

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.018

孙娇, 周涛, 郭鑫年, 等. 添加秸秆及生物质炭对风沙土有机碳及其活性组分的影响. 土壤, 2021, 53(4): 802–808.

添加秸秆及生物质炭对风沙土有机碳及其活性组分的影响^①

孙 娇, 周 涛, 郭鑫年, 梁锦秀*

(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘 要:以宁夏贺兰山东路风沙土为研究对象, 分析秸秆、生物质炭等碳量添加下土壤有机碳及活性碳组分的变化, 为确定该地区最佳施肥措施提供科学理论依据。结果表明: 添加生物质炭和秸秆均显著增加了土壤有机碳含量, 与对照相比土壤有机碳含量分别增加了 7.7%、7.5%。添加生物质炭有利于土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳的积累, 二者含量分别比对照增加 49.6%、17.5%; 而添加秸秆更有利于土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳的积累, 其含量分别比对照分别增加 25.8%、59.9%。秸秆与生物质炭添加均显著增加了土壤速效氮、容重和黏粒含量, 且以添加生物质炭增加作用更为明显, 显著降低了土壤全盐、砂粒含量。土壤有机碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳与速效氮含量极显著正相关, 与全盐、砂粒含量极显著负相关; 土壤可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳与容重极显著负相关; 而土壤微生物生物量碳与理化性质之间无显著相关性。综上, 在风沙土中添加生物质炭更有利于土壤活性碳库提升和理化性质改善, 且以年添加量 7 t/hm² 以上为宜。

关键词: 生物质炭; 秸秆; 有机碳; 活性碳组分

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Biochar and Straw on Soil Organic Carbon and Fractions of Active Carbon in Aeolian Sandy Soil

SUN Jiao, ZHOU Tao, GUO Xinnian, LIANG Jinxiu*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Academy of Agriculture and Forestry Sciences of Ningxia, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Taking the aeolian sandy soil in eastern Helan road of Ningxia as the study object, the changes of soil organic carbon (SOC) and active carbon components under the addition of straw and biochar were analyzed in order to provide scientific theoretical basis for determining the best fertilization measures in this area. The results showed that biochar and straw significantly increased the content and storage of SOC, and compared with the control, SOC content increased by 7.7% and 7.5%, respectively. The addition of biochar was beneficial to the accumulation of soil easily oxidized organic carbon and particulate organic carbon, which were increased by 49.6% and 17.5%, respectively. While straw addition was more conducive to the accumulation of soil microbial biomass carbon and soluble organic carbon, which were increased by 25.8% and 59.9%, respectively. The addition of straw and biochar significantly increased soil available nitrogen, bulk density and clay content, significantly reduced the contents of soil total salt and sand particles, and the increase effect of biochar was more obvious than straw. SOC, soluble organic carbon, particulate organic carbon and easily-oxidized organic carbon were significantly positively correlated with available nitrogen content, and negatively correlated with total salt and sand content. Soil soluble organic carbon, particulate organic carbon and easily-oxidized organic carbon were significantly positively correlated with bulk density. However, there was no significant correlation between soil microbial biomass carbon with physiochemical properties. In conclusion, adding biochar to aeolian sandy soil is more conducive to the improvement of soil active carbon pool and physiochemical properties, and the appropriate annual addition amount is more than 7 t/hm².

Key words: Biochar; Straw; Soil organic carbon (SOC); Fraction of soil active carbon

①基金项目: 宁夏农林科学院科研项目(NKYJ-18-17, NKYZ-16-0906)资助。

* 通讯作者(734703202@qq.com)

作者简介: 孙娇(1989—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士, 主要研究方向为土壤质量。E-mail: 915336809@qq.com

