② Carbon sequestration mechanisms; ③Potential risks

2 影响生物质炭土壤固碳效应的环境因素

生物质炭在土壤中的固碳效应并非孤立存在的, 其显著受到关键环境因素的调控。氮添加(沉降)深刻影响土壤碳氮循环平衡, 其与生物质炭的交互作用既可协同提升固碳固氮效率(如缓解氮限制、抑制正激发效应), 也可能因形态或用量不当引发碳损失风险(如促进微生物矿化); 温度变化(尤其是全球变暖)可以改变土壤碳分解的温度敏感性(Q_{10} 值), 影响土壤有机碳库的稳定性; 土壤质地则通过物理保护(如黏土矿物吸附)和结构支撑(如团聚体形成)作用调节生物质炭的留存与转化。因此, 深入解析氮输入、温度梯度和土壤质地这三类关键环境因子对生物质炭固碳效应的调控机制, 是因地制宜制定高效、稳定碳封存策略的科学基础。

2.1 氮添加(沉降)对生物质炭土壤固碳的影响

20世纪以来, 由于化石燃料的燃烧和农业活动等人类活动, 氮沉降增加了3倍~5倍, 而且在不久的将来, 氮沉降也会不断地增加^[48-49]。此外, 化肥施用是保障作物可持续生产的重要农田管理措施。然而, 大部分化肥未能被有效利用, 损失率高达40%^[50]。这一现象在我国尤为突出, 我国消耗了全球1/3的氮肥, 但利用率不足40%, 远低于欧美等发达国家的水平^[51], 大量的盈余氮素进入环境中, 严重污染水体和大气。研究表明, 生物质炭会增强土壤氨态氮的固定能力, 具有“加碳固氮”的效果^[52]。生物质炭具有高C/N比, 其单独施用可能诱发微生物“氮挖掘”(加速本底SOC分解以获取N)^[53],

而配施氮肥能直接提供有效氮, 抑制氮挖掘效应, 减少碳损失。因此, 生物质炭与化肥配施有望成为提升农田土壤固碳固氮功能的有效措施^[54]。研究发现, 将生物质炭与化肥氮在植烟土壤中配施, 添加生物质炭提高了SOC和微生物生物量碳含量, 同时减少15%化肥氮施用量; 并且, 配施生物质炭处理显著提高了土壤过氧化氢酶活性, 提升了土壤新陈代谢水平, 增强了土壤肥力^[55]。例如, Wu等^[56]研究发现, 将生物质炭与氮肥配施可以将土壤中的SOC增加53.27%, 并且可以提高土壤团聚体的稳定性。并且不同形式的氮肥也会影响土壤CO₂的排放, (NH₄)₂SO₄和尿素与生物质炭配施显著增加了土壤CO₂当量排放量, 而KNO₃与生物质炭配施则减少了土壤CO₂当量排放量, 增加了土壤的碳固存^[57]。此外, 生物质炭与化肥配施还会影响土壤中微生物群落, 进而对土壤固碳产生影响。一方面, 生物质炭与氮肥混合施用可以改变土壤的理化性质(如pH等), 从而对微生物群落产生影响并显著提高了变形杆菌的相对丰度, 减少酸杆菌的丰度, 所以将生物质炭和氮肥结合起来, 可以提高SOC固存潜力, 调节菜地细菌群落多样性和组成, 实现可持续强化^[58]。另一方面, 长期施用生物质炭和氮肥虽然增加了土壤SOC和微生物多样性, 但这些改变主要是因为长期施用生物质炭和氮肥通过改变土壤pH来增强土壤多功能性, 而细菌和真菌多样性以及土壤团聚体在解释土壤多功能性方面没有发挥重要作用^[59], 所以长期C-N协同机制仍需深入研究。

