

基于meta分析下研究生物炭对土壤微生物碳利用效率的影响:机制、争议与前沿

邓丽蓉^{1,2}, 程红光^{2,*}, 吴志兵³, 朱 艺¹, 刘 芳⁴,
Gratien Twagirayezu^{2,5}, 程晓磊^{2,3}, 邓林波^{2,5}, 曹 斌^{2,5}

(1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
3. 贵州大学 精细化工研究开发中心绿色农药全国重点实验室, 绿色农药与农业生物工程教育部重点实验室, 贵阳
550025; 4. 百色学院 广西水环境重点实验室, 广西 百色 533000; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤微生物碳利用效率(Microbial Carbon Use Efficiency, CUE)是衡量微生物吸收的碳转化为自身生物量或用于呼吸消耗的关键生理生态参数,直接调控着土壤碳的固持与释放。作为一种前景广阔的土壤改良剂,生物炭能有效调控土壤CUE,但其具体效应、作用条件及其内在机制在全球范围内尚未形成认识。本研究以“生物炭”和“微生物碳利用效率”为关键词,收集了中国知网和Web of Science核心合集数据库26篇文献545组数据,进行Meta分析。结果显示:生物炭添加显著增加了土壤CUE,但增加幅度受生物炭性质与用量的影响。当生物炭施加量 $\leq 5\%$ 时,相比对照处理,高温制备的坚果壳类、木材类和秸秆类生物炭添加分别使土壤CUE提升了31.78%、7.43%和6.94%。但是过量或者热解温度低于500℃制备的生物炭添加会导致土壤CUE变化不大甚至下降。生物炭施加土壤后,土壤pH值平均增加3.07%,容重降低5.47%,土壤有机碳和微生物量碳显著增加46.87%、15.74%,土壤微生物群落结构变化明显(真菌数量增加约28.36%,细菌24.72%,放线菌11.9%),同时土壤总胞外酶活性增加38.32%。显然,生物炭通过调节土壤pH改善土壤孔隙结构,优化微生物群落结构,富集高功能菌群和提高土壤酶活性,导致土壤CUE显著提升。本研究系统量化生物炭施用对土壤CUE的影响,揭示了生物炭添加导致的物理、化学及生物等多重提升土壤CUE机制,为精准农业管理提升土壤碳汇功能提供科学依据。

关键词: 生物炭;微生物碳利用效率;meta分析;土壤碳循环;微生物代谢

中图分类号: X171 **文献标识码:** A

在全球气候变化日益严峻的背景下,如何有效减缓大气中二氧化碳(CO₂)的上升,已成为21世纪人类社会面临的最紧迫挑战之一^[1]。土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,其储碳量约为大气碳库的3倍,在全球碳循环中扮演着无可替代的“调节器”角色^[2]。然而,这一巨大的碳库并非静止不变,其稳定性在很大程度上取决于土壤中数以万亿计的微生物代谢活动。微生物驱动土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)分解与转化^[3],调控着土壤中二氧化碳的排放。微生物介导的土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)与二氧化碳间的动态转化决

定着土壤碳固存^[4]。研究发现集约化管理的农业土壤,频繁耕作、过度施肥和灌溉,激发土壤微生物代谢活性,增强呼吸作用加快土壤有机碳矿化分解^[5]。因此,任何涉及微生物代谢过程措施都会影响土壤碳的固持与释放,进而调控全球气候系统。

众多影响微生物代谢的关键参数中,微生物碳利用效率(Microbial Carbon Use Efficiency, CUE)正迅速成为土壤生态学和生物地球化学研究的前沿与核心^[6]。土壤CUE是微生物将同化的碳分配于合成代谢与呼吸代谢间的比例^[7]。高CUE意味着更多的碳被固定,对碳封存具有积极作用;相反,低

收稿日期: 2026-02-02;改回日期: 2026-05-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42373082);广西重点研发项目(桂科FN2600640014)。

第一作者简介: 邓丽蓉(2000—),女,硕士研究生,主要从事土壤碳循环研究。email: LirongDeng@hotmail.com。

*通信作者: 程红光(1981—),男,博士,副研究员,主要从事土壤碳氮循环及其激发效应研究。email: chenghongguang@vip.gyig.ac.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

CUE值则表明碳向微生物生物量的转化少,用于分解代谢的碳增加,不利于土壤碳封存^[8]。因此土壤CUE常被用于评估微生物群落功能、土壤养分转化与碳封存的重要指标,其数值高低与动态变化可综合反映土壤的肥力质量、生态功能及对环境胁迫干扰的响应,为农业可持续发展、碳汇管理及生态修复提供科学依据^[9]。

为了提高土壤微生物的碳利用效率和碳封存潜力,实施了一系列可持续且有效的土壤管理措施,尤其是生物炭施用,从不同途径减少土壤温室气体排放,更能调控土壤CUE,成为了近年来的研究热点和前沿^[10-11]。由芳香族结构组成的生物炭具有强抵抗生物降解能力,能够在土壤中长期保存,为土壤长期碳封存做出了重要贡献。也正因为其化学惰性与长期环境稳定性,被广泛视为一种极具潜力的碳“负排放技术”和土壤改良剂^[12-13]。当然,生物炭对土壤碳库的调控不仅仅只是“惰性碳”的直接贡献;生物炭添加土壤,与土壤-微生物系统发生复杂的相互作用,调控微生物过程,影响土壤CUE变化,最终改变土壤碳固存。因此将农业残余废弃物(木材类、作物秸秆与坚果壳等)制备成生物炭加以应用,有望优化土壤CUE、增强土壤碳汇功能,实现缓解全球气候变暖的战略目的^[14-15]。

生物炭施用显著提升微生物的CUE^[16-18],不仅生物炭是直接为微生物提供可利用性碳源^[19];其特有比表面积与多孔结构更是为微生物提供物理庇护,减缓捕食压力和环境胁迫、进而促进微生物多样性发生正向变化^[17]。然而,上述观点常常受到不同观点的质疑^[20]。甚至认为生物炭施用会导致有效碳源与养分被吸附、导致微生物群落结构向低效菌群转变,更多碳用于呼吸消耗而非生物量积累,最终降低土壤碳固存^[21-23]。此外,生物炭对土壤pH、容重的影响间接调控着微生物群落结构和功能,最终在土壤CUE体现^[24]。上述分析表明,生物炭施加对土壤CUE的影响不仅仅受控于生物炭施用量,不同制备条件下(原料类型、热解温度)形成的生物炭自身理化性质(酸碱性、比表面积及灰分含量等)与土壤背景条件(如土壤理化性质、微生物群落组成、土壤酶活性等)等因子共同决定的土壤CUE。因此,厘清生物炭影响土壤微生物CUE的关键驱动因子及其作用阈值,已成为准确评估生物炭固碳潜力、指导其科学应用所亟待解决的核心科学问题。仅仅关注生物炭作为“碳输入”的直接效应,

