

葵花秸秆水热炭对土壤有机碳及其矿化特征的影响

姚佳^{1,2}, 王雪韧^{1,2}, 张普河^{1,2}, 赵世翔^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学 资源与环境学院 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 探讨不同制备温度葵花秸秆水热炭添加对土壤有机碳(SOC)及其组分的影响,为葵花秸秆资源化利用和土壤固碳提供理论依据。[方法] 以葵花秸秆为原料,分别在 180 °C 和 220 °C 制备水热炭(SB180, SB220)。通过室内培养试验,分析不同温度制备的水热炭及不同添加量输入对土壤有机碳及组分的差异化调控。[结果] ①随着制备温度的升高,水热炭的碳含量、芳香度、比表面积以及孔体积增大。②随着制备温度和添加量的增加,土壤有机碳、矿物结合态有机碳(MAOC)和颗粒有机碳(POC)含量显著提高,2%SB220 处理的 SOC, POC 以及 MAOC 含量最高,分别较对照增加了 75.34%, 23.34% 和 105.75%。③土壤有机碳矿化速率、累积矿化量、潜在可矿化量(C_p)以及激发效应(P_E)随着制备温度的升高而降低,随添加量的增加而增加,2%SB220 的累积矿化量、 C_p 以及 P_E 较 1%SB220 分别升高了 50.88%, 57.61% 和 79.51%。[结论] SB220 显著提升了土壤有机碳、矿物结合态有机碳和颗粒有机碳含量,有较好的固碳潜力,但随着添加量增加,碳排放风险增加,建议添加 1% 的 SB220, 实现碳矿化损失与长效固存的平衡。

关键词: 水热炭; 土壤有机碳; 矿物结合态有机碳; 颗粒有机碳; 激发效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0286-08

中图分类号: S154

文献参数: 姚佳, 王雪韧, 张普河, 等. 葵花秸秆水热炭对土壤有机碳及其矿化特征的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 286-293. Yao Jia, Wang Xueren, Zhang Puhe, et al. Effects of hydrochar from sunflower straw on soil organic carbon and its mineralization characteristics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 286-293. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.039; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.039.

Effects of hydrochar from sunflower straw on soil organic carbon and its mineralization characteristics

Yao Jia^{1,2}, Wang Xueren^{1,2}, Zhang Puhe^{1,2}, Zhao Shixiang^{1,2}

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Ecological Safety and Green Development of Autonomous Region in Higher Education, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The effects of different preparation temperatures for hydrochars from sunflower straw on soil organic carbon (SOC) and its components were investigated to provide a theoretical basis for sunflower straw resource utilization and soil carbon sequestration. [Methods] Hydrochars (SB180 and SB220) were prepared from sunflower straw at 180 °C and 220 °C, respectively, and indoor incubation tests were conducted to analyze the differential regulation of SOC and its fractions by varying preparation temperatures and additive amounts of hydrochar input. [Results] ① The carbon content, aromaticity, specific surface area, and pore volume of the hydrochars gradually increased with increasing preparation temperature. ② The contents of SOC, mineral-associated organic carbon (MAOC), and particulate organic carbon (POC) significantly increased with increasing preparation temperature and addition amount. SOC, POC and MAOC reached their highest levels in the 2% SB220 treatment, increasing by 75.34%, 23.34% and 105.75%, respectively, compared with CK. ③ As the

收稿日期: 2025-02-19

修回日期: 2025-05-20

采用日期: 2025-05-20

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“基于生物质炭施用的盐碱地快速增碳培肥作用机制研究”(2024LHMS04010)

第一作者: 姚佳(1998—), 女(汉族), 云南省鲁甸县人, 硕士研究生, 研究方向为生物炭固碳。Email: y20010102j@163.com。

通信作者: 赵世翔(1989—), 男(汉族), 河南省新乡县人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 从事土壤碳氮循环研究。Email: zhaoshixiang1989@126.com。

preparation temperature increased, the soil organic carbon mineralization rate, cumulative mineralization amount, potentially mineralizable carbon (C_p) and priming effect (P_E) decreased, whereas these values increased with higher addition amounts cumulative mineralization, C_p and P_E were elevated by 50.88%, 57.61% and 79.51%, respectively, in 2%SB220 treatment compared to 1%SB220. [Conclusion] SB220 can significantly enhance the contents of SOC, MAOC and POC, and exhibits strong carbon sequestration potential; however, the risk of carbon emissions increases with the increase of the addition amount. Therefore, it is recommended to add 1%SB220 to achieve a balance between mineralization loss and long-lasting sequestration.

