

生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响

王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 刘秀霞, 吴秀兰, 卞荣军, 郑聚锋, 李恋卿, 潘根兴

引用本文:

王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 等. 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2081–2088.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0335>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同养殖阶段猪舍氨气和颗粒物污染特征及其动态

许稳, 刘学军, 孟令敏, 郑鲲

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1248–1254 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1440>

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1837–1842 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142>

生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响

王义, 王勃然, 周文涛, 祝志娟, 刘莉, 祝博文, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1479–1485 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1408>

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

典型季节规模化猪场氨排放特征研究

纪英杰, 沈根祥, 徐昶, 周忠强, 王振旗, 钱晓雍, 王晶璐, 叶贤满

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2573–2582 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0558>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 等. 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2081–2088.
WANG Jia-meng, LIU Wei, LIU Zhi-wei, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon mineralization at different depths in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 2081–2088.



开放科学 OSID

生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响

王佳盟^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 刘志伟^{1,2}, 刘秀霞^{1,2}, 吴秀兰^{1,2}, 卞荣军^{1,2}, 郑聚锋^{1,2*},
李恋卿^{1,2}, 潘根兴^{1,2}

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095)

摘要: 本文旨在揭示生物质炭施用下不同深度稻田土壤有机碳矿化特征的变化, 为提高稻田土壤生物质炭施用下的固碳效应提供参考。以太湖地区施用生物质炭 2 a 后的水稻土为研究对象, 采集了 7 个不同土壤深度的土壤样品, 通过室内培养试验, 分析了生物质炭施用下不同深度土壤有机碳分布及矿化特征。结果表明, 生物质炭仅显著增加了表层(0~10 cm)土壤总有机碳含量, 而对深层土壤无显著影响。然而, 与对照相比, 施用生物质炭显著降低了土壤 0~40 cm 有机碳矿化强度, 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层的降幅分别为 23.74%、37.57%、37.62% 和 15.95%, 并降低了 10~40 cm 土层的微生物生物量碳和 0~40 cm 土层微生物代谢熵, 同时表层(0~10 cm)土壤微生物生物量碳显著增加 11.3%, 而以上各指标在 40 cm 以下土层未因生物质炭添加而产生显著变化。因此, 生物质炭在 2 a 尺度上提高了稻田土壤 0~40 cm 有机碳的稳定性, 有助于增加深层土壤固碳潜力。

关键词: 生物质炭; 深层土壤; 水稻土; 有机碳矿化

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)09-2081-08 doi:10.11654/jaes.2020-0335

Effects of biochar application on soil organic carbon mineralization at different depths in paddy soil

WANG Jia-meng^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, LIU Zhi-wei^{1,2}, LIU Xiu-xia^{1,2}, WU Xiu-lan^{1,2}, BIAN Rong-jun^{1,2}, ZHENG Ju-feng^{1,2*}, LI Lian-qing^{1,2}, PAN Gen-xing^{1,2}

(1. Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China)

Abstract: This study aimed to clarify the effect of biochar on soil organic carbon mineralization characteristics of paddy soil at different depths and to provide a scientific basis for assessing the carbon sequestration effects of biochar in paddy soil. Soil samples were collected at seven different depths in a rice-cropping field located in Taihu Lake Region, which had received one dose of biochar two years ago. A laboratory experiment was conducted to analyze the organic carbon distribution and mineralization characteristics of the soil. The results showed that biochar application significantly increased the total organic carbon content in the surface layer (0~10 cm); however, it had no significant effect on the total organic carbon content in the layers below 10 cm. Compared with the control treatment, the biochar application significantly decreased the soil organic carbon mineralization intensity within the upper 40 cm layer. The decrease rate was 23.74%, 37.57%, 37.62%, and 15.95% for the 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, and 30~40 cm layers, respectively. Biochar application significantly decreased the microbial biomass carbon in the 10~40 cm soil layer and the microbial metabolic quotient in the 0~40 cm soil layer, whereas the soil microbial biomass carbon in the surface layer (0~10 cm) was significantly increased by 11.3% in the biochar treatment. Below 40 cm layer, there was no significant change in any of the above indicators for biochar treatment. The results suggest that biochar application can improve the soil organic carbon stability within the 0~40 cm layer in paddy soil on a two-year scale, which is beneficial for the carbon sequestration potential in deep layers of the soil profile.