此外, 单纯氮的输入可能会促进土壤呼吸, 并

且即使掺入生物质炭也不能很好地抑制^[60]。之前的 Meta 分析发现, 在施氮肥的土壤中添加生物质炭后, 土壤 CO_2 排放量会下降, 从而观察到一种拮抗效应^[61]。这种拮抗作用可能是由于添加氮之后, 生物质炭诱导了土壤激发效应(施用生物质炭后新投入的有机物可大大加速或延缓本地有机碳的矿化, 这被称为激发效应^[62])的下降。研究发现, 单独添加生物质炭会加速本底 SOC 分解(正激发效应), 而同时添加尿素则会显著缓解生物质炭诱导的正激发效应^[63], 这在一定程度上支撑了这一观点。综上, 生物质炭与氮肥配施可以通过调节土壤化学性质(如 pH)、微生物群落结构及激发效应方向, 协同提升固碳固氮效率, 但需优化氮肥形态(如优选 KNO_3)与用量以抑制碳损失风险, 实现农田生态效益最大化。

2.2 温度对生物质炭土壤固碳的影响

温度变化会对土壤碳储量产生极大的影响^[64]。随着全球气候变暖, 短期内对土壤碳库影响不大, 而长期(≥ 5 年)的气候变暖会使土壤中的难降解碳库减少 14%, 导致土壤碳储量降低^[65]。而生物质炭的添加会影响土壤的理化性质、微生物群落等, 并且可能会影响土壤温度^[66]。对于加入生物质炭后温度变化对土壤固碳影响的研究也是极其重要的。Fang 等^[67]研究发现, 在气候变暖的情况下, 生物质炭可以降低土壤中 SOC 的温度敏感性, 从而提高土壤的固碳能力。土壤碳分解的温度敏感性有一个专门的量化指标, 通常用 Q_{10} 表示, 即温度每升高 10 ℃ 时土壤呼吸(碳分解)速率增加的倍数, 常用于预测气候变暖下的碳循环反馈^[68-69]。生物质炭的添加使微生物群落的组成和功能发生变化, 改变了土壤呼吸的 Q_{10} , 使得 OC 的周转速度变慢, 对气候变暖的稳定性增强, 这有可能减少未来气候变暖下旱地土壤碳的流失^[69-70]。与添加生物质炭的土壤相比, 未添加生物质炭的土壤惰性有机碳含量下降幅度随温度升高而增大, 对温度变化较为敏感, 这主要是因为生物质炭的添加降低了土壤惰性有机碳的 Q_{10} ^[71]。此外, 生物质炭对 Q_{10} 的影响可能随土壤和生物质炭类型、试验条件的不同而不同。此外, Zhang 等^[58]的一项研究表明, 生物质炭和氮肥配施降低了 Q_{10} , 提高了固碳潜力以及细菌的多样性。所以在土壤中添加生物质炭是应对气候变化对土壤固碳影响的一项有力措施。关注生物质炭添加下土壤碳分解

Q_{10} 的变化规律, 可以进一步优化农业与土地管理以适应气候变化。

2.3 土壤质地对生物质炭土壤固碳的影响

土壤质地是调节土壤生物质炭稳定性的重要因素。Yang 等^[72]发现与土壤黏土矿物培养后, 生物质炭的稳定性得到增强, 与铁(Fe)/铝(Al)矿物培养的生物质炭较与高岭石培养的生物质炭更稳定。此外, 黏土中的活性矿物质(如植硅酸盐和氧化铁)与生物质炭相互作用形成生物质炭-矿物质复合物, 从而提高了生物质炭的稳定性。并且土壤颗粒本身就带有一定的孔隙, 如沙质土壤的比表面积为 $0.01 \sim 0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 而黏质土壤的比表面积为 $5 \sim 700 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 相比之下生物质炭的比表面积更高, 并且根据原料与热解温度不同所展现的比表面积也不同, 因为具有较高的比表面积这种特性, 所以生物质炭的加入可能提高土壤的孔隙度, 尤其是沙质土壤^[73-74]。而在沙质土壤中, 生物质炭的高比面积可显著改善土壤的孔隙结构和持水能力。例如, Liang 等^[75]发现, 在沙质土壤中加入生物质炭可将土壤孔隙度提高约 4.8 倍, 增强了对有机分子的吸附能力。孔隙度的增加会提高土壤的吸附能力, 从而有可能使更多的有机碳被吸附至土壤中, 使得土壤的固碳能力提升。此外, 生物质炭促进大团聚体和水稳定团聚体的形成, 但这种效应在黏土含量 $>20\%$ 的土壤中更为显著(平均提升 38.5%), 而在黏土 $<5\%$ 的土壤中作用有限^[24]。因此, 生物质炭应用于黏土含量较低的土壤时, 其稳定性可能较高且矿化量明显较低, 使得土壤固碳得到增强^[44, 76]。未来研究应进一步关联土壤质地与生物质炭特性, 指导生物质炭区域投加方案, 实现精准固碳。