土壤碳库(2 500 Gt)是大气碳库(760 Gt)的 3.3 倍, 是生物碳库(560 Gt)的 4.5 倍, 研究土壤碳变化对分析全球碳循环具有重要意义^[1]。但土壤有机质周转缓慢, 土壤碳库变化主要发生在活性碳库中。土壤活性有机碳是指土壤中易矿化分解、移动速度快, 受植物、微生物、土壤环境等影响强烈的那部分有机碳^[2], 主要的表征指标有微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、易氧化有机碳(easily-oxidized organic carbon, EOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)^[3]。尽管活性有机碳在土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)中占比较小, 但反应灵敏, 常被认为是农田管理措施的敏感指标, 对研究土壤肥力概况有重要意义。

宁夏风沙土总面积达 60 万 hm^2 , 主要分布在中部干旱地带。风沙土土壤贫瘠、漏水漏肥、生物功能退化, 急需建立瘠薄风沙土地力快速提升的固碳培肥措施。农田土壤有机碳主要来源是作物残体、有机肥和其他有机残骸^[4]。利用秸秆直接还田或制备成生物质炭还田均能显著提升土壤碳库水平, 促进土壤碳氮转化, 是土壤培肥的重要手段^[5]。秸秆还田可提高土壤肥力、增加作物产量与品质, 但秸秆易分解, 会引起土壤有机碳活性及稳定性的改变^[6]。生物质炭是生物质在缺氧条件下热解炭化制作成的富含碳的物质, 可增加土壤碳截留和肥力^[7]。研究表明, 秸秆还田显著提高了土壤活性有机碳组分含量^[8]; 而生物质炭为惰性碳, 可促进土壤团聚体形成、增加 SOC 含量及稳定性^[9]。秸秆和生物质炭还田均可提高 SOC、POC 和 MBC 等含量, 改善土壤肥力^[10]。也有研究认为少量生物质炭还田可提高土壤 DOC 和 EOC 含量^[3]。

明确秸秆和生物质炭的土壤改良潜力, 特别是对风沙土的固碳培肥潜力, 需要充分了解 SOC 组分及其与土壤肥力的关系。为此, 本研究以宁夏贺兰山东路风沙土为研究对象, 通过田间试验, 分析不同秸秆、生物质炭施用量对 SOC 含量的影响, 探讨活性有机碳组分之间的相互关系及与土壤肥力的相关性, 以期确定该地区最佳施肥措施提供科学的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2019 年在宁夏永宁县黄羊滩农场进行(106°01'216"E, 38°34'263"N)。试验区海拔 1 129 m, 属温带大陆性气候区, 年降水量 180 ~ 220 mm, 年蒸发量 1 500 mm 左右, 年均日照时数 2 322.3 h, 年

均辐射量 512.2 KJ/cm^2 , 年均气温 8.3 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 145 d。供试土壤为沙质灰钙土, 耕层土壤 pH 8.4, 全盐 0.3 g/kg, 有机碳 3.4 g/kg, 全氮 0.3 g/kg, 碱解氮 22 mg/kg、有效磷 7.6 mg/kg、速效钾 40 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以迪卡 159 号玉米为研究材料, 采用完全随机区组设计, 在施氮(尿素, 含 N 460 g/kg)、磷(磷酸钙, 含 P_2O_5 140 g/kg)、钾肥(氯化钾, 含 K_2O 600 g/kg)的基础上设置对照(CK)、低量生物质炭(BC I)、中量生物质炭(BC II)、高量生物质炭(BC III)、低量秸秆(S I)、中量秸秆(S II)、高量秸秆(S III)共 7 个处理。每个处理重复 3 次, 共计 21 个小区, 各小区面积为 40 m^2 (5 m × 8 m)。所用生物质炭以玉米秸秆为原料烧制, 由宁夏玉泉实业生物科技有限公司提供; 该生物质炭总 C、N、P、K 含量分别为 467.0、13.4、2.5、29.8 g/kg。玉米秸秆总 C、N、P、K 含量分别为 450.1、7.9、0.8、12.9 g/kg。生物质炭与秸秆等碳量投入, 均于玉米播种前一天全部撒施后由旋耕入土; 氮、磷、钾肥随水滴入。肥料施用量如表 1 所示。