Keywords: biochar; deep soil; paddy soil; organic carbon mineralization

收稿日期: 2020-03-24 录用日期: 2020-06-01

作者简介: 王佳盟(1994—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为农田土壤固碳与温室气体减排。E-mail: 979029994@qq.com

*通信作者: 郑聚锋 E-mail: zhengjufeng@njau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877097, 41877096)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877097, 41877096)

由于大气 CO_2 浓度升高而引起的全球变暖已受到世界各国政府和科学家的广泛关注。据估计,全球土壤($<1\text{ m}$)有机碳库储量约 $1\,550\text{ Pg}$,是大气碳库的2倍,陆地植被碳库的2.5倍^[1-2]。作为陆地生态系统最活跃的碳库,由于土壤有机碳储量巨大,其微小变化都可能对大气 CO_2 浓度产生重大影响。土壤有机碳矿化是土壤向大气碳输入的重要而活跃的途径,并对外界环境变化的响应极为敏感^[3-4]。土壤性质、农业管理措施、土地利用方式与环境条件等因素均显著影响土壤有机碳转化过程,进而影响土壤有机碳库的动态^[5-8]。但目前这些研究主要集中在土壤表层。近年来的研究发现,表层($<0.3\text{ m}$)土壤有机碳储量约占 3 m 深土壤有机碳库储量的33%,超过77%的有机碳储存在 30 cm 以下的深层土壤中^[1]。作为陆地碳循环的关键组成部分^[9],深层土壤有机碳的动态不可避免地受到人类活动的影响^[10]。因此,要准确评估土壤有机碳在区域和全球碳循环所起的作用,需要清楚地了解深层土壤碳库的变化^[11]。

生物质炭是生物质在无氧或者部分缺氧的情况下高温热解炭化形成的高度芳香化有机物质,具有碳含量丰富、稳定性高的特点,以及减少土壤温室气体排放的作用,其土壤应用被认为是土壤固碳的一个重要选择途径^[12-14]。目前,已有众多文献研究了生物质炭施用对土壤有机碳动态的影响,如Zhang等^[15]报道在麦-玉轮作系统中施用生物质炭可以显著增加表层土壤有机碳和水溶性有机碳(DOC)等组分含量;Liu等^[16]对施用生物质炭的土壤渗滤液测定表明,自然降雨期间,生物质炭不仅可以增加表层土壤DOC含量,同时还促进DOC向深层土壤迁移;付琳琳等^[17]在稻田施用玉米秸秆炭3a后发现易氧化态有机碳等活性有机碳组分在土壤中的分配比例显著降低。除此以外,生物质炭施用还能够改变微生物的活性和多样性,从而影响土壤有机碳的稳定性^[18-19]。上述研究表明生物质炭施用可以改变土壤有机碳组分和移动性,并可能影响深层土壤有机碳动态。然而,目前这些研究还相对不足。因此,本研究选择太湖地区施用生物质炭2a后的水稻土为对象,采集不同深度的土壤研究有机碳矿化特征,以揭示生物质炭施用对深层土壤有机碳稳定性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

田间试验开始于2016年5月,地点位于江苏省宜

兴市徐舍镇宜丰村($31^{\circ}41'\text{N}$, $119^{\circ}73'\text{E}$)。该地属于亚热带季风气候,年均温为 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $1\,246.3\text{ mm}$,土壤类型是由太湖地区第四纪湖积物发育的典型脱潜型水稻土-乌泥土,种植制度为稻-麦轮作。供试水稻土的基本理化性质为:全氮含量 $1.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 $1.32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,速效磷 $19.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $129.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 5.70。

田间试验设置两个处理,未施生物质炭处理(CK)和生物质炭处理(BC),小区面积为 30 m^2 ($5\text{ m}\times 6\text{ m}$),每个处理设3次重复,完全随机区组设计。施用的玉米秸秆生物质炭在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下限氧烧制,于2016年5月水稻种植前按 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的用量一次性均匀施入土壤表层,通过机械翻耕使其与土壤均匀混合,研究所用生物质炭的基本理化性质为:有机碳含量为 $413.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $7.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碳氮比为51.82,速效磷为 $2.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 为8.79。

1.2 土壤样品采集与处理

土壤样品于2018年5月在小麦收获后采集。在每个小区内按照5点法使用不锈钢取样器采集土壤样品,采样深度为 80 cm ,每间隔 10 cm 为一个采样层次,共采集7个层次。将所选取的5个采样点对应层次的土样充分混合,并严格挑除植物残体与石块;待样品自然风干后均分为两部分:一部分用于土壤性质的测定,另一部分用于室内矿化培养试验。

1.3 室内矿化试验

土壤有机碳矿化试验采用室内恒温恒湿好气培养法^[20]。具体方法如下:称取 60 g 过 2 mm 筛的风干土置于 500 mL 广口培养瓶中,然后准确加入一定量去离子水,调节土壤含水量至田间最大持水量的60%;将培养瓶口用瓶盖密封,并在瓶盖上插两根长度分别为 16 cm 和 7 cm 的橡胶管;接着,在橡胶管上方套一个三通阀用作气体样品采集。将培养瓶置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱培养 50 d ,期间采用称质量法定期补充水分以维持土壤水分湿度。在整个试验培养期间,每次气体采集之前,先向培养瓶中充入标准空气 5 min 以排除瓶内原有气体,再将培养瓶放入培养箱培养 6 h ,然后用带有三通阀的注射器采集气体样品,注入真空瓶,采集频率按既定的时间表进行。气体样品采用 Agilent 7890 A 气相色谱仪测定。每个处理设置3个重复,同时以不添加土壤的培养瓶作为空白试验。待培养试验结束后,破坏性取样测定土壤微生物量碳(MBC)。