3 生物质炭的固碳机制

物理、化学和生物机制在生物质炭固碳过程中并不是孤立存在的, 而是相互协同作用的。生物质炭的多孔结构为碳的物理吸附提供了场所, 而其化学稳定性和表面官能团则增强了碳的化学固定。同时, 生物质炭通过影响土壤微生物群落, 进一步增强了碳的生物固定(如图 1)。这种多机制的协同效应使得生物质炭在土壤中的碳封存能力显著增强, 为实现全球碳减排目标提供了重要途径。

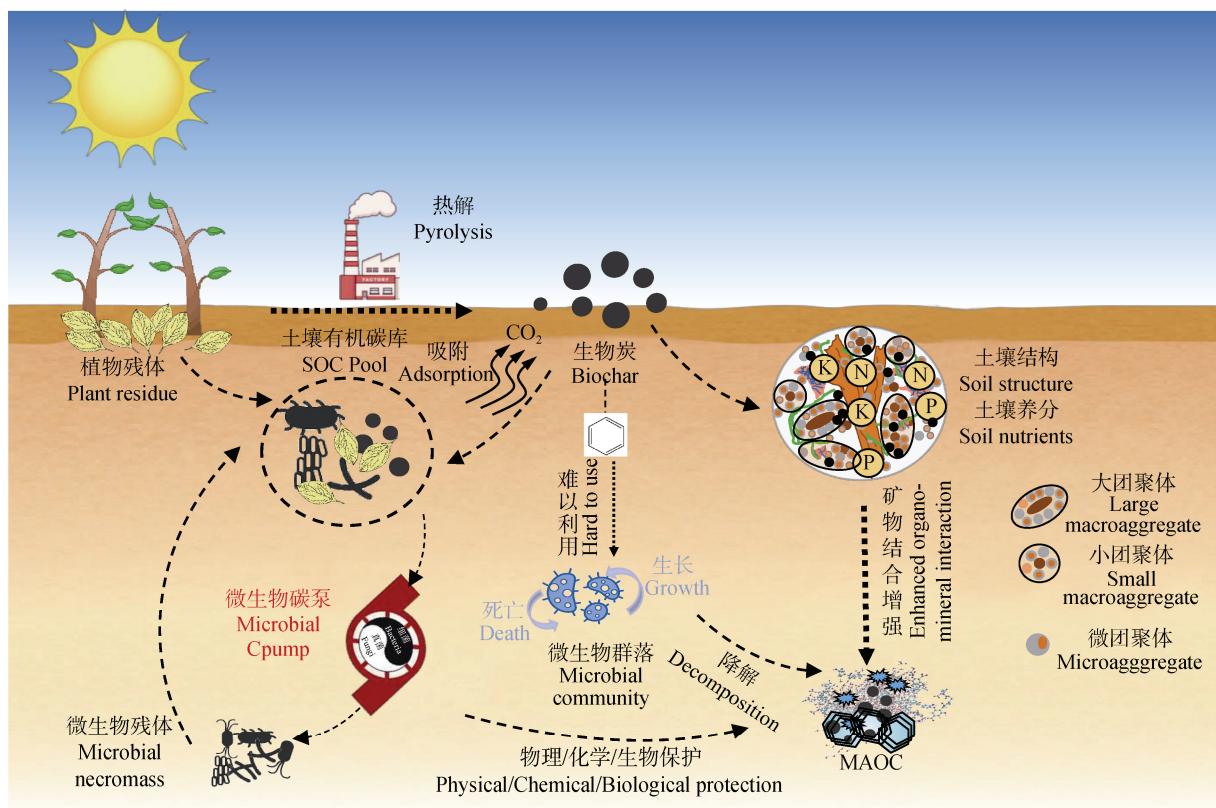


图 1 生物质炭土壤固碳机制
Fig. 1 The mechanism of soil carbon sequestration by biochar

3.1 生物质炭固碳的物理机制

生物质炭固碳的物理机制主要可以分为两个方面: 一是生物质炭是在缺氧环境中对有机材料进行热化学转化而产生的多孔碳质固体^[77], 而生物质炭的多孔结构是其物理固碳的核心。生物质炭的孔隙率可以分为(微孔, <2 nm; 中孔, $2\sim50$ nm; 大孔, >50 nm), 其中微孔和中孔结构可以通过物理吸附直接捕获 CO_2 或溶解态无机碳, 降低其与微生物及胞外酶的接触概率。此外, 生物质炭的多孔性可降低土壤容重, 增加土壤微孔数量, 从而改善土壤的通气性和水分渗透性。二是生物质炭与土壤矿物(如黏土、铁氧化物)通过静电作用或配位键形成有机-矿物复合体^[37], 增强土壤团聚体稳定性, 从而将碳包裹在团聚体内部。土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[78]。在土壤团聚体中, SOC 得到保存, 从而促进碳固存, 维持土壤肥力和结构^[46]。团聚体还能促进 SOC 与矿物基质之间的凝聚, 从而促进与矿物相关的有机碳的形成和稳定^[79]。Yuan 等^[80]的一项 Meta 分析表明与未添加生物质炭的对照组相比, 添加