而忽视其对微生物CUE这一“碳转化效率”的间接调控,将极大地限制我们对生物炭环境效应的全面认知。

尽管已有多个Meta分析探讨了生物炭对土壤有机碳含量^[25]、温室气体排放^[26]和微生物生物量^[27]的影响,但关于生物炭如何调控微生物碳利用效率的系统性整合研究尚属空白。CUE作为连接微生物代谢与有机碳固存的核心参数,其响应机制无法简单地从有机碳或微生物生物量碳的变化中推断,因为CUE是生长与呼吸的比例,同样的SOC增量可能对应完全不同的CUE水平。例如,生物炭可通过物理保护直接贡献SOC而不改变CUE,也可通过刺激微生物活性同时提高生长和呼吸而维持CUE不变,而高剂量添加的生物炭虽会导致高含量的SOC但会降低CUE^[28],因此SOC与CUE并不是简单的线性关系,专门针对CUE的Meta分析对于深入理解生物炭调控土壤碳循环的微生物学机制具有不可替代的价值。

基于目前我们对生物炭间接调控土壤微生物CUE的认识尚未形成共识,我们通过Meta整合分析现有文献,系统分析不同原料、不同裂解温度制备的生物炭pH比表面积与灰分含量等理化性质的差异与生物炭添加量调控土壤理化性质(如pH和容重)、微生物群落结构与土壤酶活性变化对CUE的影响。试图回答以下关键问题:(1)生物炭施用对土壤CUE是何种影响?(2)什么生物炭理化性质主导土壤CUE变化?(3)生物炭添加后,土壤理化性质、土壤微生物群落结构与酶活性如何相应土壤CUE的变化?通过上述问题的回答,不仅能深化我们对生物炭-土壤-微生物互作机制的理解,通过筛选出最佳种类与最适添加量生物炭添加增加土壤CUE,增加土壤碳固存。更有望为未来“定制化”生产兼具高效固碳与土壤改良功能的新型生物炭产品提供关键的科学依据,从而在全球变化应对策略中发挥更精准、更有效的作用。

1 材料与方法

1.1 数据来源

首先,我们从中国知网和Web of Science核心合集数据库中检索了截至2025年8月31日公开发表的微生物“碳利用效率”(Microbial Carbon Use Efficiency, CUE)的文章。在检索过程中主要使用关键词“生物炭”和“微生物碳利用效率”(“Biochar”

and “Microbial Carbon Use Efficiency”)。其次, 通过摘要阅读排除关联性不大的文章, 以及阅读全文筛选出碳利用效率数值等的文章, 并去除重复项。最终筛选出 26 篇文章, 使用 Microsoft Excel 2010 软件和 WebPlotDigitizer 软件提取并记录有用数据。为确保数据的准确性和代表性, 筛选文章必须满足以下要求: (1) 文章表格或图表能够提取出所需数据, 例如碳利用效率数值、土壤理化性质、土壤酶活和微生物量的具体数据; (2) 记录的碳利用效率数值为平均值, 包括标准差和样本量。 (3) 实验组与对照组之间的唯一区别在于是否添加生物炭, 其他处理条件相同; (4) 提取的碳利用效率数值必须有 3 个或 3 个以上的重复。另外在提取数据过程中如果数据缺失, 首先联系原作者获取数据, 若无法获取, 则参考该作者基于相同实验条件发表的其他文章; 或者如果提取的数据没有标准差, 则使用整个数据集的平均变异系数来估算; 另外对于一些以图片而非表格形式展示 CUE 数值的文章, 使用 WebPlotDigitizer 软件从图片中提取数据 (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>)。

1.2 数据分析

为探究生物炭添加对土壤微生物碳利用效率 (CUE) 的影响与生物炭添加后土壤理化性质、土壤微生物群落结构与土壤酶活的变化趋势, 我们开展了相关 Meta 分析。对 545 个观测值中的每 1 个数值都采用了响应比计算 (Response Ratio, RR), 评估生物炭如何影响碳利用效率。RR 是实验组 (添加生物炭) 平均值与对照组 (不添加生物炭) 平均值的自然对数转换比值, 其计算公式如下 (考虑到不同方法测得的 CUE 绝对值存在系统差异 (^{18}O - H_2O 法通常测得生长效率, ^{13}C 法测得底物利用效率, 我们在分析中采用响应比 (lnRR) 而非绝对值进行比较, 以消除方法间的系统偏差):

$$\text{RR} = \ln (\overline{X}_a / \overline{X}_c) = \ln \overline{X}_a - \ln \overline{X}_c \quad (1)$$

式中, $\overline{X}_a$ 是实验组 (添加生物炭) CUE 的平均值; $\overline{X}_c$ 是对照组 (不添加生物炭) CUE 的平均值。每个 RR 的相应方差 (V_i) 通过以下公式计算:

$$V_i = S_a^2 / n_a \overline{X}_a^2 + S_c^2 / n_c \overline{X}_c^2 \quad (2)$$

式中, S_a 和 n_a 分别代表实验组的标准差和样本数量; S_c 和 n_c 分别代表对照组的标准差和样本数量。为了进一步评估土壤微生物 CUE 的动态变化, 我们将响应比 (RR) 转换为相对变化率, 其计算公式

如下:

$$\text{变化率} = \exp^{\text{RR}} - 1 \quad (3)$$

变化率为正值表明生物炭使 CUE 高于对照处理, 而负值则表明相反的情况。当 95% 置信区间不与无效线重叠时, 认为生物炭添加对 CUE 的影响显著 ($p < 0.05$); 当 95% 置信区间与无效线重叠时, 实验组和对照组之间的差异不显著。异质性检验: 采用 Cochran's Q 检验评估研究间是否存在异质性, 以 $P < 0.10$ 表示存在显著异质性。同时, 采用 I^2 统计量化异质性程度, $I^2 < 25\%$ 为低异质性, $25\% \sim 75\%$ 为中等异质性, $> 75\%$ 为高异质性。发表偏倚检验: 采用漏斗图进行可视化评估, 以效应量 (lnRR) 为横坐标、标准误为纵坐标绘制散点图, 结合 Egger's 线性回归检验进行定量判断, 以 $P < 0.05$ 表示存在显著发表偏倚。

本研究使用 MetaWin 软件进行整合分析, 使用 WebPlotDigitizer 软件和 Microsoft Excel 2010 软件提取和记录数据, 使用 Origin 2019 和 Graphpad Prism 5.5 软件绘制森林图。