1.4 土壤、生物质炭性质及微生物生物量碳测定

土壤和生物质炭的有机碳和全氮含量使用 CNS 元素分析仪 (German Elementar Company, 2003) 测定, pH 和速效磷含量测定参照鲁如坤^[21]的方法。土壤微生物生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸 - K_2SO_4 提取方法^[22]。简要过程如下: 称取两份 25 g 土壤样品, 一份不作熏蒸处理; 另一份放入干燥器中, 然后将其置于阴暗处用无醇氯仿熏蒸 24 h。待熏蒸结束后, 将熏蒸和未熏蒸的土壤样品全部转移到塑料瓶中, 加入 50 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} K_2SO_4$ 溶液, 在振荡机上振荡 30 min (25°C), 过滤; 滤液采用 TOC (Jena Multi N/C 2100) 测定。微生物生物量碳的换算系数为 0.45。

1.5 数据处理与分析

CO_2 产生速率的计算公式^[20]为:

$$F = \rho \times \frac{V}{m} \times \frac{(c_2 - c_1)}{(t_2 - t_1)} \times \frac{273}{(273 + T)} \times \alpha \quad (1)$$

式中: F 为 CO_2 排放速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状况下 CO_2 的密度, $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为培养瓶内气体体积, L; m 为土壤质量, kg; c_1 为密封时的气体浓度, c_2 为采样时气体浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; t_1 为密封时的时间, t_2 为采样时的时间; T 为培养温度, $^\circ\text{C}$; α 为 CO_2 气体换算到 C 的转化因子, 12/44。

土壤代谢熵计算公式为^[23]:

$$qCO_2 = C_{CO_2} / C_{mic} \quad (2)$$

式中: qCO_2 为土壤代谢熵; C_{CO_2} 为 CO_2 -C 排放量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{mic} 为微生物生物量碳的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

应用一级动力学方程对不同培养条件下土壤有机碳的矿化量进行拟合^[24]:

$$C_t = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

式中: C_t 为培养时间 t (d) 时的累积矿化量, $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为土壤有机碳的潜在矿化量, $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为土壤有机碳的矿化速率常数, d^{-1} ; t 为培养时间, d。

试验所得数据采用 Microsoft Excel 2016 处理, 数据的方差分析及多重比较采用 SPSS 24.0 和 JMP 13.0 软件进行, 采用 Origin 9.0 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤有机碳含量的剖面分布

从不同处理有机碳的剖面分布来看 (表 1), 土壤 0~40 cm 内土壤有机碳含量迅速降低, 不同层次间土壤有机碳含量存在显著差异; 而 40 cm 以下各层次之间无显著差异。从处理间的对比来看, 在 0~10 cm 土层, 施用生物质炭处理的土壤有机碳含量显著增加了

表 1 不同处理下土壤有机碳含量剖面分布

Table 1 Soil organic carbon content in soil profile under different treatments

深度 Depth/cm	土壤有机碳 Soil organic carbon/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
	CK	BC
0~10	23.71±1.39Ba	27.45±1.13Aa
10~20	16.10±0.92Ab	16.70±0.98Ab
20~30	9.94±0.53Ac	10.02±0.34Ac
30~40	8.03±0.11Ad	7.95±0.10Ad
40~50	7.46±0.13Ad	7.60±0.34Ad
50~60	7.58±0.42Ad	7.38±0.40Ad
60~70	7.28±0.18Ad	7.28±0.14Ad
70~80	7.30±0.77Ad	7.31±0.33Ad

注: 表中不同大写字母表示同一土壤深度不同处理间差异显著, 不同小写字母表示同一处理不同土壤深度间差异显著 ($P < 0.05$)。CK 表示未施用生物质炭处理, BC 表示施用生物质炭处理 ($15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 下同。

Note: Different uppercase letters in the table indicate significant differences between different treatments at the same soil depth, and different lowercase letters indicate significant differences among different soil depths at the same treatment ($P < 0.05$). CK indicates no biochar soil amendment; BC indicates biochar soil amendment at the rate of $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The same below.