生物质炭可促进大团聚体的形成, 提高团聚体的水稳定性, 并富集不同大小团聚体中的有机碳和氮, 从而使得土壤中的有机碳得到固存。同时, Liu 等^[81]向土壤中施用小麦秸秆生物质炭, 发现土壤团聚体的平均质量直径增加了 28%。这些对土壤固碳效应均起到了积极作用。

3.2 生物质炭固碳的化学机制

高温热解促使生物质中纤维素、木质素等组分发生脱氢、缩合反应, 形成高度交联的芳香环结构, 随着热解温度的升高, 生物质炭的芳香环中 H 和 O 会被 C 取代, H/C 和 O/C 物质的量比降低, 生物质炭芳香化程度增加和非极性结构变多, 这为生物质炭的惰性及稳定性奠定了物质基础, 使其在环境中的半衰期和平均停留时间(MRT)也就越长^[70]。而这种结构无法被微生物直接利用, 因此对微生物分解具有高度稳定性。He 等^[82]通过将掺有稻草生物质炭的土壤在水淹条件下培养 180 天的一项研究得到结论, 加入生物质炭后明显降低了土壤中烷基 C 和氧烷基 C 的浓度以及脂肪族 C/芳香族 C 的比率, 而

明显提高了芳香族C的浓度以及烷基C/氧烷基C和疏水C/亲水C的比率,增强了土壤的疏水性,进一步抑制了碳的分解。Sohi等^[83]指出,因为生物质炭表面含有丰富的官能团,而这些官能团可以与土壤中的有机质和无机离子发生化学反应,形成稳定的复合物,进一步增强了碳的固定。此外,Liu等^[11]的一项研究表明将生物质炭掺入土壤中可以中和土壤的酸性,促进土壤中碳的固定并且提高土壤的酸缓冲能力。