Keywords: hydrochars; soil organic carbon; mineral-associated organic carbon; particulate organic carbon; priming effect

土壤有机碳(SOC)作为陆地生态系统中最大的活性碳库,其稳定性和矿化特征对全球碳循环平衡及土壤肥力维持具有重要意义^[1]。土壤矿物结合态有机碳(MAOC)和颗粒有机碳(POC)是SOC的两个关键组分,其动态变化反映了碳库的稳定性与周转速率^[2],分析MAOC和POC含量特征及其调控因素,对于揭示土壤有机碳库动态变化以及固碳机制具有重要意义。

生物炭可提高SOC含量,还能通过改变SOC组成,促进MAOC的积累,提高POC含量^[3]。生物炭富含易分解碳组分(如纤维素、半纤维素),短期内可显著提升POC含量^[4],还能促进矿物-有机复合体形成,使MAOC比例提升^[5]。Giannetta B等^[6]发现添加生物炭后,MAOC含量及POC含量分别增加了1.5倍和3倍。但也有研究发现在土壤中添加生物炭,对POC的积累具有显著的促进作用,但会增大MAOC减损的风险^[7]。生物炭因其对土壤有机碳及其组分的差异化调控导致其对土壤有机碳的稳定性影响具有较大的差异。研究发现生物炭的易分解组分可能引发正激发效应^[8],加速原生碳矿化。但也有学者发现生物炭还田可能会抑制土壤有机碳矿化,起到固碳减排的作用^[9]。总之,生物炭因其制备条件的差异导致其理化特性不同从而对土壤有机碳组分及其固碳减排效应的影响也存在较大的不同。

河套灌区是中国重要的商品粮油基地,具有优质的地理和气候条件,种植经济作物主要以葵花为主,葵花秸秆资源占总秸秆资源量的47.1%,且呈逐年上升趋势,然而当地资源化利用程度较低,处理方式较为粗放^[10]。通过热化学转化可以将葵花秸秆转化为富碳产物,既可实现废弃物资源化利用,也可为土壤固碳提供新型材料。水热炭作为一种新型碳材料,相较于传统热解生物炭,其制备能耗低,原料适应性广,表面官能团丰富^[11],其对SOC含量、组分及矿化可能会产生不同于传统生物炭的调控效应。因此,明晰水热炭对土壤有机碳的差异化调控规律,对优化碳管理策略具有重要实践价值。基于此,本研

究以葵花秸秆为原料,通过180℃和220℃2种温度制备水热炭,在表征其理化特性的基础上,开展室内培养试验,探究不同温度制备的水热炭对土壤有机碳及组分的差异化调控、矿化特征等的影响,为水热炭在农田土壤中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 水热炭和供试土壤

本试验采用的葵花秸秆于2023年3月3日取自内蒙古自治区巴彦淖尔市五原县(107°35'20"E, 40°46'30"N)。将秸秆烘干至恒重,粉碎过2 mm筛,将秸秆粉末置于水热反应釜中,加入去离子水,混合均匀,密闭反应釜。温度升至180℃或220℃时开始计时,压力为0.5 MPa,恒温0.5 h,自然冷却至室温,小心移出釜内溶液及生物炭,过滤并干燥(105℃, 24 h)混合液中固体物质,得到水热炭样品,根据炭化温度的不同分别标记为SB180和SB220。

供试土壤样品于2023年4月16日采集于内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇永联村。土壤类型为灌淤土,盐渍化类型为苏打氯化钠盐渍土,土壤质地以粉砂壤土为主,供试土壤盐渍化程度为轻度碱化(表1)。

1.2 试验设计

称取100 g过2 mm筛的风干土置于500 ml广口培养瓶中,分别添加1%和2%的水热炭,并设置空白对照,分别为:①CK:不添加生物炭;②1%SB180:添加1%SB180;③2%SB180:添加2%SB180;④1%SB220:添加1%SB220;⑤2%SB220:添加2%SB220,各处理设3次重复。土壤与生物炭充分混匀,调节水分使达到田间持水量的60%,25℃下进行室内恒温培养。在培养的第1,3,7,10,30,60,90,180 d通过碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化情况,并定期补充土壤水分。同时,在每次采样期间,准时更换碱液吸收杯并加水至恒重,吸收杯中加入2 ml BaCl₂溶液(1 mol/L),再滴加酚酞指示剂2~3滴,最后用0.1 mol/L HCl(滴定前用硼砂标定)滴

定直到红色消失。测得碱液吸收的 CO₂ 量, 根据土壤所释放 CO₂ 量即可计算一定培养时间内 SOC 矿化

量。培养 180 d 后进行破坏性取样, 测定土壤有机碳含量及其分布。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

项目	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	pH 值	碱化度/%	容重/(g·cm ⁻³)
数值	7.34	1.36	15.84	104.39	9.15	8.95	1.52

1.3 水热炭基本性质测定

使用元素分析仪 (vario EL cube, 德国) 对不同生物炭样品进行 C, H, N 等元素分析, O 元素采用差减法计算得出: O% = 100% - C% - H% - N% - 灰分%^[12]。生物炭的阳离子交换量 (CEC) 根据 HJ889-2017 采用三氯化六氨合钴浸提一分光光度法进行测定。使用全自动比表面积和孔径分析仪^[13], 将样品在 423 K 下通过氮气进行脱气处理, 随后, 对经过脱气处理的样品进行比表面积和孔隙测量, 并运用 BET 方法进行数据处理分析。根据 Boehm 滴定法^[14] 测定水热炭表面官能团含量。