15.8%, 而在 10~80 cm 的土层中, 不同处理间有机碳含量并无显著差异。

2.2 不同深度土壤有机碳矿化动态

不同处理下不同深度土壤的 CO_2 排放动态的趋势基本一致 (图 1)。总体而言, 各处理不同深度的土壤在整个培养期的 CO_2 排放速率变化大体可分为 3 个阶段: 在 0~7 d 土壤 CO_2 排放速率处于迅速下降阶段, 而后在 8~22 d 缓慢降低, 在 23~50 d CO_2 排放速率基本达到稳定状态。从不同深度对比来看, CK 和 BC 处理的土壤 CO_2 排放速率均随土壤深度的增加而逐渐降低。

从不同处理间的矿化量来看 (图 2A), 与 CK 处理相比, BC 处理显著降低了 0~40 cm 各层土壤有机碳的总矿化量, 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 土层有机碳矿化量降幅分别为 23.9%、37.8%、25.9% 和 22.5%; 而在 40~80 cm 深度范围内, 两处理间各土层有机碳矿化量无显著差异。相似地, 从有机碳的矿化率来看 (图 2B), 不同处理间的变化均与土壤有机碳产生速率的变化趋势基本相同, 即随深度增加而降低; 与 CK 处理相比, BC 处理中 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 分别降低了 32.7%、39.3%、27.3% 和 17.2%, 而在 40~80 cm, 两处理间无显著差异。

由表 2 可见, 在 50 d 的培养期内, 一级动力学方程

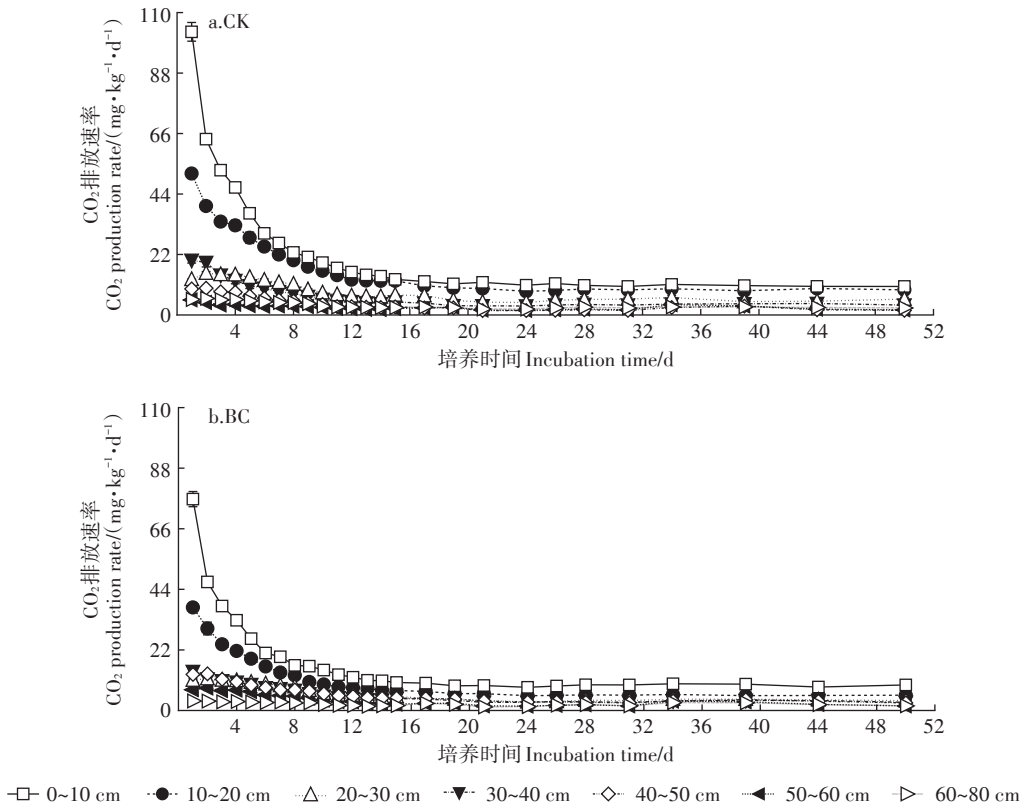
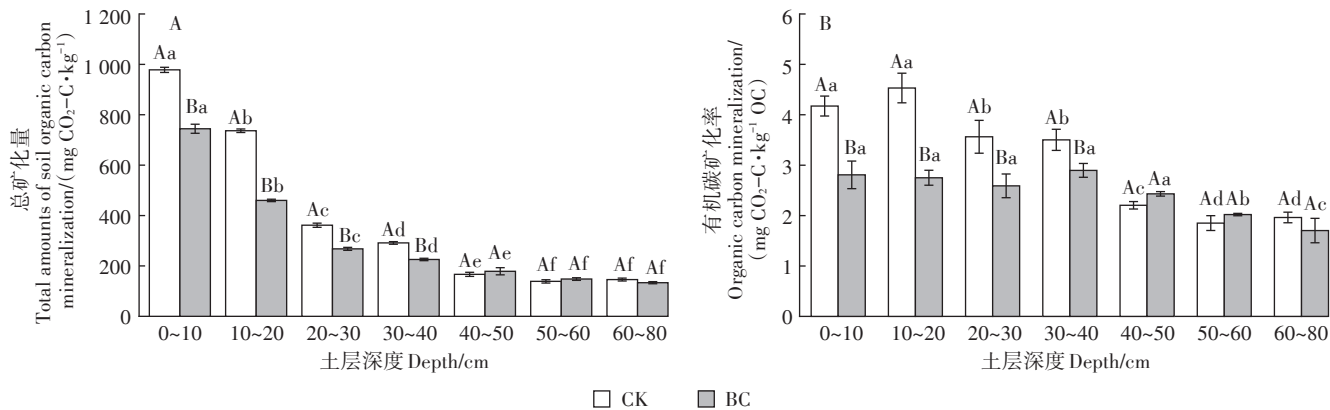