2 结果

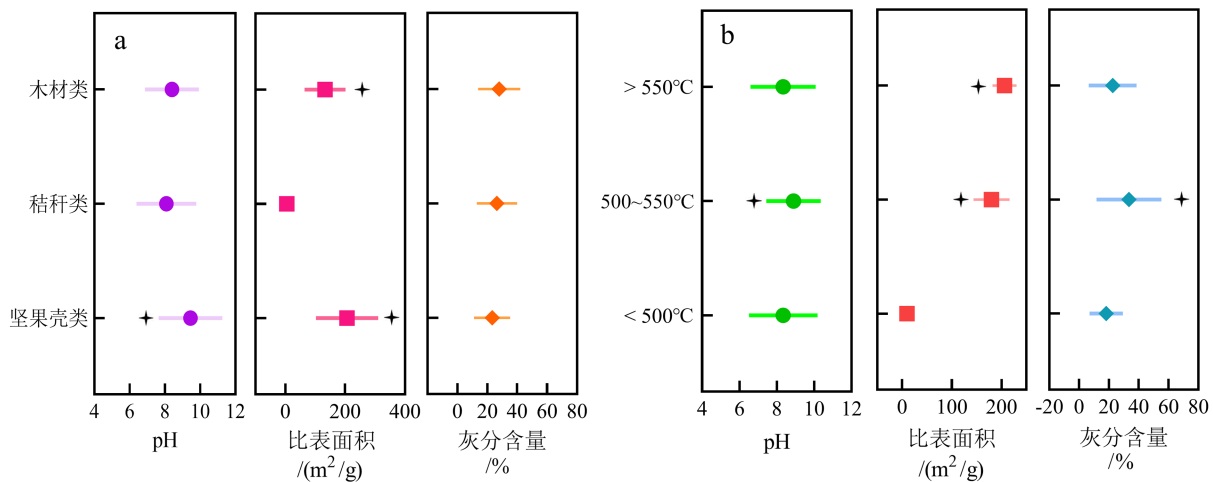
2.1 生物炭制备条件对生物炭性质的影响

2.1.1 不同原材料对生物炭理化性质的影响

图 1a 展示了不同种类生物炭的 pH、比表面积以及灰分含量。由图中可以看出木材类、秸秆类和坚果壳类生物炭的 pH 均为碱性, 在 8.08~9.45 之间, 且坚果壳类所形成的生物炭 pH 高于另外两种; 坚果壳类生物炭的比表面积最大, 均值为 $206.46 \text{ m}^2/\text{g}$, 其次是木材类生物炭, 均值为 $132.70 \text{ m}^2/\text{g}$, 秸秆类生物炭的比表面积最小, 仅为 $5.07 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右; 而三者的灰分含量都在 $26\% \sim 28\%$ 之间, 且三者之间无明显差异。

2.1.2 热解温度对生物炭理化性质的影响

图 1b 展示了生物炭在不同热解温度下形成的 pH、比表面积以及灰分含量。由图中可以看出在温度区间为 $500 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 生物炭的 pH 最高为 8.90, 明显高于另外两组温度区间; 在温度区间 $> 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 所形成的生物炭比表面积最大, 为 $210.58 \text{ m}^2/\text{g}$, 其次在 $500 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 区间时, 比表面积为 $180.54 \text{ m}^2/\text{g}$, 二者都显著高于温度区间 $< 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时所形成的比表面积; 而在 $500 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间下的生物炭灰分含量最高, 可达 33.46% 。



此图为生物炭基本性质的数据集特征描述,仅用于展示本Meta分析所纳入研究的数据分布情况。
置信区间为95%,+代表不同制备条件下生物炭形成的理化性质具有显著差异。

图1 不同制备条件对生物炭理化性质的影响

Fig. 1 The influence of preparation conditions on the physicochemical properties of biochar

2.2 生物炭理化性质与添加量对CUE的影响

2.2.1 生物炭酸碱性和在不同添加量下对CUE的影响

生物炭以不同添加量施用后对CUE的影响如图2a所示。土壤CUE在生物炭添加后发生显著变化,且受到生物炭酸碱度与添加量的影响。当生物炭施加量 $\leq 5\%$ 时,相比对照组,生物炭施加都会促进CUE增加,酸性生物炭较碱性生物炭添加促进土壤CUE明显。当生物炭施加量超过5%时,生物炭添加抑制土壤CUE,同样是酸性生物炭影响幅度较大。

2.2.2 生物炭比表面积在不同添加量下对CUE的影响

不同比表面积的生物炭以不同添加量施加对CUE的影响如图2b所示。生物炭添加对土壤CUE影响受生物炭添加量与生物炭比表面积的共同影响。相比对照组,比表面积较大($\text{specific surface area, SSA} \geq 100 \text{ m}^2/\text{g}$)的生物炭添加促进土壤CUE增加,但增加幅度同生物炭施加量成反比。同样的情况也出现在比表面积($\text{SSA} < 100 \text{ m}^2/\text{g}$)较小的生物炭添加过程中,只是在添加量超过5%时甚至出现了抑制土壤CUE的情况。

2.2.3 生物炭灰分含量在不同添加量下对CUE的影响

不同灰分含量的生物炭以不同添加量添加后土壤CUE的变化情况如图2c所示,生物炭添加对土壤CUE影响受生物炭添加量与生物炭灰分含量的

共同影响。在生物炭添加量 $\leq 5\%$ 时,生物炭施加促进CUE上升,且灰分含量高的生物炭更有益于土壤CUE的上升。

2.3 生物炭添加对土壤理化性质的影响

2.3.1 土壤pH对生物炭添加的响应

生物炭施用后,土壤pH的变化如图3a所示。显然,土壤pH对生物炭的响应受土壤自身pH的影响。当生物炭添加到酸性土壤中时,土壤pH增加7.76%;而同样生物炭添加到碱性土壤中,土壤pH甚至比原来降低约0.9%。

2.3.2 土壤容重对生物炭添加的响应

图3b展示了生物炭施用后土壤容重的变化。总体而言,生物炭添加都会降低土壤容重,并且其影响幅度受土壤自身容重的影响。相比对照组,生物炭施加会使土壤容重平均减少5.47%。

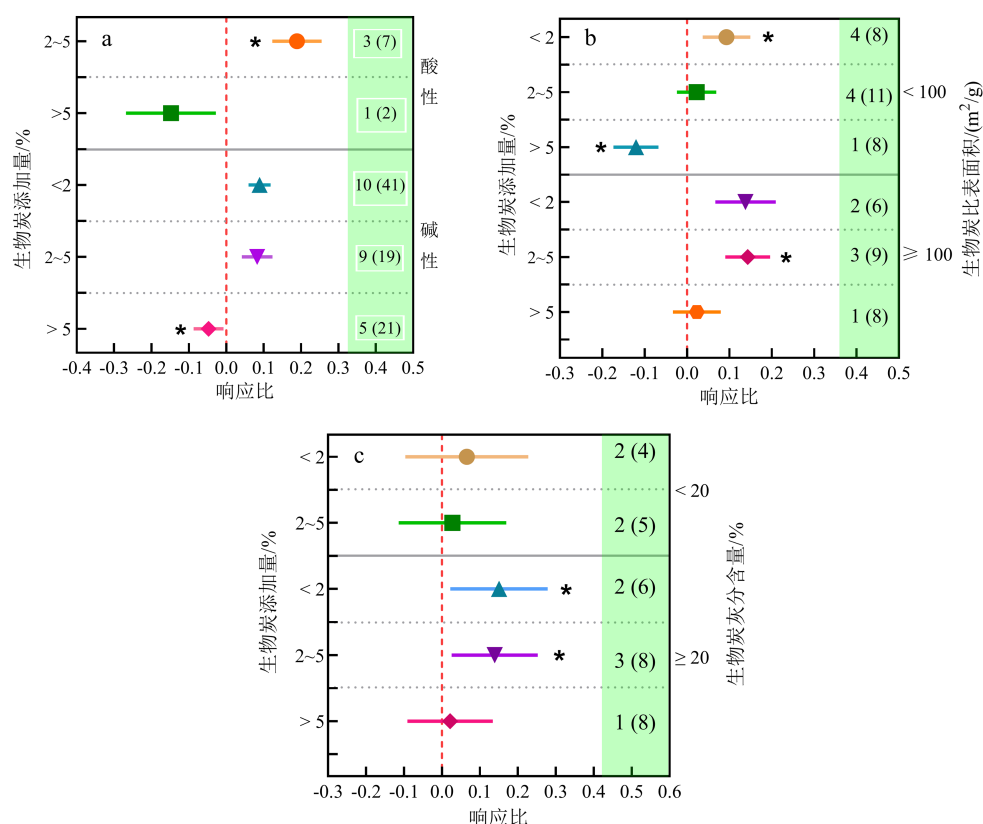
2.3.3 土壤中不同形式的碳含量对生物炭添加的响应

生物炭施加后对土壤中不同形态碳含量的影响如图3c所示。总体而言,生物炭施加土壤后会使得土壤总碳(Total soil carbon, TC)、有机碳(Soil organic carbon, SOC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)与溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)的含量都增加。其中土壤有机碳含量增加幅度最大(46.87%)。