3.3 生物质炭固碳的微生物机制

生物质炭通过影响土壤微生物群落和活性,间接地增强了土壤的固碳能力。生物质炭的添加可以改变土壤的微环境,促进有益微生物的生长和活性,这些微生物能够将有机碳转化为更稳定的形式^[3]。微生物是土壤生态系统的重要组成部分,其群落结构和功能随着环境条件的改变而迅速发生改变^[84],而生物质炭的输入为微生物提供了碳源并促进了它们的生长。有研究发现,生物质炭可以将表层土壤微生物残体(MNC)碳库容量提升10%~59%^[85]。微生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)是Liang等^[86]于2017年提出的一个概念,MCP通过微生物将碳(主要来自植物残体)从易失形式转化为持久形式来推动土壤碳的储存。而生物质炭的施用可以通过改变碳源和养分可及性以及重塑微生境来影响微生物群落结构与代谢路径^[87-88],进而调控MNC的形成和MCP的运行效率^[89]。生物质炭具有较大的比表面积和孔隙度,因而可以给土壤微生物生长繁殖提供良好的环境,能增加土壤中细菌总丰度,进而改变土壤微生物群落。研究显示,掺入生物质炭后土壤微生物群落组成发生了变化,特别是放线菌和革兰氏阴性细菌;而这类菌群偏好利用难降解碳源,可以减缓SOC矿化^[90]。

4 总结与展望

生物质炭对于提升土壤碳储量、促进土壤改良和增加农作物产量具有很大的潜力。与传统直接还田、好氧堆肥、厌氧发酵等利用方式相比,生物质炭不会引发土壤病虫害,可以更好地利用废弃的农业资源,负面影响较小,具有广阔的应用前景。

虽然目前研究者们对于生物质炭固碳进行了大

量的研究,但有些方面仍不太完善,后续的工作应着重于以下几个方面:(1)目前关于热解温度生物质炭特性及固碳效率影响的研究主要集中在制备温度上,而升温速率和保温时间也会影响生物质炭的性质及其土壤固碳潜力,这有待进一步的研究。(2)短期施用生物质炭对土壤固碳、减少温室气体排放和增强生态功能具有有益作用,而对于10年以上的长期研究较少,但因为生物质炭添加到土壤中是长期的土地管理措施,因此还需多进行些长期施用生物质炭的研究。此外,针对长期施用生物质炭的施用频率以及方式对于土壤固碳的影响,目前的研究仍不太完善,需要进一步深入研究。(3)氮肥与生物质炭配施是土壤碳管理的一种潜在有效措施,而二者配施对土壤固碳效率是否存在阈值以及不同种类和用量的氮肥与生物质炭配施对土壤固碳影响的研究仍处于初期探索阶段,急需填补相关研究的空白。(4)关于不同环境温度下对生物质炭土壤固碳效率的影响仍有不足,特别是长期气候变暖下添加生物质炭对Q₁₀的影响有待进一步研究。(5)目前关于生物质炭对土壤性质影响的研究主要集中在0~30 cm土层,而对底层土壤的研究较少,并且生物质炭对土壤碳库的影响并不仅限于土壤有机碳库,土壤无机碳库对于CO₂的排放也占有很大的比重,这均需要未来进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532 (7597): 49—57.
- [2] Kopittke P M, Berhe A A, Carrillo Y, et al. Ensuring planetary survival: The centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52 (23): 4308—4324.
- [3] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota—A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (9): 1812—1836.
- [4] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5 (7): 381—387.
- [5] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22 (3): 1315—1324.
- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 56.
- [7] Wu P, Ata-Ul-Karim S T, Singh B P, et al. A scientometric review of biochar research in the past 20