图1 不同处理下不同深度土壤CO₂释放动态

Figure 1 Dynamics of soil CO₂ production at different depths under different treatments



不同大写字母表示同一土壤深度不同处理间差异显著,不同小写字母表示同一处理不同土壤深度间差异显著($P<0.05$)
Different uppercase letters indicate significant differences between different treatments at the same soil depth, and different lowercase letters indicate significant differences among different soil depths in the same treatment ($P<0.05$)

图2 不同处理下不同深度土壤有机碳总矿化量和矿化率

Figure 2 Total amounts and rates of soil organic carbon mineralization at different depths under different treatments

能够较好地模拟土壤有机碳的矿化动态。总体来看,不同深度和不同处理的土壤有机碳潜在矿化量(C_0)均存在明显差异,变化范围为147.04~868.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这表明可矿化碳潜力随深度的增加而降低,相应地,有机碳矿化速率常数(k)在深度上表现了与之相似的变化

趋势,即随深度增加而降低,其范围在0.02~0.09 d^{-1} 。从不同处理间对比来看,BC处理的 C_0 在0~40 cm深度内显著低于CK,具体来说,在0~10、10~20、20~30 cm和30~40 cm土壤层次的可矿化潜力分别显著降低23.74%、37.57%、37.62%和15.95%,而在40~80 cm深

表2 土壤有机碳矿化方程的一级动力学参数

Table 2 First-order kinetic parameters of soil organic carbon mineralization equation

深度 Depth/cm	CK			BC		
	$C_0/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	k/d^{-1}	R^2	$C_0/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	k/d^{-1}	R^2
0~10	868.18±25.50Aa	0.09	0.95	662.05±23.99Ba	0.08	0.94
10~20	700.72±24.04Ab	0.06	0.97	437.46±13.61Bb	0.06	0.98
20~30	483.43±23.77Ac	0.03	0.99	301.55±13.92Bc	0.03	0.99
30~40	289.13±12.02Ad	0.05	0.97	243.00±8.24Bd	0.04	0.99
40~50	218.35±6.91Ae	0.05	0.98	227.66±8.75Ade	0.04	0.99
50~60	175.09±4.85Af	0.04	0.99	171.61±8.55Af	0.04	0.98
60~80	147.04±11.19Af	0.02	0.99	151.43±5.42Af	0.05	0.99

度范围内两处理之间无显著差异。

2.3 不同处理下不同深度土壤微生物生物量碳和代谢熵的变化

由表3可知,施用生物质炭对表层和深层土壤MBC的影响存在明显差异,即与CK处理相比,BC处理显著增加0~10 cm土壤MBC含量,增幅为11.3%,同时显著降低10~40 cm土壤MBC含量。在深度上,不同处理下的MBC含量呈现相似的变化趋势,即随着土壤深度的增加MBC含量逐渐降低而后趋于稳定。由表4双因素方差分析可知,生物质炭施用和土壤深度两个因素均对MBC含量产生极显著影响,且两者之间的交互作用也与MBC含量极显著相关。

土壤代谢熵可反映土壤微生物对碳源利用效率的高低,其值越大说明微生物在对土壤有机质分解时将越多碳分配于呼吸作用,导致其对碳源的利用效率降低。由表3可知,与CK处理相比,BC处理显著降低了0~40 cm各层土壤的代谢熵,降幅分别达到36.4%、47.6%、38.9%以及36.8%。在深度上,不同处理下层的土壤代谢熵均显著低于表层0~10 cm土壤代谢熵,且10~80 cm各层间土壤代谢熵并无明显差异(40~50 cm除外)。