2.4 生物炭添加对土壤酶活性及微生物的影响

2.4.1 生物炭添加下土壤酶活性的变化

土壤酶活性对生物炭添加后的响应如图4a所



置信区间为 95%，右侧条框中括号外的数值代表文章数量，括号里的数值代表研究值数量，

*代表不同添加量下生物炭理化性质对 CUE 的影响具有显著差异。

图2 生物炭理化性质在不同添加量下对 CUE 的影响

Fig. 2 The influence of the physicochemical properties of biochar on CUE under different addition amounts

示。总体而言,生物炭添加促进了土壤酶活性,其中土壤总胞外酶活性增加 38.32%。纤维素水解酶活性增强约 29.88%;木糖苷酶活性增强 13.7%;葡萄糖苷酶活性变化不明显。

2.4.2 生物炭添加后土壤微生物群落组成的变化

土壤微生物群落结构对生物炭添加的响应如图 4b 所示。生物炭添加导致土壤中微生物群落结构发生显著变化。细菌、真菌以及放线菌的数量都会增加。其中增加幅度最大的种群是真菌,大概增加 28.36%;其次是细菌,大概比原来增加 24.72%,而且革兰氏阴性细菌比阳性细菌所受影响更大;然后是放线菌,大概比原来增加 11.9%。

2.5 结构方程模型

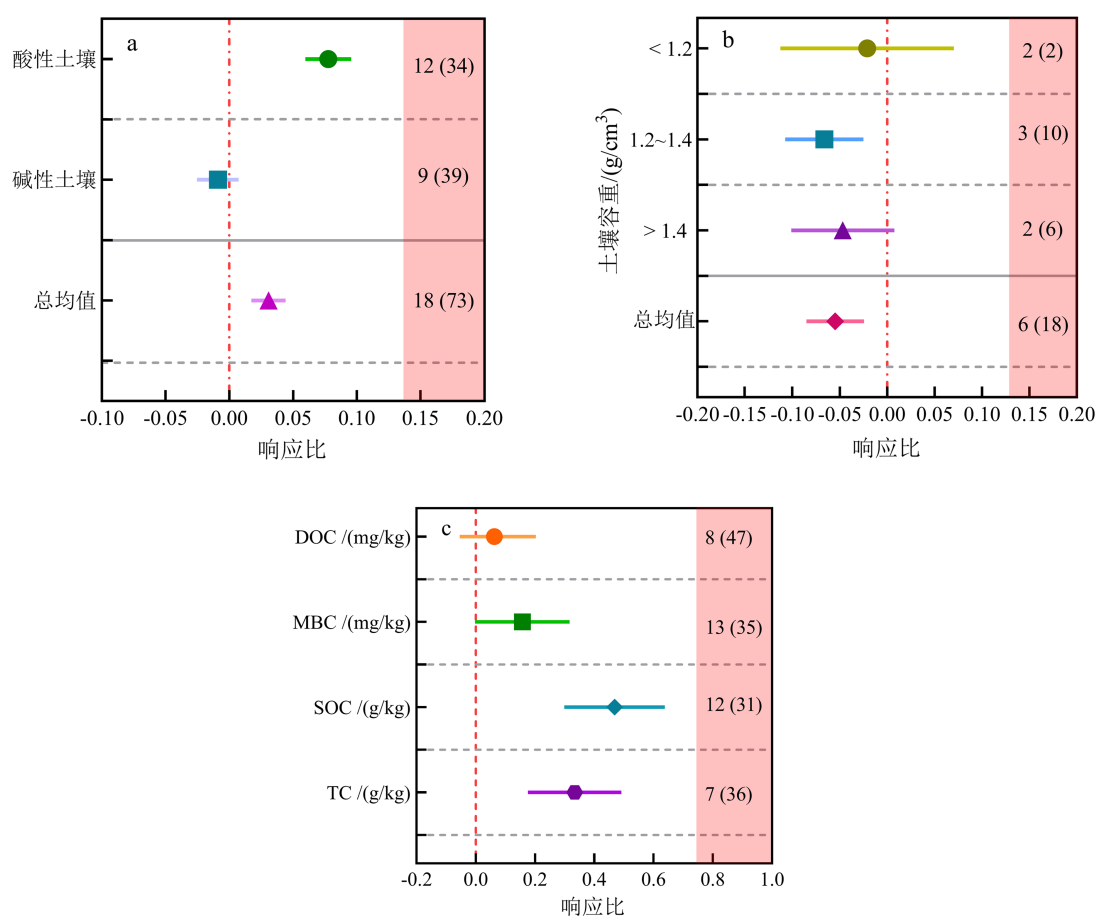
我们构建了一个结构方程模型,将影响因素与 CUE 联系起来,以揭示它们之间的因果关系(图 5)。生物炭的 pH、灰分含量、比表面积以及土壤 pH 对 CUE 有积极影响,其中生物炭灰分含量($\lambda=0.30, p<0.001$)和土壤 pH($\lambda=0.45, p<0.001$)的影响最大,相

比之下,土壤容重对 CUE 有负面影响($\lambda=-0.25, p<0.05$)。此外,该模型表明,生物炭理化性质可能通过影响土壤 pH 和土壤容重间接影响 CUE,生物炭灰分含量可以通过影响土壤 pH 来间接影响 CUE,生物炭比表面积可以通过影响土壤容重来间接影响 CUE。

3 讨论

3.1 生物炭调控 CUE 的直接作用

生物炭添加对土壤微生物碳利用效率(CUE)的直接作用,其本质是生物炭自身的物理性质、化学成分直接作用在土壤中,通过对土壤理化的改良以及不同成分的直接供应调控微生物生存与发育,从而改变土壤的 CUE。也即是说生物炭的性质调控着生物炭对土壤 CUE 的直接影响。当然,土壤自身理化性质的差异也会导致生物炭添加对土壤 CUE 的调控在幅度,甚至方向上出现差异。研究显示:生物炭的理化性质受控于生物炭原材料与制备