1.4 土壤 MAOC 和 POC 含量测定

采用六偏磷酸钠提取法进行测定^[7]。筛上的部分 (粒径 > 53 μm) 用于 POC 质量测定, 筛下的部分 (粒径 < 53 μm) 用于 MAOC 质量测定。用已知质量的铝盒将筛网的上、下分开收集后置置于 65 °C 恒温烘箱中烘干。将铝盒中烘干土壤收集研磨过孔径 0.15 mm 筛, 并使用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定有机碳含量。

1.5 相关参数计算

土壤有机碳矿化量^[15]计算公式为:

$$MC = \frac{C_{HCl} \times (V - V_1) \times M_{CO_2}}{2m} \times \frac{12}{44} \quad (1)$$

式中: MC 为土壤有机碳矿化量, 以每 kg 土矿化释放的 CO₂-C 来表示 (mg/kg); C_{HCl} 为滴定 HCl 浓度 (mol/L); V 为空白消耗 HCl 的体积 (ml); V₁ 为样品消耗 HCl 的体积 (ml); M_{CO₂} 为 CO₂ 摩尔质量 (44 g/mol); m 为培养瓶内土样质量 (kg)。

土壤有机碳矿化速率^[15]计算公式为:

$$R = \frac{MC}{t_0} \quad (2)$$

式中: R 为某段时间内土壤有机碳矿化速率 (mg/(kg·d)); t₀ 为时间间隔。

土壤有机碳累积矿化量^[15]计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n MC \quad (3)$$

式中: C 为土壤有机碳累积矿化量 (mg/kg); n 为土壤有机碳矿化测定次数。

采用土壤有机碳矿化一级动力学方程对土壤有机碳累计矿化量随时间变化过程进行拟合, 方程为^[15]:

$$C_t = C_p (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

式中: C_t 为 t 时刻土壤有机碳累计矿化量 (g/kg); C_p 为土壤潜在矿化碳库 (g/kg); t 为培养天数; k 为有机碳矿化常数 (d⁻¹)。

由外源有机添加物输入改变土壤原始矿化过程的现象称为激发效应^[16]。PE 表示激发效应的量化值, 计算公式为^[16]:

$$PE = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: C₁ 为试验组土壤有机碳累计矿化量 (mg/kg); C₀ 为对照组土壤有机碳累积矿化量 (mg/kg)。

1.6 数据处理

数据基于 Excel 2019 进行统计与计算; 采用 SPSS 25.0 进行方差分析, 其中处理间差异采用 Duncan 多重比较法; 采用 Origin 2024 b 进行图形绘制。

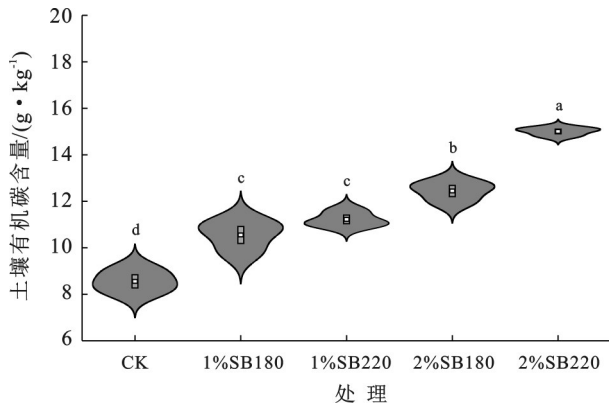
2 结果与分析

2.1 水热炭基本理化性质

由表 2 可知, 随着水热温度的升高, 水热炭的 C 和 N 含量分别增加 7.28% 和 8.33%, H 和 O 含量分别降低 2.64% 和 7.61%, H/C 和 O/H 分别下降 8.57% 和 15.43%。水热炭的含氧官能团含量及 CEC 随着水热温度的升高呈现降低的趋势, SB220 处理较 SB180 处理分别降低 3.24% 和 17.46%, 比表面积和孔体积分别上升 0.27 m²/g 和 0.003 5 ml/g。

2.2 水热炭对土壤有机碳及组分的影响

由图 1 可知, 水热炭处理均显著提高了土壤有机碳含量 (p < 0.05), 且随着水热炭制备温度和添加量的增加而增加。与 CK 相比, 水热炭处理下 SOC 含量增加 23.25% ~ 75.35%; 相同制备温度下, 随着添加量的增加, SB180 处理的 SOC 含量增加 17.91%, SB220 处理增加 33.78%; 添加量相同时, 随着制备温度的升高, SOC 含量增加 6.35% ~ 20.66%。