- years (1998–2018) [J]. *Biochar*, 2019, 1 (1): 23—43.
- [8] Sharma P, Abrol V, Nazir J, et al. Optimizing soil properties, water use efficiency, and crop yield through biochar and organic manure integration in organic soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123673.
- [9] Gui X Y, Xu X Y, Zhang Z H, et al. Biochar-amended soil can further sorb atmospheric CO₂ for more carbon sequestration[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 5.
- [10] Deng X, Teng F, Chen M P, et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1085.
- [11] Liu S W, Cen B T, Yu Z N, et al. The key role of biochar in amending acidic soil: Reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity[J]. *Biochar*, 2025, 7 (1): 52.
- [12] Cui L Q, Noerpel M R, Scheckel K G, et al. Wheat straw biochar reduces environmental cadmium bioavailability[J]. *Environment International*, 2019, 126: 69—75.
- [13] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (3): 3488—3497.
- [14] Sun W J, Huang X Y, Wei W L, et al. Effects of different biochar application rates on soil quality and maize growth in salinized fluvo-aquic soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57 (3): 125—132. [孙伟娇, 黄小钰, 魏文良, 等. 不同生物炭用量对盐化潮土土壤质量与玉米生长的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57 (3): 125—132.]
- [15] Zhang L Y, Jing Y M, Xiang Y Z, et al. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 926—935.
- [16] Chen Z, Jin P H, Liu Q, et al. Decade-long successive biochar amendment enhances wheat production and increases crop system resistance to unfavorable meteorological factors[J]. *Field Crops Research*, 2025, 322: 109743.
- [17] Tomczyk A, Sokolowska Z, Boguta P. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020, 19 (1): 191—215.
- [18] Jiang Z W, Yang S H, Pang Q Q, et al. Optimizing biochar application rate and predicting of climate change impacts on net greenhouse gas emissions in paddy systems using DNDC-BC model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 364: 110461.
- [19] Yan S H, Zhang S L, Yan P K, et al. Effect of biochar application method and amount on the soil quality and maize yield in Mollisols of Northeast China[J]. *Biochar*, 2022, 4 (1): 56.
- [20] Yang Y, Sun K, Han L F, et al. Biochar stability and impact on soil organic carbon mineralization depend on biochar processing, aging and soil clay content[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 169: 108657.
- [21] Zhang W, Lu J S, Li S Q, et al. Equal-straw produced biochar continuous incorporation substitutes straw returns for global warming mitigation: An appraisal based on five-year field experiment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163546.
- [22] Sun H, Luo L, Wang J X, et al. Speciation evolution of phosphorus and sulfur derived from sewage sludge biochar in soil: Ageing effects[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56 (10): 6639—6646.
- [23] Demirbas A, Arin G. An overview of biomass pyrolysis[J]. *Energy Sources*, 2002, 24 (5): 471—482.
- [24] Han L F, Sun K, Jin J, et al. Role of structure and microporosity in phenanthrene sorption by natural and engineered organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (19): 11227—11234.
- [25] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (4): 1247—1253.
- [26] Liao X L, Kang H, Haidar G, et al. The impact of biochar on the activities of soil nutrients acquisition enzymes is potentially controlled by the pyrolysis temperature: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2022, 411: 115692.
- [27] Yuan H R, Lu T, Wang Y Z, et al. Influence of pyrolysis temperature and holding time on properties of biochar derived from medicinal herb (*Radix isatidis*) residue and its effect on soil CO₂ emission[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 110: 277—284.
- [28] Huang K. Study on soil fertilization and carbon sequestration potential of different pyrolysis temperature biochar returning[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. [黄康. 不同热解温度秸秆生物炭还田培肥土壤及其固碳潜力的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.]
- [29] Li S M, Chen G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures[J]. *Waste Management*, 2018, 78: 198—207.
- [30] Wang C, Liu J Y, Shen J L, et al. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: A 4-year field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 83—96.
- [31] Qiu H S, Liu J Y, Boorboori M R, et al. Effect of biochar application rate on changes in soil labile organic carbon fractions and the association between bacterial