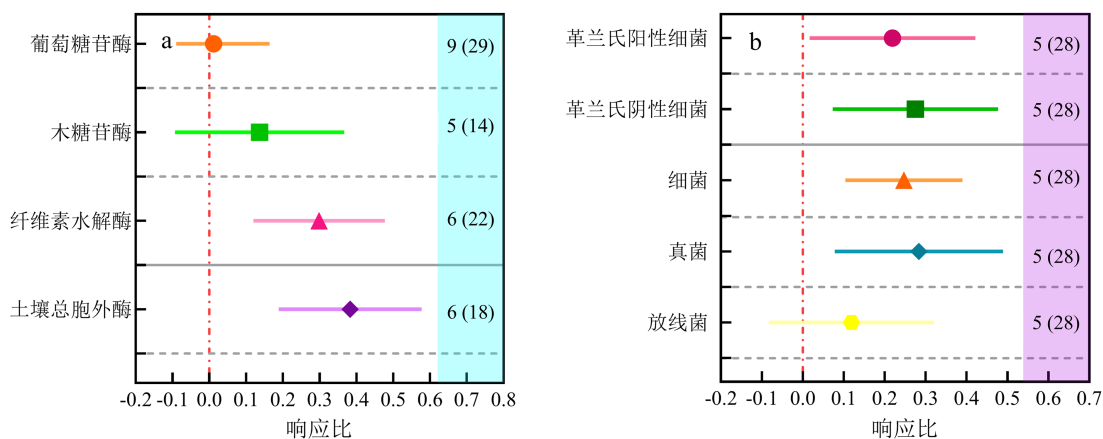


置信区间为 95%, 右侧条框中括号外的数值代表文章数量, 括号里的数值代表研究值数量,

*代表生物炭添加对土壤理化性质的影响具有显著差异。

图3 生物炭添加对土壤理化性质的影响

Fig. 3 The responses of soil physicochemical properties to biochar addition

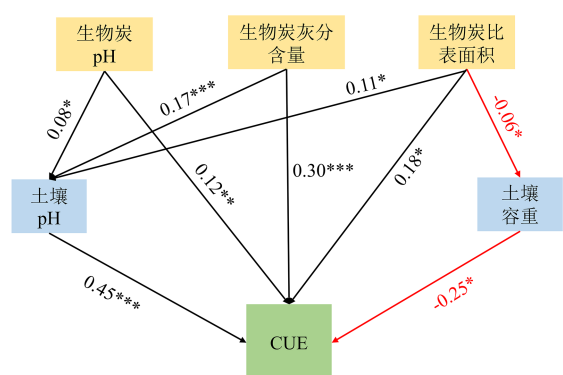


置信区间为 95%, 右侧条框中括号外的数值代表文章数量, 括号里的数值代表研究值数量,

*代表生物炭添加对土壤酶活性及微生物的影响具有显著差异。

图4 生物炭添加对土壤酶活性及微生物的影响

Fig. 4 The effects of biochar addition on soil enzyme activity and microorganisms



红色和黑色箭头分别表示负效应路径和正效应路径,线条旁的数值代表路径系数 λ , *、**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上达显著水平。

图5 生物炭性质对 CUE 的直接及间接影响的结构方程模型

Fig. 5 Structural equation model of direct and indirect effects of biochar properties on carbon use efficiency

条件^[29];也即是说生物炭调控土壤 CUE 的生态功能受生物炭原材料与制备条件的影响。研究中发现不同原材料、不同温度制备的生物炭会导致生物炭 pH、比表面积和灰分含量有着显著的差异(图 1)。生物炭的 pH、比表面积与灰分含量因生物炭原材料与裂解温度的不同有着明显的差异^[30]。本研究统计结果再次印证生物炭的原材料与制备条件控制着生物炭的物理化学性质。从本质上讲,土壤 CUE 是碳源在微生物合成代谢与分解代谢之间的比值,任何涉及微生物发育的措施都会对土壤 CUE 造成影响^[31]。生物炭的添加,直接在土壤酸碱环境、营养供应、物理结构等方面对微生物的生长环境带来多维角度的影响,势必会对土壤 CUE 在不同层面上进行调控。前面研究结果展示不同原料种类的生物炭(木材类、秸秆类和坚果壳类)在不同热解温度的制备下,形成了不同的 pH、比表面积以及灰分含量,进而对土壤 CUE 产生影响(图 2)。不同原材料比如秸秆、木材以及坚果壳等,制备生物炭前其木质素含量有着显著的差异,不仅会造成制备生物炭碳含量的差异,同时也会在碳组成方面产生明显差异^[32]。研究显示木质素含量高(坚果壳)的原材料制成的生物炭中难以降解的芳香族含量高,容易分解的碳含量少。纤维素、半纤维素含量高的原料(秸秆)制备的生物炭中易降解碳比例较高。当生物炭添加到土壤后,容易分解的部分碳作为一种碳源能够短期内刺激微生物繁殖,微生物呼吸消耗增加、CUE 下降^[33],并且在易降解碳逐步消耗后 CUE 才可能随碳源稳定性提升而恢复^[34]。同时,研究结

果显示相比坚果壳生物炭,木材或者秸秆生物炭灰分含量较高,可以提供更多的微生物必需矿质元素,可以有效缓解“元素限制”,提升碳同化效率^[35]。通常情况下,生物炭高灰分意味着碱性较强,有利于缓解酸性障碍恢复微生物酶活性与微生物环境(图 4),促进 CUE 上升^[36]。与此同时,不同生物炭的多孔结构能为微生物提供“物理庇护所”,减少微生物之间的捕食与拮抗,增强群落稳定性来提升微生物群落存活率^[37],最终对土壤 CUE 产生影响。本 Meta 分析发现,当生物炭添加量超过 5%(约 75 t/hm²)时,CUE 提升效应消失甚至出现下降趋势。高剂量生物炭的巨大比表面积和微孔结构可吸附可溶性有机碳,降低了底物有效性,而¹³C 标记实验证实,高剂量处理下外源葡萄糖的矿化率显著降低,说明底物被物理保护^[38]。而也有研究表明,当生物炭剂量添加过高时,土壤 C/N、C/P 比急剧升高,引发微生物磷限制和氮限制,微生物需投入更多能量合成养分获取酶,导致 CUE 下降^[39]。有学者指出高温热解生物炭中可能含有多环芳烃(PAHs)等有毒物质,高剂量下浓度升高可能对微生物产生直接毒性,因此过量施用生物炭的生态毒性风险不容忽视^[40]。其次高剂量生物炭带来的可溶性盐分(K⁺、Ca²⁺等)释放可能提高土壤溶液渗透压,微生物需投入更多能量维持渗透压平衡,从而降低生长效率^[41]。

3.2 生物炭调控 CUE 的间接作用

生物炭施入土壤后除了直接对 CUE 产生影响,还可以通过重塑土壤物理化学环境(改变土壤 pH 与土壤结构)与微生物生存环境,搭建“生物炭→土壤理化性质→微生物群落组成与发育”生态体系,间接调控微生物对碳源的获取、转化与同化效率。

生物炭添加土壤后,其自身的酸碱性可以调节土壤 pH 为微生物碳代谢创造适配微环境。常规条件下,生物炭呈现碱性,施入酸性土壤后可中和土壤酸度,将 pH 调节至菌根真菌、放线菌等最适宜范围,促进菌根真菌、放线菌等功能菌群发育,进而促进碳利用效率增加、降低碳流失^[42]。这主要是因为酸性环境会破坏微生物细胞膜电荷平衡,导致胞内酶(如纤维素酶)失活,而适宜 pH 可以最大程度保留酶活性,提高微生物 CUE^[43];在碱性土壤中:生物炭对 pH 的影响不显著,其对 CUE 的促进作用主要通过物理结构改良(增加孔隙度、改善通气性)和

养分供应(磷、钾)实现,而非 pH 调节^[44]。这与本 Meta 分析中酸性土壤 CUE 提升幅度(+15.3%)显著高于非酸性土壤(+7.8%)的结果一致。