玉米于 4 月 20—23 日播种, 9 月 20—22 日收获, 生育期 150 ~ 155 d。采用宽窄行种植方式, 宽行行距 60 cm, 窄行行距 40 cm, 在窄行铺设滴管带。玉米种植株距 22 cm, 密度 8.2×10^4 株/ hm^2 。采用机井水滴灌, 灌水定额约 5 200 m^3/hm^2 , 整个生育期滴灌 10 ~ 12 次, 各处理同等灌水量。

表 1 不同处理肥料施用量
Table 1 Applied amounts of different fertilizers

处理	秸秆 (t/hm^2)	生物质炭 (t/hm^2)	N (kg/hm^2)	P_2O_5 (kg/hm^2)	K_2O (kg/hm^2)
CK	0	0	330	105	90
S I	3.5	0	330	105	90
S II	7.0	0	330	105	90
S III	10.5	0	330	105	90
BC I	0	3.4	330	105	90
BC II	0	6.8	330	105	90
BC III	0	10.2	330	105	90

1.3 测定项目及方法

于 2019 年 9 月底玉米收获期在各小区采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品, 每个小区用土钻进行“S”型 6 点取样, 鲜土样过 2 mm 筛后混合为一个样品, 放入便携式冰盒中并立即带回实验室。土样分为两部分, 一部分储存在 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中, 用于土壤 DOC、MBC 的测定; 另一部分置于阴凉通风处风干, 用于其他碳组分与理化性质测定。另外, 在各小区挖好的土壤剖面上, 用容积为 100 cm^3 的环刀采集 0 ~ 20 cm

土层的原状土, 每土层制作 3 环刀原状土, 供物理性质测定。

土壤 pH 利用 pH 计测定, 水土质量比 2.5 : 1; 电导率(EC)利用电导率仪测定, 水土质量比 5 : 1; 容重采用环刀法测定; 机械组成采用采用吸管法测定; 土壤全氮采用半微量凯氏法测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; SOC 采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[11]; 可溶性有机碳(DOC)采用去离子水浸提法测定^[12]; EOC 采用高锰酸钾氧化-比色法测定^[13]; POC 利用六偏磷酸钠溶液分离后元素分析仪测定^[14]; MBC 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[15]。

1.4 数据处理

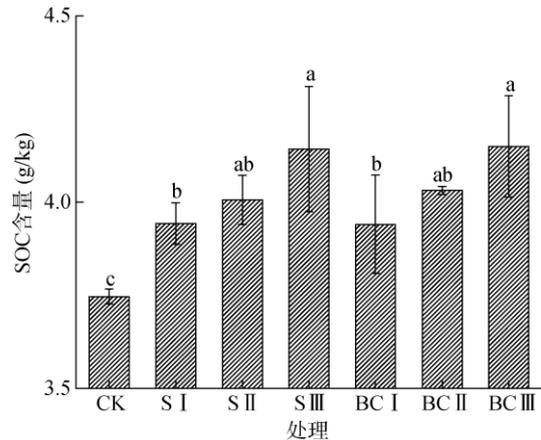
土壤全盐含量 (g/kg) = 2.9086 × 土壤电导率 (mS/cm) + 0.1459^[16]。

利用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 对试验数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验; 通过相关性分析来描述各测量指标的相关程度。图表的制作采用 Origin 9.0 和 Excel 2003 软件。

2 结果与分析

2.1 秸秆及生物质炭对土壤有机碳含量的影响

由图 1 所示, 与对照相比, 等碳量添加生物质炭和秸秆均显著增加了 SOC 含量, 且随着施用量增加 SOC 含量呈显著增加的趋势($P < 0.05$)。其中, 添加秸



(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同)

图 1 秸秆及生物质炭处理土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon contents under biochar and straw treatments