- community assembly and carbon metabolism with time[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158876.
- [32] Dong X L, Singh B P, Li G T, et al. Biochar application constrained native soil organic carbon accumulation from wheat residue inputs in a long-term wheat-maize cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 200—207.
- [33] Shi S W, Zhang Q Z, Lou Y L, et al. Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: Results from a decade field experiment[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37 (1): 95—103.
- [34] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17 (3): 581—589.
- [35] Griffin D E, Wang D Y, Parikh S J, et al. Short-lived effects of walnut shell biochar on soils and crop yields in a long-term field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 236: 21—29.
- [36] Gross A, Bromm T, Polifka S, et al. Long-term biochar and soil organic carbon stability—Evidence from field experiments in Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176340.
- [37] Mikutta R, Mikutta C, Kalbitz K, et al. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals *via* different binding mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (10): 2569—2590.
- [38] Feng J, Yu D L, Sinsabaugh R L, et al. Trade-offs in carbon-degrading enzyme activities limit long-term soil carbon sequestration with biochar addition[J]. *Biological Reviews*, 2023, 98 (4): 1184—1199.
- [39] Jin Z W, Zhang X L, Chen X M, et al. Dynamics of soil organic carbon mineralization and enzyme activities after two months and six years of biochar addition[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13 (2): 1153—1162.
- [40] Aller M F. Biochar properties: Transport, fate, and impact[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, 46 (14/15): 1183—1296.
- [41] Wang Z Y, Han L F, Sun K, et al. Sorption of four hydrophobic organic contaminants by biochars derived from maize straw, wood dust and swine manure at different pyrolytic temperatures[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 285—291.
- [42] Xiao X, Chen B L, Chen Z M, et al. Insight into multiple and multilevel structures of biochars and their potential environmental applications: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (9): 5027—5047.
- [43] Břendová K, Száková J, Lhotka M, et al. Biochar physicochemical parameters as a result of feedstock material and pyrolysis temperature: Predictable for the fate of biochar in soil? [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39 (6): 1381—1395.
- [44] Han L F, Sun K, Yang Y, et al. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114184.
- [45] Six J, Gregorich E, Kögel-Knabner I. Commentary on the impact of tisdall & oades (1982) [J]. *Journal of Soil Science*, 2012, 63 (1): 3—7.
- [46] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (2): 681—689.
- [47] He D B, Luo Y M, Zhu B. Feedstock and pyrolysis temperature influence biochar properties and its interactions with soil substances: Insights from a DFT calculation[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 922: 171259.
- [48] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, et al. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110 (D19): 2005JD005825.
- [49] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320 (5878): 889—892.
- [50] Yan X, Jin J Y, He P, et al. Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7 (4): 469—479.
- [51] FAO. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.
- [52] Wang Y, Liu Y H, Xia L L, et al. Accounting for differences between crops and regions reduces estimates of nitrate leaching from nitrogen-fertilized soils[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 29.
- [53] Zhou X H, Feng Z Q, Yao Y X, et al. Nitrogen input alleviates the priming effects of biochar addition on soil organic carbon decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 202: 109689.
- [54] Liu Z W, Wu X L, Li S X, et al. Quantitative assessment of the effects of biochar amendment on photosynthetic carbon assimilation and dynamics in a rice–soil system[J]. *New Phytologist*, 2021, 232 (3): 1250—1258.
- [55] Ge S H, Yan H T, Chen Q, et al. Effects of biochar combining with nitrogen fertilizer on functional diversity of microbial communities in tobacco-planting soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (4): 708—714. [葛少华, 阎海涛, 陈奇, 等. 生物质炭与化肥氮配施对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. 土壤, 2019, 51 (4): 708—714.]
- [56] Wu J, Teng B Q, Zhong Y, et al. Enhancing soil aggregate stability and organic carbon in northwestern China