表3 不同处理下土壤微生物生物量碳和代谢熵

Table 3 Soil MBC and metabolic quotient under different treatments

深度 Depth/cm	微生物生物量碳 MBC/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		代谢熵 Metabolic quotient	
	CK	BC	CK	BC
0~10	299.24±16.64Ba	333.09±19.78Aa	0.33±0.04Aa	0.21±0.02Ba
10~20	269.04±18.55Ab	228.83±18.48Bb	0.21±0.03Ab	0.11±0.01Bc
20~30	78.37±6.45Ac	39.10±1.37Bc	0.18±0.02Ab	0.11±0.02Bc
30~40	55.96±1.59Ad	20.80±1.54Bc	0.19±0.03Ab	0.12±0.01Bc
40~50	21.17±2.54Ae	23.96±1.53Ac	0.16±0.02Abc	0.16±0.02Aab
50~60	17.20±1.89Ae	17.59±2.29Ac	0.13±0.03Ac	0.15±0.01Abc
60~80	14.04±1.41Af	19.32±3.51Ac	0.16±0.02Abc	0.14±0.02Abc

表4 土壤测定参数双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA analysis of soil measurement parameters

因素 Factors	微生物生物量碳 MBC	F	代谢熵 Metabolic quotient	F
施炭 Biochar application	**	6.348 2	**	59.552 0
深度 Depth	**	599.406 7	**	27.170 9
施炭×深度 Biochar application×Depth	**	6.824 9	**	9.072 9

注:**表示两个因素之间极显著相关($P<0.01$)。

Note: ** indicates extremely significant interaction between two factors($P<0.01$).

3 讨论

3.1 生物质炭施用对水稻土深层有机碳动态的影响

已有众多研究表明,由于生物质炭本身有机碳稳定性高,其农田施用可以在短期内显著增加土壤表层有机碳含量^[12,25]。例如方明等^[26]采用盆栽试验探讨花生壳生物质炭用于农田土壤改良效果的研究表明,生物质炭施用3个月后,红壤和潮土表层土壤有机碳含量显著高于对照和单施氮肥处理,增幅分别为3.4%~

43.9%和10.6%~62.1%,包建平等^[27]通过大田试验研究玉米秸秆炭施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响发现,玉米秸秆炭施用9个月后土壤表层有机碳含量较对照处理和单施玉米秸秆处理增加112.1%和85.4%。与已报道的结果相似,本研究中施用生物质炭的处理显著增加了表层土壤有机碳含量(表1),但从剖面有机碳的变化来看,施用生物质炭对其在深层土壤的分布无显著影响。这主要与稻田土壤剖面特征和生物质炭的迁移程度有关。首先,生物质炭本身所含有机碳稳定性较高,在短期会大量滞留于土壤,并经土壤团聚化被物理保护^[18]。其次,生物质炭施用可以增加作物产量与根系生物量,从而提高植物碳向表层土壤中的输入^[28-29]。再者,稻田土壤存在致密的犁底层,使生物质炭在向下垂直迁移时受阻,因此,在短期内,生物质炭进入深层土壤较为困难,使深层土壤有机碳总量变化不大。Obia等^[30]利用¹³C同位素方法,对不同质地(红砂土和砂壤土)土壤生物质炭在土壤垂直和水平方向迁移特征进行的研究表明,经过1 a后生物质炭颗粒向下迁移最远距离仅为8 cm,由此可见,生物质炭进入土壤后,短期内不易以游离态纵向迁移,尤其是稻田土壤在不被破坏犁底层的条件下,迁移更为困难。因此,生物质炭表层施用对深层土壤总有机碳的影响并不显著。

3.2 生物质炭施用对不同深度有机碳稳定性的影响

土壤有机碳矿化是由酶介导、微生物驱动的过程^[31],其矿化强度取决于土壤可利用基质的供应与微生物利用效率的相对强度,可用于评估外界环境或人为因素变化对其产生的影响^[32]。本研究表明深层有机碳矿化量与潜在可矿化碳均显著低于表层土壤,这与王永慧等^[33]研究不同地力玉米田浅层和深层土壤有机碳矿化特征的结果相似,这可能与深层土壤易分解的基质降低有关^[34]。而且深层土壤微生物代谢熵也明显低于表层,这是在深层土壤中可利用基质的限制下,土壤微生物提供自身生存的一种策略。Fontaine等^[35]采用添加植物凋落物作为新鲜碳源的方法,也证明了深层土壤微生物具有高效利用基质的能力。

本研究还表明生物质炭施用影响了深层土壤有机碳的稳定性。在2 a尺度上稻田施用生物质炭虽然显著增加了表层土壤有机碳总量,但降低了0~40 cm土层有机碳的矿化强度和微生物代谢熵,这表明生物质炭作为外源输入碳,大量滞留在表层,在空间(特别是垂直空间)上迁移程度低,从表面上看对深层土壤