秆土壤 SOC 含量增加了 7.5%, 添加生物质炭土壤 SOC 含量增加了 7.7%。添加等碳量生物质炭与秸秆处理之间 SOC 含量无显著差异。

2.2 秸秆及生物质炭对土壤活性碳组分含量的影响

除添加低量生物质炭土壤 EOC 显著低于对照外, 等碳量添加生物质炭和秸秆均能显著增加土壤活性碳组分 EOC、POC、MBC、DOC 含量(图 2)。其中, 添加秸秆土壤 EOC、POC、MBC、DOC 平均含量分别增加了 26.8%、10.8%、25.8%、59.9%, 添加生物质炭土壤分别增加了 49.6%、17.5%、22.3%、36.0%。与秸秆处理相比, 添加中量和高量生物质炭土壤 EOC、POC 含量显著增高, 而 MBC、DOC 含

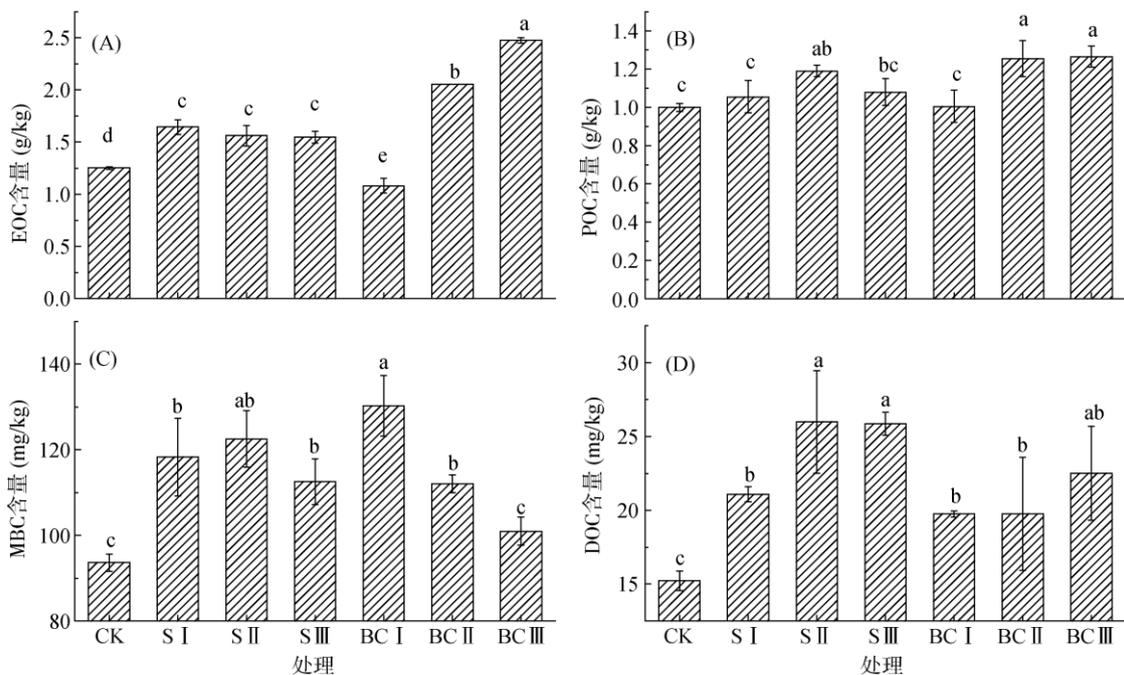


图 2 秸秆及生物质炭处理土壤有机碳组分含量

Fig. 2 Contents of different organic carbon components under biochar and straw treatments

量显著降低。添加中量秸秆土壤 POC、MBC、DOC 含量最高，分别比对照增加了 19.0%、30.9%、71.0%；而土壤 EOC 含量随着秸秆添加量的增加呈显著降低趋势。随着生物质炭添加量的增加，土壤 EOC、POC、DOC 含量呈显著增加趋势，添加高量生物质炭土壤 EOC、POC、DOC 含量分别比对照增加了 98.0%、26.5%、48.1%；而土壤 MBC 含量随生物质炭添加量增加呈显著降低的趋势，与对照相比，添加低量生物质炭土壤 MBC 含量增加了 39.2%。