注: 不同小写字母表示各处理间差异性显著 ($p < 0.05$), 下同。

图 1 不同处理下土壤有机碳含量

Fig.1 Soil organic carbon content under different treatments

不同处理下土壤矿物结合态有机碳和颗粒有机碳含量见图 2。由图 2 可知, 随着添加量和水热温度

的升高, 土壤 MAOC 和 POC 含量增大。MAOC 含量较 CK 增加了 6.94%~23.34%; 添加量相同时, 随着制备温度的升高, MAOC 含量增加 4.72%~13.99%; 制备温度相同时, 随着添加量的增加, SB180 处理的 MAOC 含量增加 1.18%, SB220 处理则增加 10.14%。

添加水热炭后, 土壤 POC 含量与 CK 差异显著 ($p < 0.05$)。土壤 POC 含量最高的处理为 2% SB220, 为 11.09 g/kg, 较 CK 提升 105.75%, 1% SB180, 2%SB180, 1%SB220 较 CK 则分别增加 33.02%, 42.30% 和 67.35%。添加量相同时, 随着制备温度的升高, 土壤 POC 含量提高 7.12%~22.95%。制备温度相同时, 随着添加量的增加, SB180 处理下 POC 含量提升 25.98%, SB220 处理下的 POC 含量提高 44.59%。

表 2 水热炭基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of hydrochars

处理	元素/%					表面含氧官能团含量 (mmol/g)				CEC/cmol (+)/kg	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔体积/ ($\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$)	
	C	H	O	N	H/C	O/C	总含氧官能团	羧基	内酯基				酚羟基
SB180	45.87	7.20	41.67	0.48	0.35	1.88	3.71	0.32	0.40	2.99	30.53	0.72	0.0055
SB220	49.21	7.01	38.50	0.52	0.32	1.59	3.59	0.31	0.46	2.82	25.20	0.99	0.0090

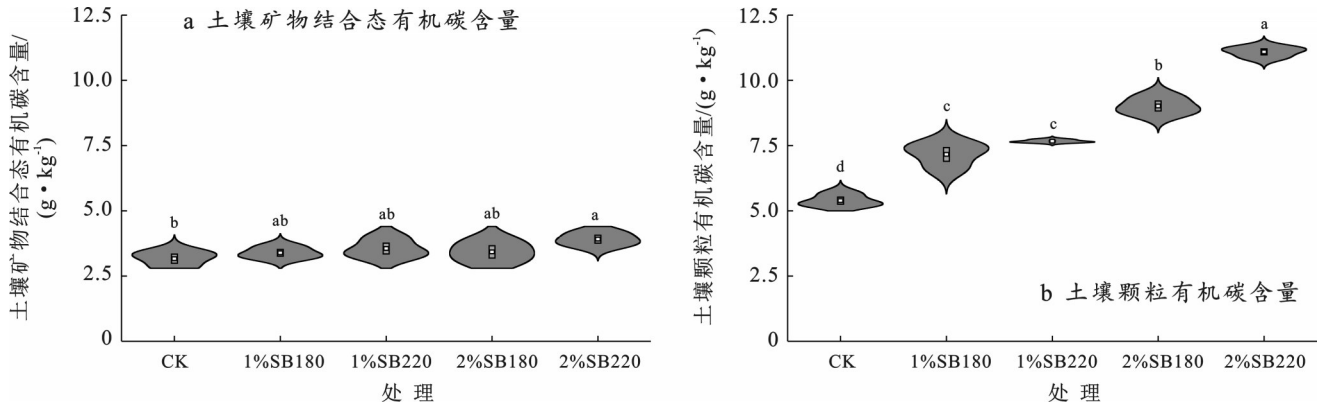


图 2 不同处理下土壤矿物结合态有机碳和颗粒有机碳含量

Fig.2 Soil mineral-associated organic carbon (a) and particulate organic carbon (b) contents under different treatments

2.3 水热炭对土壤有机碳矿化特征的影响

由图 3 可以看出, 添加水热炭处理后, 土壤有机碳矿化速率先上升 (1~15 d) 后迅速下降 (15~25 d), 最后趋于平稳 (25~180 d)。添加量相同时, 随着水热温度的升高, 土壤有机碳矿化速率降低, 第 180 d 土壤有机碳矿化速率下降 29.71%~36.08%; 水热温度相同时, 随着添加量的增加, 土壤有机碳矿化速率升高。添加水热炭后土壤有机碳累积矿化量较 CK 有大幅度提高, 从大到小排列均为: 2%SB180 > 2%SB220 > 1%SB180 > 1%SB220, 1%SB220 处理的土壤有机碳累积矿化量最低, 较 CK 增加 223.30%。

通过一级动力学方程对不同处理土壤的有机碳累积矿化量与培养天数进行拟合 (表 3), 决定系数均达到显著水平 ($p < 0.05$)。随着制备温度的升高, C_p 逐渐降低, 而 k 逐渐升高, 随着添加量的增多, C_p 逐渐增加, 而 k 逐渐降低。不同处理的 C_p 存在显著差异 ($p < 0.05$), 变化范围为 803.92~3 406.99 mg/kg。1%SB220 处理的 C_p 最低, 为 2 111.66 mg/kg, 较 CK 提高 162.67%。 k 表示有机碳矿化速率常数, 其范围为 0.010~0.029 d。