难以形成直接影响。因此,生物质炭滞留的表层(0~10 cm)土壤和未直接接触的深层(10~40 cm)有机碳矿化强度降低的机制存在差异。在表层土壤中,生物质炭的存在,一方面改善了土壤的结构性和通气性^[36],并提高了植物根系的输入,因而促进了微生物生物量增加。由于土壤环境改变,土壤微生物的群落组成和酶活性随之发生改变,如脱氢酶的活性降低^[37-39],以及碳源利用率较高的真菌比例增加^[23],在此条件下,有机碳分解过程中分配于呼吸碳的比例降低,因而有利于土壤有机质的保持。另一方面,生物质炭具有表面积大和疏松多孔的特征,与土壤相互作用形成团聚体,可以对土壤有机质进行保护,降低微生物的可利用性^[18]。相对表层土壤而言,深层土壤不易受到生物质炭的直接作用,有机碳矿化强度降低可能包含以下几方面的原因:一是由于生物质炭本身含有一定的多环芳烃,在土壤中施用可增加其在土壤中的含量^[40],在稻田水分充足的条件下,可随水分迁移进入深层土壤^[41],从而对微生物产生一定的毒性,进而减少微生物生物量。二是如上所述,由于生物质炭本身的生物稳定性较高,本身特殊结构与强大的吸附性能可吸附土壤中的可溶性碳,从而对其形成的固定作用,降低其在土壤剖面中的迁移能力和数量^[42],同时,由于土壤有机碳中可移动组分(如DOC)在迁移过程中可能被土壤矿物吸附固定,进一步降低了有机基质对深层土壤微生物的供给,由此导致深层土壤微生物可利用碳随深度而降低,从而降低深层土壤微生物量,作为对环境变化适应的响应,深层土壤中微生物将通过增加对基质的利用效率来提高其生存策略,从而提高了深层土壤有机碳的生物稳定性。但这些变化在短期内对深层土壤的影响程度因深度而异,生物质炭施用对深层土壤的长期效应还有待进一步研究。

4 结论

稻田土壤在生物质炭施用2 a后可显著增加表层(0~10 cm)土壤有机碳含量,而对深层无显著影响。然而,生物质炭表层施用可显著降低0~40 cm土壤有机碳矿化强度,并显著降低深层土壤微生物量碳和代谢熵,从而增加深层土壤有机碳的稳定性。因此,生物质炭施用有助于增加稻田土壤的固碳潜力。

参考文献:

- [1] Lal R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil or-

- ganic carbon sequestration in agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3285-3301.
- [2] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):423-436.
- [3] Yousaf B, Liu G j, Wang R W, et al. Investigating the biochar effects on C-mineralization and sequestration of carbon in soil compared with conventional amendments using the stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) approach[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(6):1085-1099.
- [4] 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.
- [5] Kellman L, Myette A, Beltrami H. Depth-dependent mineral soil CO_2 production processes: Sensitivity to harvesting-induced changes in soil climate[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8):1-21.
- [6] 葛序娟, 潘剑君, 尹正宇, 等. 不同土层水稻土培养条件下有机碳矿化规律研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(3):570-577.
- GE Xu-juan, PAN Jian-jun, YIN Zheng-yu, et al. Study on characters of soil organic carbon mineralization in different layers of paddy soil under the condition of incubation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):570-577.
- [7] Luo Y, Wan S, Hui D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [8] Riaz M, Roohi M, Arif M S, et al. Corn-cob-derived biochar decelerates mineralization of native and added organic matter (AOM) in organic matter depleted alkaline soil[J]. *Geoderma*, 2017, 294:19-28.
- [9] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2):143-158.
- [10] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, et al. Controls on microbial CO_2 production: A comparison of surface and subsurface soil horizons[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(9):1322-1332.
- [11] Jia X X, Wu H M, Shao M A, et al. Re-evaluation of organic carbon pool from land surface down to bedrock on China's Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 293:1-8.
- [12] Lorenz K L, Lal R. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(5):651-670.
- [13] Zhu L X, Xiao Q, Shen Q Y, et al. Effects of biochar and maize straw on the short-term carbon and nitrogen dynamics in a cultivated silty loam in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1):1019-1029.
- [14] Palansooriya K N, Wong J T F, Hashimoto Y, et al. Response of microbial communities to biochar-amended soils: A critical review[J]. *Biochar*, 2019, 1(1):3-22.
- [15] Zhang A F, Zhou X, Li M, et al. Impacts of biochar addition on soil dissolved organic matter characteristics in a wheat-maize rotation system in Loess Plateau of China[J]. *Chemosphere*, 2017, 186:986-993.
- [16] Liu C, Wang H L, Li P L, et al. Biochar's impact on dissolved organic matter (DOM) export from a cropland soil during natural rainfalls[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650:1988-1995.
- [17] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6):1379-1384.
- FU Lin-lin, LIN Hai-hong, LI Lian-qing, et al. Persistent effects of biochar application on organic carbon fractions of paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6):1379-1384.
- [18] 朱孟涛, 刘秀霞, 王佳盟, 等. 生物质炭对水稻土团聚体微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(5):1-12.
- ZHU Meng-tao, LIU Xiu-xia, WANG Jia-meng, et al. Effects of biochar in soil aggregates microbial diversity from paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(5):1-12.
- [19] 黄家庆, 叶菁, 李艳春, 等. 生物炭对猪粪堆肥过程中细菌群落结构的影响[J]. 微生物学通报, 2020, 47(5):1477-1491.
- HUANG Jia-qing, YE Jing, LI Yan-chun, et al. Effect of biochar on bacteria community structure of pig manure composting[J]. *Microbiology China*, 2020, 47(5):1477-1491.
- [20] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6):1371-1378.
- LIU Zhi-wei, ZHU Meng-tao, GUO Wen-jie, et al. Comparison of soil organic carbon stability and greenhouse gas emissions potential under straw or straw-derived biochar amendment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6):1371-1378.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analysis methods of agricultural chemistry on soil[M]. Beijing: Agriculture and Science Press, 2000.
- [22] Yeboah S, Zhang R, Cai L, et al. Tillage effect on soil organic carbon, microbial biomass carbon and crop yield in spring wheat-field pea rotation[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2016, 62(6):279-285.
- [23] 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.
- [24] 康熙龙, 张旭辉, 张硕硕, 等. 旱地土壤施用生物质炭的后效应: 水分条件对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1):152-158.
- KANG Xi-long, ZHANG Xu-hui, ZHANG Shuo-shuo, et al. Effects of biochar application history on soil: Effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization[J]. *Soil*, 2016, 48(1):152-158.
- [25] Greenberg I, Kaiser M, Polifka S, et al. The effect of biochar with biogas digestate or mineral fertilizer on fertility, aggregation and organic carbon content of a sandy soil: Results of a temperate field experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(5):824-835.
- [26] 方明, 任天志, 赖欣, 等. 花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1300-1310.
- FANG Ming, REN Tian-zhi, LAI Xin, et al. Effects of peanut shell biochar on physico-chemical properties and greenhouse gas emission