2.3 秸秆及生物质炭对土壤活性碳组分比例的影响

如图 3 所示，与对照相比，等碳量添加生物质炭和秸秆后土壤活性碳组分比例的变化趋势与活性碳组分含量变化趋势相近，添加秸秆土壤 EOC/SOC、POC/SOC、MBC/SOC、DOC/SOC 分别平均增加了

17.9%、3.0%、17.1%、47.1%，添加生物质炭土壤分别平均增加了 37.9%、8.7%、13.6%、24.6%。与秸秆处理相比，添加中量和高量生物质炭土壤 EOC/SOC、POC/SOC 显著增高，而 MBC/SOC、DOC/SOC 显著降低。添加低量秸秆土壤 EOC/SOC 最高，与对照相比增加了 25.0%；而添加中量秸秆土壤 POC/SOC、MBC/SOC、DOC/SOC 最高，分别比对照增加了 11.3%、22.3%、58.5%。随着生物质炭添加量的增加，土壤 EOC/SOC、POC/SOC、DOC/SOC 呈显著增加趋势，与对照相比，添加高量生物质炭土壤 EOC/SOC、POC/SOC、DOC/SOC 分别增加了 78.8%、14.2%、32.0%，而土壤 MBC/SOC 随生物质炭添加量增加呈显著降低趋势，添加低量生物质炭土壤 MBC/SOC 增加了 32.2%。

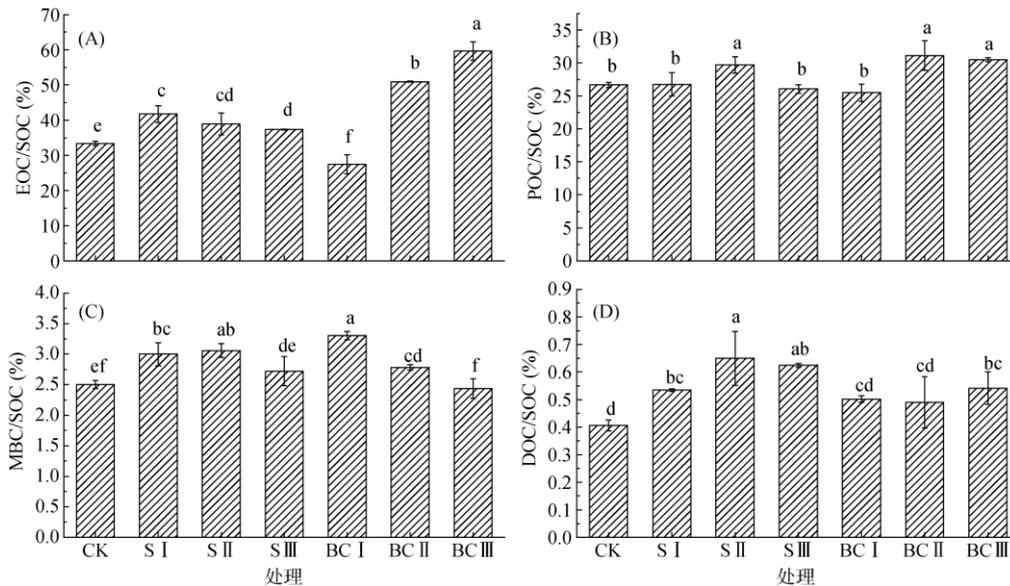


图 3 秸秆及生物质炭处理土壤有机碳组分在总有机碳中的占比

Fig. 3 Percentages of different carbon components in the total organic carbon under biochar and straw treatments