由图 4 可见, 添加水热炭后, 土壤有机碳矿化均呈现正激发效应, 激发效应随着制备温度的升高降低,

随着添加量的增加而增大。1%SB180,1%SB220,2%SB180 和 2%SB220 处理的激发效应分别为

(219.33±20.37)%,(187.48±18.56)%,(346.41±4.22)%和(336.55±16.81)%。

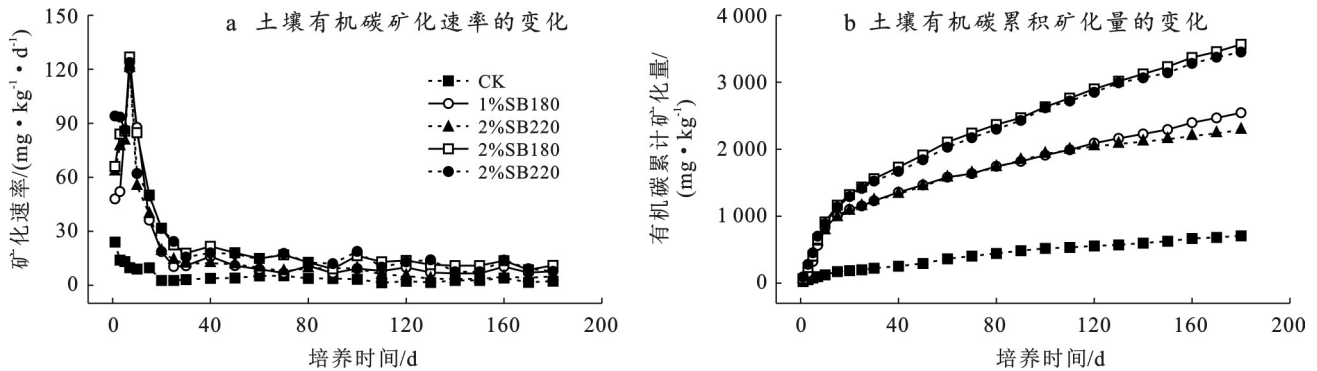


图3 不同处理下土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量

Fig.3 Soil organic carbon mineralization rate and cumulative mineralization under different treatments

表3 不同处理的土壤有机碳矿化动力学参数
Table 3 Mineralization parameters of soil organic carbon under different treatments

处理	参数		
	$C_p/(mg \cdot kg^{-1})$	k/d^{-1}	R^2
CK	803.92±38.48 ^d	0.010±0.001 ^c	0.98
1%SB180	2 291.25±83.65 ^b	0.024±0.003 ^a	0.94
1%SB220	2 111.66±55.11 ^c	0.029±0.003 ^a	0.96
2%SB180	3 406.99±130.06 ^a	0.019±0.002 ^b	0.96
2%SB220	3 328.25±128.71 ^a	0.019±0.002 ^b	0.96

注:不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

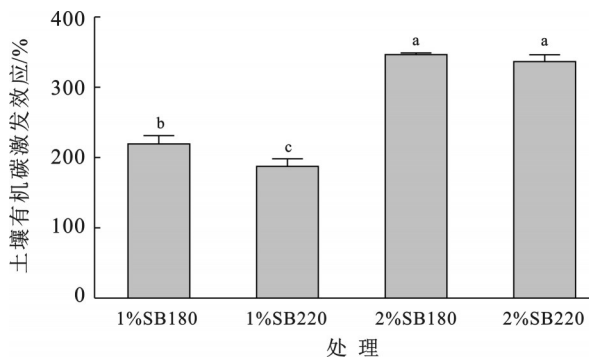


图4 不同处理下土壤有机碳激发效应

Fig.4 Priming effect of soil organic carbon under different treatments

3 讨论

3.1 不同制备温度对水热炭性质的影响

随着水热温度的升高,水热炭的C含量逐渐增加,H和O含量逐渐下降(表2)。这是由于较高的水热温度促进脱水和脱羧^[17],水热炭的N含量的升高,可能是由于水热过程中碳水化合物和蛋白质发生美拉德反应^[17]。H/C可以描述碳化程度和芳香性,O/C则能够描述生物炭的极性以及亲水性^[18]。随着温度的升高,H/C和O/H逐渐下降,说明水热炭

的炭化程度和芳香性逐渐升高,表面含氧官能团如羟基、羧基和羰基减少^[19],极性和亲水性逐渐降低。水热炭的CEC主要受到含氧官能团的影响,含氧官能团含量更高的碳材料具有更高的CEC^[18],随着水热温度升高,含氧官能团减少,CEC降低。水热炭的比表面积和孔体积随着温度的升高呈现上升趋势,这可能与葵花秸秆的有机质裂解产生的挥发性气体逸散,在生物炭内形成不同孔径的气孔有关^[20]。