- in fluvo-aquic soil and red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1300-1310.
- [27] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3):721-729.
BAO Jian-ping, YUAN Gen-sheng, DONG Fang-yuan, et al. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3):721-729.
- [28] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高壤土团聚体稳定性及作物产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5):782-791.
LI Wei, DAI Zhen, ZHANG Guang-xin, et al. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5):782-791.
- [29] Abiven S, Hund A, Martinsen V, et al. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: A shovelomics study in Zambia[J]. *Plant and Soil*, 2015, 395(1/2):45-55.
- [30] Obia A, Børresen T, Martinsen V, et al. Vertical and lateral transport of biochar in light-textured tropical soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165:34-40.
- [31] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(12):5680-5686.
MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-ling, et al. Effects of varying long-term fertilization on organic carbon mineralization and priming effect of paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12):5680-5686.
- [32] 吴东梅, 郭剑芬, 张政, 等. DOM对米槠次生林不同土层土壤微生物呼吸及其熵值的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(11):3806-3815.
WU Dong-mei, GUO Jian-fen, ZHANG Zheng, et al. Effects of dissolved organic matter addition on soil microbial respiration and quotient values in a secondary *Castanopsis carlesii* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11):3806-3815.
- [33] 王永慧, 杨殿林, 红雨, 等. 不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3):590-599.
WANG Yong-hui, YANG Dian-lin, HONG Yu, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in the soil of maize fields with different soil fertility[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3):590-599.
- [34] 马昕昕, 许明祥, 杨凯, 等. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. *环境科学*, 2012, 33(11):3893-3900.
MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai, et al. Soil organic carbon mineralization of black locust forest in the deep soil layer of the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11):3893-3900.
- [35] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167):277-280.
- [36] 刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4):933-944.
LIU Zhi-peng, XU Jie-nan, SHE Dong-li, et al. Effects of biochar addition on thermal properties of loamy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4):933-944.
- [37] 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.
- [38] Chen J, Sun X, Li L, et al. Change in active microbial community structure, abundance and carbon cycling in an acid rice paddy soil with the addition of biochar[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(6):857-867.
- [39] Jiang X, Deneff K, Stewart C E, et al. Controls and dynamics of biochar decomposition and soil microbial abundance, composition, and carbon use efficiency during long-term biochar-amended soil incubations[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(1):1-14.
- [40] Wang J, Odinga E S, Zhang W, et al. Polyaromatic hydrocarbons in biochars and human health risks of food crops grown in biochar-amended soils: A synthesis study[J]. *Environment International*, 2019, 130:104899.
- [41] Kuśmierz M, Oleszczuk P, Kraska P, et al. Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar-amended soil[J]. *Chemosphere*, 2016, 146:272-279.
- [42] 李莹, 魏志超, 李惠通, 等. 生物炭对杉木人工林土壤碳氮矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2):314-321.
LI Ying, WEI Zhi-chao, LI Hui-tong, et al. Effect of biochar on C and N mineralization in soil from Chinese fir plantation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2):314-321.