- through straw, biochar, and nitrogen supplementation[J]. *Agronomy*, 2024, 14 (5): 899.
- [57] Duan T Z, Zhao J T, Zhu L Z. Insights into CO₂ and N₂O emissions driven by applying biochar and nitrogen fertilizers in upland soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 929: 172439.
- [58] Zhang X, Zhang Q Q, Zhan L P, et al. Biochar addition stabilized soil carbon sequestration by reducing temperature sensitivity of mineralization and altering the microbial community in a greenhouse vegetable field[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313: 114972.
- [59] Dong Z J, Li H B, Xiao J N, et al. Soil multifunctionality of paddy field is explained by soil pH rather than microbial diversity after 8-years of repeated applications of biochar and nitrogen fertilizer[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158620.
- [60] Zhang J B, Li Q, Wu J S, et al. Effects of nitrogen deposition and biochar amendment on soil respiration in a *Torreya grandis* orchard[J]. *Geoderma*, 2019, 355: 113918.
- [61] He Y H, Yao Y X, Jia Z, et al. Antagonistic interaction between biochar and nitrogen addition on soil greenhouse gas fluxes: A global synthesis[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13 (10): 1636—1648.
- [62] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42 (9): 1363—1371.
- [63] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, et al. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes : A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9 (4): 743—755.
- [64] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440 (7081): 165—173.
- [65] Chen J, Elsgaard L, van Groenigen K J, et al. Soil carbon loss with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (4): 1944—1952.
- [66] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (5): 1478—1487.
- [67] Fang Y Y, Singh B P, Singh B. Temperature sensitivity of biochar and native carbon mineralisation in biochar-amended soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 158—167.
- [68] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q10[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 154—164.
- [69] Chen J H, Sun X, Zheng J F, et al. Biochar amendment changes temperature sensitivity of soil respiration and composition of microbial communities 3 years after incorporation in an organic carbon-poor dry cropland soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54 (2): 175—188.
- [70] Nguyen B T, Lehmann J, Hockaday W C, et al. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (9): 3324—3331.
- [71] Cao K K, Zhang S S, Hu X Y, et al. Effect of biochar on changes of the temperature sensitivity of soil respiration and bacterial community structure[J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (11): 5185—5192. [曹坤坤, 张莎莎, 胡学玉, 等. 生物质炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化[J]. 环境科学, 2020, 41 (11): 5185—5192.]
- [72] Yang F, Zhao L, Gao B, et al. The interfacial behavior between biochar and soil minerals and its effect on biochar stability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (5): 2264—2271.
- [73] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337 (1): 1—18.
- [74] Ouyang L, Zhang R D. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13 (9): 1561—1572.
- [75] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (5): 1719—1730.
- [76] Fang Y, Singh B, Singh B P, et al. Biochar carbon stability in four contrasting soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65 (1): 60—71.
- [77] Shackley S, Carter S, Knowles T, et al. Sustainable gasification-biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues[J]. *Energy Policy*, 2012, 42: 49—58.
- [78] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 627—643. [刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 627—643.]
- [79] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4115.
- [80] Yuan X M, Ban G C, Luo Y B, et al. Biochar effects on aggregation and carbon-nitrogen retention in different-sized aggregates of clay and loam soils: A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 247: 106365.

- [81] Liu Z X, Chen X M, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. *Catena*, 2014, 123: 45—51.
- [82] He M R, Jiang Y, Han Y H, et al. Rice straw biochar is more beneficial to soil organic carbon accumulation and stabilization than rice straw and rice straw ash[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23 (3): 3023—3033.
- [83] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2010: 47—82.
- [84] Tian Y N, Wang H Q. Application of biolog to study of environmental microbial function diversity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34 (3): 50—57. [田雅楠, 王红旗. Biolog 法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34 (3): 50—57.]
- [85] Chen Y L, Du Z L, Weng Z, et al. Formation of soil organic carbon pool is regulated by the structure of dissolved organic matter and microbial carbon pump efficacy: A decadal study comparing different carbon
- management strategies[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29 (18): 5445—5459.
- [86] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [87] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, et al. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (11): 2304—2314.
- [88] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (6): 1169—1179.
- [89] van Groenigen K J, Bloem J, Bååth E, et al. Abundance, production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42 (1): 48—55.
- [90] Luo Y, Lin Q M, Durenkamp M, et al. Soil priming effects following substrates addition to biochar-treated soils after 431 days of pre-incubation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (3): 315—326.

(责任编辑: 檀满枝)