3.2 水热炭对有机碳及组分的差异化调控

本研究发现,水热炭输入后显著提高SOC含量,且随着制备温度及添加量的增加,SOC含量也逐渐升高。低温制备的水热炭通常含有较多的可溶性有机碳和易降解组分,这些组分能够为土壤微生物提供丰富的碳源,能够促进土壤有机碳的短期提升^[21]。但水热炭制备温度较低时,其稳定性较差,容易被微生物分解利用,随着制备温度的升高,水热炭的芳香性和稳定性逐渐增加,使其能够在土壤中长期存在,且能促进更多溶解性有机碳的释放^[22],从而更有效地增加SOC含量,因此随水热炭制备温度的升高SOC含量也逐渐升高,这与本研究结果一致。

添加水热炭可以增加土壤的POC和MAOC含量(图2)。MAOC有一部分来源于微生物体外修饰后,不能被其分解利用的部分植物残体,在土壤矿物吸附的作用下形成植物源MAOC^[23],水热炭表面含有大量含氧官能团(羧基、酚羟基),通过氢键和配体交换与土壤有机质和矿物质形成有机质—矿物质复合物^[24],促进植物残体向MAOC转化。随着温度的升高,水热炭的比表面积和吸附位点密度增加,可增强与铁铝氧化物等矿物的共沉淀作用^[25],同时通过螯合溶解性有机碳与金属离子形成稳定的络合物^[23],显著提升植物源MAOC的固定效率。另外,微生物通过“微生物碳泵”机制将大分子有机碳同化为

生物量,且微生物不断生长、死亡产生的微生物残体与土壤矿物结合进而形成微生物源MAOC^[26],水热炭的多孔结构可为微生物提供生态位,其缓释碳源特性延长微生物代谢周期^[27],促进微生物生物量的累积。同时,水热炭通过调节土壤pH和电子传递过程^[28],增强矿物对微生物残体氨基糖等组分的特异性吸附^[29],形成更稳定的微生物源MAOC库。POC主要来源于植物凋落物和未分解的有机颗粒^[30]。水热炭本身作为多孔颗粒态碳源(>0.053 mm)可直接贡献于POC库^[7],其分级孔隙结构(微孔-介孔-大孔协同)^[31],对未炭化有机颗粒产生物理筛分效应,降低分解速率。随着制备温度的升高,水热炭孔体积增加43%,介孔比例升高能够增强对木质素等大分子的截留能力^[32],使POC含量随制备温度的升高逐渐增加。水热炭还能通过表面电荷调控促进>2 mm大团聚体形成,其疏水性与芳香碳骨架可增强团聚体抗崩解能力^[23]。这种结构稳定性使包裹在微团聚体内的POC避免微生物接触分解,在干湿交替条件下保护效率提升19%~27%^[33]。周正虎等^[28]通过同步辐射显微成像也发现,水热炭-黏粒复合体可形成三维网状架构,为POC提供多层次物理屏障,减少微生物对其的分解利用^[24]。因此,水热炭可通过矿物界面调控强化碳矿化固定、激活微生物代谢驱动残体转化、构建物理保护碳库的协同机制,显著提升土壤MAOC与POC的含量。

3.3 水热炭制备温度及添加量对土壤有机碳矿化特征的影响

本研究发现,添加水热炭后土壤有机碳矿化均呈现正激发效应。由于生物炭具有较大的表面积和多孔结构,可以为微生物的生长和活动提供有利的栖息地,促进其繁殖,有利于土壤呼吸,使有机碳矿化分解得以加速^[22]。此外,生物炭中还含有一定量易矿化的C,可为土壤微生物提供能量和C源,且水热炭较高的可降解碳含量和表面官能团,使其容易引起微生物的代谢响应,微生物代谢分解难降解的SOC部分^[30],引发正激发效应。添加生物炭会在短期内增加有机碳矿化,土壤有机碳矿化速率先上升(1~15 d)后迅速下降(15~25 d),最后趋于平稳。Maestrini B等^[34]也发现,添加生物炭18 d内土壤有机碳的矿化增强,在18~158 d土壤有机碳的矿化则降低。随着制备温度的升高,土壤有机碳矿化速率及累积矿化量逐渐降低,生物炭能够促进土壤有机碳矿化,其中低温制备的生物炭的促进作用最强,这是因为低温生物炭中不稳定OC的分解和生物炭中营

养物质的供应,会使微生物和酶的活性增强导致有机碳矿化增加^[26]。当添加量增加时,矿化速率及累积量反而上升,这可能与高添加量下生物炭中残留的可溶性有机碳(如酚类化合物)释放有关^[22],这些组分易被微生物快速利用。 C_p 是土壤中可被分解的总有机碳,可用来表征土壤中生物有效性碳库的大小, k 是有机碳矿化速率常数,表示有机碳的周转速率。生物炭本身含有一定量的有机碳,尤其是低温制备的生物炭中易分解态碳含量较高,随着制备温度的升高,生物炭中的有机碳逐渐转化为更稳定的芳香化结构,减少了易分解态碳的含量^[22],导致 C_p 下降。随着生物炭添加量的增加,这些外源碳直接补充了土壤中的有机碳库,导致 C_p 上升^[35];高温生物炭还能通过吸附土壤中的有机质或提供矿质养分,间接刺激微生物的共代谢作用,促进土壤本底有机碳的矿化^[22],导致矿化常数 k 上升。微生物在分解水热炭时,可能会产生大量微生物残(如细胞壁聚合物、胞外多糖等),这些残体与矿物结合后形成稳定的有机碳库(如MAOC),从而降低 C_p ,但短期内通过微生物活动提高 k 值^[26]。