同时,生物炭改变土壤容重,可以优化土壤通气性,进而提高土壤 CUE。生物炭多孔结构可以填充土壤原生孔隙或形成新的孔隙网络,显著降低土壤容重(尤其是中容重土壤 1.2~1.4 g/cm³,可显著降低 6.62%,如图 3b 所示),通气孔隙(孔径>0.05 mm)占比提升,氧气可快速渗透至土壤深层^[45]。为大多数好氧代谢并参与碳循环的微生物(如放线菌、好氧细菌等)提供了适宜空间,充足的氧气不仅能刺激微生物呼吸链酶活性,促进碳源完全利用,同时减少厌氧代谢的碳流失,让更多碳源流向合成代谢,提升 CUE^[46];此外,疏松的土壤结构还能减少微生物彼此之间的物理挤压,降低能量损耗,间接提升碳同化效率^[47]。

在土壤生物学特性层面,生物炭通过筛选微生物群落结构,定向富集高 CUE 功能菌群。生物炭的原料类型、热解温度、孔隙结构与 pH 调节作用,会对微生物群落产生“选择性过滤”:例如,高孔隙、稳定碳为主的高温坚果壳炭,更易富集菌根真菌,因为生物炭的多孔结构与真菌的生态位高度适配使得真菌菌丝可深入生物炭孔隙内定殖,形成“真菌-生物炭微团聚体”,而且真菌可分泌漆酶、木质素过氧化物酶等特异性酶,将难降解碳逐步分解为可同化小分子碳,能将更多碳转化为生物量而非以 CO₂ 释放^[48];其次,生物炭调节的土壤 pH(如碱性生物炭将酸性土壤 pH 缓冲至 6.0~7.5),恰好处于多数真菌的最适范围,进一步提升其碳利用能力^[45]。而部分低温制备的生物炭所释放的少量易降解碳,比如 DOC 与阴性菌(如变形菌门)的代谢需求更匹配,因为阴性菌多为异养型,可快速利用小分子碳进行繁殖,并且其对环境波动的耐受性更强,而阳性菌与其相比对环境变化更为敏感,而且增殖速率也较慢^[49]。而且生物炭的高吸附性可降低土壤中重金属(Cu、Zn)、抗生素(四环素、甲氧苄啶)等有毒物质的生物有效性,阴性菌对毒性物质的抗性普遍高于阳性菌(主要通过外膜屏障和多重耐药泵排出有毒物质),因此存活率更高^[50];同时,生物炭降低土壤容重后改善通气性和氧含量,增强阴性菌的好氧代谢(例如甲烷氧化菌),能更高效地利用碳源,因此其增强微生物 CUE 的能力也高于阳性菌^[51]。而放线菌虽有增长但幅度远小于真菌和细菌,因为放线

菌在群落中占比低,虽也能分解碳源但其酶系统(如纤维素酶)的活性低于真菌,且其最适 pH 中性偏微碱,使得放线菌的增殖会稍受抑制,增长速率较慢,一般要生长 7 天才能形成可见菌落^[52]。但放线菌的少量存在仍具有重要意义,其可分解真菌、细菌无法利用的部分复杂碳源(如几丁质),填补真菌和细菌无法利用的碳源空白,且能分泌抗生素比如链霉素来抑制病原菌生长,维持群落稳定性,确保碳源利用的全面性,间接为 CUE 提升提供保障^[53]。

土壤酶活性的激活是生物炭连接环境与微生物功能的关键生物学桥梁。微生物分解碳源依赖胞外酶的催化作用,而生物炭可通过多重路径提升酶活性:一是生物炭调节的适宜 pH,将酸性土壤 pH 缓冲至 6.0~7.5,这一区间恰好是多数碳代谢相关酶(如纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等)的微生物合成最适 pH,可直接激活酶的活性中心^[45];其次生物炭灰分中富含的钾、钙、镁等矿质元素调节养分平衡,更有利于酶的合成,例如在缺钾土壤中,生物炭补充的钾可使细菌丰度以及 β -葡萄糖苷酶活性显著升高 24.2%^[54]。二是生物炭的孔隙结构物理包埋酶分子,保护酶免受过氧化、蛋白酶降解等失活风险,延长酶的存活时间使其半衰期延长至 1.5~3 倍,持续发挥催化作用^[55]。三是富集的高功能菌群(如菌根真菌)本身就是酶的主要分泌者,群落结构优化可间接提升土壤酶总量(如图 4a 所示木糖苷酶、纤维素水解酶活性可提升 10%~40%)^[56]。酶活性的提升加速了复杂碳源(如纤维素、木质素等)向小分子可同化碳的转化,使得微生物在酶的催化作用下更高效地利用碳源,直接推动微生物 CUE 提升。本研究发现生物炭处理下 β -葡萄糖苷酶、木糖苷酶等碳获取酶活性增加,同时 CUE 也显著提升,当生物炭提供了额外碳源时,微生物获取的总能量增加,即使需要投入更多能量来合成酶,其消耗的能量占摄取总能量的比值也可能保持不变甚至下降,而另一部分能量用于自身生长,因此在营养丰富的条件下,微生物可以同时实现酶合成和生长的平衡^[57]。

3.3 当前研究的主要争议与未来方向

当前研究面临的主要争议包括激发效应的正负转化阈值、短期效应与长期效应的矛盾,因此在未来的研究中应该把此作为重点研究对象,减少争议。生物炭添加可能对土壤产生正激发效应,促进原有土壤有机质分解,导致呼吸消耗增加,从

而降低 CUE, 但高温热解生物炭通过诱导负激发效应降低土壤有机碳矿化速率^[58]。这种正负转化的阈值可能与生物炭的芳香碳含量和土壤初始 C/N 比有关。当生物炭 C/N 比 >30 且土壤初始 C/N 比 <10 时, 正激发效应占主导; 反之则出现负激发效应。也有研究指出短期(<1 年)实验中高剂量生物炭多表现为正激发效应, 而长期(>3 年)定位试验中则出现负激发效应, 这一转化可能与生物炭老化过程中表面官能团的变化有关^[59]。在系统对比了短期培养实验与长期田间试验的结果差异后, 提出“物理保护短期主导、化学计量长期主导”的双阶段调控模型^[60]。短期培养实验中, 高剂量生物炭常表现为正激发效应和 CUE 提升, 而长期定位试验中, CUE 在 20 t/hm² 达峰值后随剂量增加而下降, 说明短期内以物理保护效应为主, 生物炭孔隙捕获碳源, 而长期培养之后碳氮比等元素失衡引发养分限制, 从而使 CUE 下降^[61]。

目前一些新兴的技术和方法在预测生物炭-土壤-微生物互作中的应用逐渐被普及, 而这也为未来的研究方向提供了创新和思路: (1) 同位素示踪技术: ¹³C 和 ¹⁸O 双标记技术可同时追踪生物炭碳在微生物生物量、呼吸和残体中的分配, 揭示 CUE 的真实动态。例如有研究应用该技术发现, 生物炭添加后添加的葡萄糖被保护在孔隙内, 微生物死亡后残体在孔隙中积累, 这一发现修正了传统对 CUE 理解的局限^[38]。(2) 宏基因组学与代谢组学: 高通量测序结合代谢组分析可揭示功能基因和代谢通路的响应。李晓玉等^[57]在 Biochar 的研究应用生物信息学方法, 从 Cd 污染土壤中靶向发掘差异丰度类群和共现网络关键物种, 构建合成群落, 为理解生物炭-微生物互作提供了新视角。(3) 纳米二次离子质谱 (NanoSIMS): 可结合 ¹³C 稳定同位素示踪技术, 在纳米尺度追踪碳的流动和转化, 在未来具有观察微生物在生物炭孔隙内的定殖和死亡残体的积累过程的潜力^[62]。