2.4 秸秆及生物质炭对土壤理化性质的影响

添加秸秆与生物质炭处理土壤理化性质如表 2

所示。与对照相比，等碳量添加秸秆与生物质炭显著增加了土壤速效氮、黏粒含量，显著降低了土壤全盐

表 2 秸秆及生物质炭处理土壤理化性质

Table 2 Soil basic physicochemical properties under biochar and straw treatments

处理	全氮(g/kg)	速效氮(mg/kg)	pH	全盐(g/kg)	容重(mg/m ³)	颗粒组成(g/kg)		
						砂粒	粉粒	黏粒
CK	0.4 ± 0.0 bc	18.0 ± 0.1 d	8.8 ± 0.1 ab	0.6 ± 0.1 a	1.4 ± 0.1 a	884.0 ± 3.5 a	41.3 ± 2.3 f	74.7 ± 1.2 d
S I	0.3 ± 0.0 c	20.3 ± 0.6 c	8.7 ± 0.0 b	0.6 ± 0.0 a	1.4 ± 0.0 b	848.7 ± 1.5 c	74.0 ± 1.0 e	77.3 ± 0.6 e
S II	0.4 ± 0.1 a	24.0 ± 1.0 b	8.8 ± 0.0 ab	0.5 ± 0.1 bc	1.3 ± 0.0 d	840.0 ± 1.0 d	64.0 ± 1.0 d	96.0 ± 1.0 a
S III	0.4 ± 0.0 ab	25.0 ± 1.0 b	8.8 ± 0.0 a	0.5 ± 0.0 c	1.3 ± 0.0 e	829.0 ± 1.0 e	64.3 ± 0.6 c	106.7 ± 0.6 b
BC I	0.3 ± 0.1 bc	24.0 ± 1.1 b	8.6 ± 0.1 c	0.6 ± 0.0 a	1.4 ± 0.0 a	855.3 ± 6.7 b	6.7 ± 5.8 b	138.0 ± 1.0 f
BC II	0.4 ± 0.1 bc	25.0 ± 1.0 b	8.8 ± 0.0 ab	0.5 ± 0.0 b	1.4 ± 0.0 c	842.3 ± 0.6 d	20.7 ± 0.6 b	137.0 ± 1.0 c
BC III	0.4 ± 0.0 ab	27.7 ± 0.6 a	8.7 ± 0.0 b	0.5 ± 0.0 c	1.3 ± 0.0 f	831.0 ± 1.0 e	11.7 ± 1.5 a	157.3 ± 0.6 a

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

含量、容重、砂粒含量,且以添加生物质炭对土壤速效氮、黏粒含量的增加作用更为明显,与对照相比分别增加了 38.8% 和 70.3%。添加秸秆、生物质炭对土壤 pH 影响不显著。随着秸秆和生物质炭添加量的增加,土壤速效氮、黏粒含量呈显著增加的趋势,土壤全盐、砂粒含量显著降低。

2.5 土壤有机碳及活性碳组分与理化性质的相关性

由表 3 可知,土壤 SOC、EOC、DOC、POC 含量与速效氮含量极显著正相关($P<0.01$),与全盐、砂粒含量极显著负相关;土壤 SOC 与全氮含量极显著正相关,与黏粒含量显著正相关,与容重显著负相关;土壤 EOC、DOC、POC 含量与容重极显著负相关。另外,EOC 含量与黏粒含量显著正相关,POC 含量与全氮、黏粒含量显著正相关;土壤 MBC 与理化性质之间无显著相关性。

表 3 土壤有机碳及活性碳组分与理化性质之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between soil organic carbon, fractions of active carbon and physiochemical properties

	SOC	EOC	MBC	DOC	POC
全氮	0.59**	0.19	-0.08	0.41	0.47*
速效氮	0.76**	0.61**	0.18	0.58**	0.66**
pH	0.35	0.25	-0.52	0.32	0.38
全盐	-0.62**	-0.59**	0.20	-0.65**	-0.57**
容重	-0.53*	-0.63**	0.24	-0.58**	-0.69**
砂粒	-0.83**	-0.59**	-0.30	-0.75**	-0.59**
粉粒	-0.04	-0.22	0.08	0.35	-0.21
黏粒	0.52*	0.54*	0.11	0.13	0.51*