3.4 水热炭输入对土壤有机碳动态的矛盾性

水热炭输入后,提升土壤有机碳矿化速率与累积矿化量的同时,SOC, MAOC及POC含量上升,这一矛盾的根源可能在于碳周转过程中不同时间、空间尺度的交互结果。矿化速率的提升可能是由激发效应主导,而长期的碳积累依赖于微生物残体与矿物结合的协同。水热炭中的易分解组分(如低分子有机酸、单糖)通过激活微生物活性,引发正激发效应,加速原生SOC的矿化^[24]。微生物利用易分解碳后,通过合成代谢将部分碳转化为难分解的残体,土壤微生物代谢产物,还可通过黏合作用促进矿物和SOC的聚集(MnCP过程),增强SOC的稳定性。即土壤微生物不仅通过分解土壤利用有机碳使其矿化,也可通过产生微生物坏死块来促进有机碳储存^[26],还能与矿物结合改变SOC的组成,可以在很大程度上抵抗SOC的分解。与激发效应损失土壤稳定碳相比,微生物也会通过续理效应提高自身生物量和残留物的积累,持续贡献微生物源的稳定有机碳^[35]。因此,水热炭输入引发的正激发效应虽短期加速土壤有机碳矿化,但其易分解组分通过激活微生物代谢一促进残体转化(微生物碳泵)与矿物结合(MnCP过程)的协同作用,以及续理效应驱动的稳定碳库积累,最终实现碳周转动态中“加速损耗—长效固存”的平衡。

4 结论

(1) 随着制备温度的升高,水热炭的C含量、碳化度、芳香性及孔体积升高,而极性、亲水性、含氧官能团含量、CEC以及比表面积呈现降低的趋势。

(2) 随着制备温度和添加量逐渐升高,水热炭处理提高土壤有机碳、矿物结合态有机碳以及颗粒有机碳含量并产生正激发效应,加速土壤有机碳的短期矿化。

(3) SB220处理在添加量为2%时,显著提升土壤有机碳、矿物结合态有机碳以及颗粒有机碳含量,SB220处理在添加量为1%时,碳排放降低,SB220有较好的固碳潜力。

参考文献(References)

- [1] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2022, 52(4):534-574.
- [2] Wu Baojian, Zhang Meng, Zhai Zhen, et al. Soil organic carbon, carbon fractions, and microbial community under various organic amendments [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14:25431.
- [3] Bao Zhengrong, Dai Wanning, Li Han, et al. Long-term biochar application improved aggregate K availability by affecting soil organic carbon content and composition [J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(17):5137-5148.
- [4] 王毅,张俊清,况帅,等.施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):285-294.
Wang Yi, Zhang Junqing, Kuang Shuai, et al. Effects of wheat straw and its biochar application on soil physicochemical properties and organic carbon fractions in flue-cured tobacco field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2):285-294.
- [5] 王月玲,周凤,张帆,等.施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J].环境科学研究,2017,30(6):920-928.
Wang Yueling, Zhou Feng, Zhang Fan, et al. Influence of biochar on soil respiration and soil organic carbon fractions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(6):920-928.
- [6] Giannetta B, Plaza C, Galluzzi G, et al. Distribution of soil organic carbon between particulate and mineral-associated fractions as affected by biochar and its co-application with other amendments [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 360:108777.
- [7] 袁梦婷,李子川,孟俊,等.施用猪粪生物炭对酸性和石灰性水稻土颗粒态和矿物结合态有机碳含量及化学结构的影响[J].植物营养与肥料学报,2024,30(3):441-456.
Yuan Mengting, Li Zichuan, Meng Jun, et al. Effects of swine manure biochar application on the content and chemical structure of particulate and mineral-associated organic carbon in acidic and calcareous paddy soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(3):441-456.
- [8] 吴萍萍,王静,李录久,等.化肥减施下有机物料对砂姜黑土有机碳组分和养分含量的影响[J].核农学报,2022,36(11):2286-2294.
Wu Pingping, Wang Jing, Li Lujia, et al. Effects of organic materials applications on soil organic carbon fractions and nutrient contents in lime concretion black soil under chemical fertilizer reduction [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11):2286-2294.
- [9] 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.
- [10] 姜灵伟,陈锐,崔建华,等.河套灌区农业废弃物资源量估算及综合利用分析[J].中国农业文摘(农业工程),2022,34(1):21-26.
Jiang Lingwei, Chen Rui, Cui Jianhua, et al. Estimation and comprehensive utilization analysis of agricultural waste resources in Hetao Irrigation District [J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2022, 34(1):21-26.
- [11] 孙克静,张海荣,唐景春.不同生物质原料水热生物炭特性的研究[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2260-2265.
Sun Kejing, Zhang Hairong, Tang Jingchun. Properties of hydrochars from different sources of biomass feedstock [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2260-2265.
- [12] Chen Yidi, Lin Y C, Ho S H, et al. Highly efficient adsorption of dyes by biochar derived from pigments-extracted macroalgae pyrolyzed at different temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 259:104-110.
- [13] 师泰龙.向日葵秸秆改性生物炭对Cu²⁺及四溴联苯醚(BDE-47)的去除效果和机理[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Shi Tailong. Effectiveness and mechanism of Cu²⁺ and tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) removal by sunflower straw-modified bioch [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