4 结论与展望

4.1 主要结论

研究中 Meta 分析表明, 生物炭调控土壤 CUE 受到生物炭自身理化性质、使用方法以及土壤环境、微生物功能等诸多方面的影响。生物炭添加土壤不仅通过直接的自身物理、化学性质改变土壤性质, 比如增加土壤中可利用态碳含量, 直接影响土壤 CUE。同时, 也可以通过调节土壤理化性质比如 pH, 土壤孔隙度等影响到土壤中微生物的群落组成与土壤酶活性。显然, 无论是直接影响还是间接机制, 生物炭对土壤 CUE 的影响都会因为生物炭的原材料与制备条件这些影响生物炭理化性质的因素差异产生幅度变化, 甚至转向。研究结果表明不同原材料比如木材、秸秆或者坚果以及不同热解温度下制备的生物炭对土壤 CUE 的影响有着明显的差异。同样地, 生物炭的使用量也对土壤 CUE 产生影响, 并且会叠加生物炭性质与土壤环境。因此, 为了达到通过生物炭调控土壤 CUE 的变化, 最终有利于土壤固碳的目的, 生物炭需要针对需求进行相应原材料选取、制备条件的制定以及使用方法的确定。

4.2 研究局限与展望

本研究存在以下局限性, 需在未来的研究中加以关注: (1) 长期培养实验的数据不足, 对生物炭老化后 CUE 响应规律的认知仍有限; (2) 机制研究深度有限: 现有研究多报告 CUE 的表观变化, 对微生物功能基因、代谢路径和群落结构变化机制的探究不足; (3) 在研究 CUE 时, 大多数实验为田间试验, 其可能受自然气候条件的影响, 比如年平均气温、年平均降雨量等, 但本研究中并未提及。因此未来研究方向可以展开多因素耦合研究, 开展生物炭、气候、土壤以及作物的多因子长期定位试验微观机制解析, 同时进行经济-环境综合评价: 在优化土壤 CUE 的同时, 评估生物炭施用的经济效益和生态风险。

参 考 文 献

- [1] Geweda A E, Zayed M E, Khan M Y, et al. Mitigating CO₂ emissions: a review on emerging technologies/strategies for CO₂ capture[J]. Journal of the Energy Institute, 2025, 118: 101911.
- [2] Rhodes C J. The 2015 paris climate change conference: Cop21[J]. Science Progress, 2016, 99(1): 97-104.
- [3] Whalen E D, Grandy A S, Geyer K M, et al. Microbial trait multifunctionality drives soil organic matter formation potential[J]. Nature Communications, 2024, 15: 10209.
- [4] Doetterl S, Stevens A, Six J, et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate[J]. Nature Geoscience, 2015,

- 8(10): 780-783.
- [5] Kpemoua T P I, Barré P, Chevallier T, et al. Drivers of the amount of organic carbon protected inside soil aggregates estimated by crushing: a meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2022, 427: 116089.
 - [6] Zhou J C, Luo Y Q, Chen J. Dilemmas in linking microbial carbon use efficiency with soil organic carbon dynamics[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(2): e70047.
 - [7] Dang R, Liu J, Lichtfouse E, et al. Soil microbial carbon use efficiency and the constraints[J]. *Annals of Microbiology*, 2024, 74(1): 37.
 - [8] Manzoni S, Taylor P, Richter A, et al. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 79-91.
 - [9] Zhang Q Y, Fan Z Y, Wang Z H, et al. Ecosystems and climate determine terrestrial microbial carbon use efficiency[J]. *Catena*, 2025, 258: 109279.
 - [10] Wu Z, Zhang X, Dong Y B, et al. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107625.
 - [11] Qin X B, Li Y E, Wang H, et al. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: a four-year case study in South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1390-1401.
 - [12] Lu W W, Ding W X, Zhang J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 12-21.
 - [13] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512-523.
 - [14] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994.
 - [15] Cui J, Ge T D, Nie M, et al. Contrasting effects of maize litter and litter-derived biochar on the temperature sensitivity of paddy soil organic matter decomposition[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1008744.
 - [16] Guo K Y, Zhao Y Z, Liu Y, et al. Pyrolysis temperature of biochar affects ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient-use efficiency in a bamboo forest soil[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114162.
 - [17] Liu Z W, Wu X L, Liu W, et al. Greater microbial carbon use efficiency and carbon sequestration in soils: amendment of biochar versus crop straws[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(12): 1092-1103.
 - [18] Wang Q, Xue N, Li W F, et al. Co-application of compost and biochar promotes soil carbon sequestration: evidence from eco-enzymatic stoichiometry[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 38: 104211.
 - [19] Wang Y H, Joseph S, Chen C M, et al. Goethite-enriched biochar mitigates soil emissions of CO₂ during arsenic passivation: effect and mechanisms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476: 146542.
 - [20] Xu H, Cai A D, Wu D, et al. Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: a global meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105125.
 - [21] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(7): 930-939.
 - [22] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, et al. Responses of soil microbial communities to nutrient limitation in the desert-grassland ecological transition zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 45-55.
 - [23] Sun Z C, Zhang Z C, Zhu K, et al. Biochar altered native soil organic carbon by changing soil aggregate size distribution and native SOC in aggregates based on an 8-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134829.
 - [24] Zhang G R, Zhang L, Shi Z Y, et al. Microbial nutrient limitation and carbon use efficiency in saline-alkali soil amended with biochar: insights from ecoenzymatic C:N:P stoichiometry[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 68.
 - [25] Yang J K, Li L, Xu Y N, et al. Effects of straw biochar on microbial-derived carbon: a global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122233.
 - [26] Bai J Z, De Almeida Moreira B R, Bai Y X, et al. Assessing biochar's impact on greenhouse gas emissions, microbial biomass, and enzyme activities in agricultural soils through meta-analysis and machine learning[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 963: 178541.
 - [27] Kerner P, Struhs E, Mirkouei A, et al. Microbial responses to biochar soil amendment and influential factors: a three-level meta-analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(48): 19838-19848.
 - [28] Yang C D, Chang Y X, Liu J J, et al. Differences in the physical protection mechanisms of soil organic carbon with ¹³C-labeled straw and biochar [J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 32.
 - [29] Wang J L, Wang S Z. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 1002-1022.
 - [30] He M J, Xu Z B, Hou D Y, et al. Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(7): 444-460.

- [31] Geyer K M, Dijkstra P, Sinsabaugh R, et al. Clarifying the interpretation of carbon use efficiency in soil through methods comparison[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 128: 79-88.
- [32] Liu Z G, Quek A, Hoekman S K, et al. Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization[J]. *Fuel*, 2013, 103: 943-949.
- [33] Jatuwong K, Aiduang W, Kiatsiriroat T, et al. A review of biochar from biomass and its interaction with microbes: enhancing soil quality and crop yield in brassica cultivation[J]. *Life*, 2025, 15(2): 284.
- [34] Kumar Y, Ren W, Tao H Y, et al. Impact of biochar amendment on soil microbial biomass carbon enhancement under field experiments: a meta-analysis[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 2.
- [35] He M J, Xiong X N, Wang L, et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125378.
- [36] Bai X X, Tang J, Lin Q W. Biochar affects soil properties over 1 m depth in an alkaline soil of North China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 123097.
- [37] Hu Y, Li Y, Liu K M, et al. Improving the stability of black soil microbial communities through long-term application of biochar to optimize the characteristics of DOM components[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 84.
- [38] Kalu S, Seppänen A, Mganga K Z, et al. Biochar reduced the mineralization of native and added soil organic carbon: evidence of negative priming and enhanced microbial carbon use efficiency[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 7.
- [39] Lu Y H, Tan Y, Li G, et al. Nitrogen fertilizer reduction and biochar addition change the microbial carbon and nitrogen use efficiency of farmland soils in arid areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 394: 127669.
- [40] Sia C J, Kooh M R R, Lim L H. Polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: influence of thermochemical parameters and analytical considerations[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 192: 107296.
- [41] Ma Y Y, Chen Z Y, Yi G P, et al. Effectiveness and mechanism of in situ sludge biochar carrier enhancing salt-tolerant bacteria for pyrazolone degradation in high-salinity pharmaceutical wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2026, 440: 133489.
- [42] Enebe M C, Ray R L, Griffin R W. The impacts of biochar on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: a review[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 107.
- [43] He X J, Abs E, Allison S D, et al. Emerging multiscale insights on microbial carbon use efficiency in the land carbon cycle[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 8010.
- [44] Qiu Y, Wang Y J, Zhang Y B, et al. Effects of adding different types and amounts of biochar to saline alkali soil on its salt ions and microbial community in northwest China[J]. *iScience*, 2025, 28(4): 112285.
- [45] Ali A, Jabeen N, Chachar Z, et al. The role of biochar in enhancing soil health & interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1595208.
- [46] Wijitkosum S, Sriburi T, Chutivisut P. Biochar amendment improves soil properties and augments soil bacteria on continuous maize cultivation over two years[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2025, 22(13): 12349-12362.
- [47] Wilpiszeski R L, Aufrecht J A, Retterer S T, et al. Soil aggregate microbial communities: towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(14): e00324-e00319.
- [48] Sun J, Tu S X, Lu X R, et al. Coupling of biochar and manure improves soil carbon pool stability, pore structure, and microbial diversity[J]. *Agronomy*, 2025, 15(6): 1384.
- [49] Guo Y, Li S Z, Gu S S, et al. Lake carbon loss driven by changed microbial carbon utilization through increased anthropogenic land-use intensity [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 606.
- [50] Fang J, Chen Z W, Yu Z G, et al. Biochar suppresses conjugative transfer of antibiotic resistance genes in manure-amended soils[J]. *The ISME Journal*, 2025, 19(1): wraf187.
- [51] Qiao L K, Wang J F, Wei S S, et al. The soil microbial carbon pump for carbon sequestration[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2025, 23(5): 1145-1151.
- [52] Chen F, Hu X, Hong Z Y, et al. Screening, identification, and fermentation optimization of the antagonistic actinomycete strain TCS₂1-117 against *botrytis cinerea*[J]. *Microorganisms*, 2025, 13(2): 379.
- [53] Wang C, Dong D, Wang H S, et al. Metagenomic analysis of microbial consortia enriched from compost: new insights into the role of Actinobacteria in lignocellulose decomposition[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2016, 9(1): 22.
- [54] Wei W, Li K Y, Li C J, et al. Enhancing soil phosphorus and potassium availability in tea plantation: the role of biochar, PGPR, and phosphorus- and potassium-bearing minerals[J]. *Agronomy*, 2025, 15(6): 1287.
- [55] Bijoy G, Rajeev R, Benny L, et al. Enzyme immobilization on biomass-derived carbon materials as a sustainable approach towards environmental applications[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135759.
- [56] Boros-Lajszner E, Wyszowska J, Kucharski J. Biochar as a stimulator of zea mays growth and enzyme activity in soil contaminated with zinc, copper, and nickel[J]. *Agronomy*, 2025, 15(7): 1543.

- [57] Chen J, Cordero I, Moorhead D L, et al. Trade-off between microbial carbon use efficiency and specific nutrient-acquiring extracellular enzyme activities under reduced oxygen[J]. *Soil Ecology Letters*, 2022, 5(2): 220157.
- [58] Ding F, Van Zwieten L, Zhang W D, et al. A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon priming following biochar amendment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1507-1517.
- [59] Weng Z H, Van Zwieten L, Singh B P, et al. Plant-biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90: 111-121.
- [60] Blanco-Canqui H, Laird D A, Heaton E A, et al. Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: field evidence of negative priming[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(4): 240-251.
- [61] Raya-Moreno I, Cañizares R, Domene X, et al. Biochar addition to a Mediterranean agroecosystem: short-term divergent priming effects[J]. *Agriculture*, 2024, 14(2): 242.
- [62] Kaiser C, Kilburn M R, Clode P L, et al. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation[J]. *New Phytologist*, 2015, 205(4): 1537-1551.

Effects of Biochar on Soil Microbial Carbon Use Efficiency: A Meta-Analysis of Mechanisms, Controversies, and Frontiers

DENG Lirong^{1,2}, CHENG Hongguang^{2,*}, WU Zhibing³, ZHU Yi¹, LIU Fang⁴,
GRATIEN Twagirayezu^{2,5}, CHENG Xiaolei^{2,3}, DENG Linbo^{2,5}, CAO Bin^{2,5}

(1. School of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. Center for R&D of Fine Chemicals of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Water Environment, Baise University, Baise Guangxi 533000, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil Microbial Carbon Use Efficiency (CUE) is a key ecological parameter that quantifies the conversion of absorbed carbon by microorganisms into their biomass or respiratory consumption. It directly regulates the fixation and release of soil carbon. As a promising soil amendment, biochar is believed to effectively influence CUE; however, its specific effects, optimal conditions, and underlying mechanisms are not yet universally recognized. This study utilized "biochar" and "microbial carbon use efficiency" as keywords to gather 545 data-sets from 26 articles in the CNKI and Web of Science core collection databases for a meta-analysis. The results showed that the addition of biochar significantly increased soil CUE, although this increase was moderated by the properties and dosage of the biochar. When the biochar application rate was $\leq 5\%$, the addition of high-temperature prepared nutshell, wood, and straw biochar resulted in increases in soil CUE by 31.78%, 7.43%, and 6.94%, respectively, compared to the control treatment. However, excessive application or biochar prepared at temperatures lower than 500 °C led to negligible or even decreased in soil CUE. Following biochar application, the average pH value increased by 3.07%, bulk density decreased by 5.47%, and soil organic carbon and microbial biomass carbon significantly increased by 46.87% and 15.74%, respectively. Additionally, the structure of the soil microbial community changed significantly, with fungal numbers increasing by approximately 28.36%, bacterial numbers by 24.72%, and actinomycetes by 11.9%. Total extracellular enzyme activity in the soil increased by 38.32%. Clearly, biochar improves soil pore structure by regulating soil pH, optimizes microbial community structure, enriches high-functioning bacterial groups, and increases soil enzyme activity, leading to a significant increase in soil CUE. This study systematically quantified the impact of biochar application on soil CUE, revealed the multiple mechanisms through which biochar enhances soil CUE via physical, chemical, and biological factors, and provided a scientific basis for precise agricultural management aimed at enhancing soil carbon sink function.

Keywords: biochar; microbial carbon utilization efficiency; meta-analysis; soil carbon cycle; microbial metabolism