- [14] 戴佩彬. 制备条件对不同原料生物炭理化性质的影响[J]. 生物化工, 2021, 7(6):129-131.
Dai Peibin. Effect of preparation conditions on physico-chemical properties of biochar from different raw materials [J]. Biological Chemical Engineering, 2021, 7(6): 129-131.
- [15] 赵晓钰, 陈彦硕, 李志刚, 等. 荒漠草原灌丛转变土壤有机碳矿化及其对降水梯度的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(15):6630-6641.
Zhao Xiaoyu, Chen Yanshuo, Li Zhigang, et al. Soil organic carbon mineralization and its response to precipitation gradients during anthropogenic shrub encroachment in desert steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15):6630-6641.
- [16] 陶玉兰, 刘新颖, 赵学超, 等. 不同外源碳输入对两种杉木林土壤有机碳分解激发效应的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(6):2698-2709.
Tao Yulan, Liu Xinying, Zhao Xuechao, et al. Effects of different exogenous carbon inputs on the soil organic carbon decomposition and priming effect in two Chinese fir forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2698-2709.
- [17] Lang Qianqian, Zhang Bo, Liu Zhengang, et al. Properties of hydrochars derived from swine manure by CaO assisted hydrothermal carbonization [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233:440-446.
- [18] Moradi-Choghamarani F, Moosavi A A, Baghernejad M. Determining organo-chemical composition of sugarcane bagasse-derived biochar as a function of pyrolysis temperature using proximate and fourier transform infrared analyses [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138(1):331-342.
- [19] Chen Dengyu, Yu Xinzhi, Song Chao, et al. Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar [J]. Bioresource Technology, 2016, 218:1303-1306.
- [20] Das S K, Ghosh G K, Avasthe R K, et al. Compositional heterogeneity of different biochar: Effect of pyrolysis temperature and feedstocks [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 278:111501.
- [21] Zimmerman A R, Gao Bin, 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.
- [22] Ji Licheng, Yu Zhongpu, Cao Qi, et al. Effect of hydrothermal temperature on the optical properties of hydrochar-derived dissolved organic matter and their interactions with copper (II) [J]. Biochar, 2024, 6(1):64.
- [23] 张睿博, 汪金松, 王全成, 等. 土壤颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳对气候变暖响应的研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(12):2471-2484.
Zhang Ruibo, Wang Jinsong, Wang Quancheng, et al. Responses of soil particulate and mineral-associated organic carbon to climate warming: A review [J]. Progress in Geography, 2023, 42(12):2471-2484.
- [24] Wang Xiao, Li Zhen, Cheng Yadong, et al. Wheat straw hydrochar induced negative priming effect on carbon decomposition in a coastal soil [J]. iMeta, 2023, 2(4):e134.
- [25] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(6):588-595.
- [26] Liang Chao, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. Nature Microbiology, 2017, 2:17105.
- [27] 杨阳, 王宝荣, 窦艳星, 等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1):111-123.
Yang Yang, Wang Baorong, Dou Yanxing, et al. Advances in the research of transformation and stabilization of soil organic carbon from plant and microbe [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 111-123.
- [28] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10):11-22.
Zhou Zhenghu, Liu Lin, Hou Lei. Soil organic carbon stabilization and formation: Mechanism and model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 11-22.
- [29] 薛志婧, 李霄云, 焦磊, 等. 土壤矿质结合态有机碳形成及稳定机制的研究进展[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5):12-23.
Xue Zhijing, Li Xiaoyun, Jiao Lei, et al. Advance in the formation and stabilization mechanisms of soil mineral-associated organic carbon [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):12-23.
- [30] 肖可青, 李心男, 邢稳, 等. 土壤“矿物碳泵(MnCP)”介导有机碳的固存与稳定机制[J]. 土壤学报, 2025, 62(3):595-609.
Xiao Keqing, Li Xinnan, Xing Wen, et al. Mechanisms of organic carbon sequestration and stabilization mediated by the soil “mineral carbon pump (MnCP)” [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(3):595-609.
- [31] Li Chuyi, Zhong Fei, Liang Xinru, et al. Microwave-assisted hydrothermal conversion of crop straw: Enhancing the properties of liquid product and hydrochar by varying temperature and medium [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 290:117192.