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

SOC 在改善土壤理化性质及生物学性质方面发挥着重要作用,是土壤质量的重要指标。与对照相比,等碳量添加生物质炭和秸秆均显著增加了 SOC 含量。生物质炭是含碳丰富的有机物料,还田后不仅能增加 SOC 含量,还能改善土壤养分状况^[3]。秸秆还田可以增强土壤微生物活性,提高土壤有机质和土壤肥力^[17]。本研究中随着生物质炭与秸秆施用量的增加, SOC 含量呈显著增加的趋势。生物质炭还田能持续稳定地增加 SOC 含量^[3]。由于本试验供试土壤 SOC 含量仅为 3.4 g/kg,生物质炭可增加作物对 CO₂ 的吸收,从而促进根系的固碳作用;另外生物质炭提高了作物根系生物量,最终引起 SOC 含量增加^[18]。添加生物质炭可减缓高温天气对作物生长的抑制,也影响 SOC 含量^[10]。增加秸秆还田量可提高 SOC 含量,

粉碎秸秆以 18 000 kg/hm² 施入更能提高土壤有机质含量^[19]。本研究在风沙土中添加等碳量生物质炭与秸秆处理之间 SOC 含量无显著差异,而前人研究多认为施用生物质炭更有利于增加 SOC 含量^[17,20],这可能与本试验区土壤水分、养分含量极低,外加干旱少雨导致秸秆腐熟慢有关。

土壤活性碳组分对植物和微生物具有较高的活性,对耕作措施反应敏感。本试验研究结果表明,与对照相比,等碳量添加生物质炭和秸秆均能显著增加土壤活性碳组分含量。这主要是因为秸秆与生物质炭还田可以刺激土壤微生物生长与繁殖,促进土壤难溶态物质活化与分解^[10];还可以提高土壤质量,显著促进作物生长,增加土壤有机质归还量^[21]。另外,各处理均配施了化肥,降低了秸秆与生物质炭碳氮比(C/N),提高了土壤有机质腐解速率^[22]。本研究中,添加中量秸秆的土壤 POC、MBC、DOC 含量最高。研究表明,高秸秆还田量下耕层土壤中的 DOC 含量降低^[23];随着秸秆还田量增加,土壤活性碳组分变化呈先增加后降低的趋势^[24],究其原因可能是秸秆还田量过高会引起土壤 C/N 升高,还田后造成土壤微生物数量和活性降低^[25]。而本研究中土壤 MBC 含量随生物质炭添加量增加呈显著降低的趋势,这可能是由于土壤微生物被生物质炭吸附,降低了微生物与土壤的接触面所导致的^[3]。与秸秆处理相比,添加中量和高量生物质炭土壤 MBC、DOC 含量显著降低。这是因为生物质炭是一种高度芳香化的物质,稳定性高,而稳定性较差的秸秆在腐解过程中可以释放大量的 DOC^[26]。而添加中量和高量生物质炭土壤 EOC、POC 含量显著增高。这与郭军玲等^[27]研究结果一致,其研究表明,添加生物质炭可显著提高灰漠土 EOC 含量,这是因为添加生物质炭更能提高作物生物量,从而增加了土壤 EOC 含量。

本研究中添加秸秆与生物质炭显著增加了土壤黏粒含量、降低了砂粒含量,且以添加生物质炭对土壤黏粒含量的增加作用更为明显,这与前人研究结果相似^[28]。有机物料培肥可显著降低土壤砂粒和粉砂粒含量^[29]。秸秆与生物质炭添加显著降低了土壤容重。土壤容重降低意味着土壤结构及其通气性得到改善。由于秸秆施入土壤后无法在短期内矿化分解,可迅速改善土壤通透性、降低土壤容重^[30]。秸秆炭化后疏松多孔,施入土壤后能够通过吸附微小土壤颗粒达到持续降低土壤容重的目的^[31]。等碳量添加秸秆与生物质炭显著增加了土壤速效氮含量,且以添加生物质炭的增加作用更为明显。秸秆还田后能被土壤微

生物迅速降解, 释放大养分, 因而能增加土壤养分含量^[19]。秸秆制成生物质炭后其电荷密度较高, 能强烈吸附土壤养分, 增加养分利用效率^[18]。

4 结论

添加生物质炭和秸秆均显著增加了 SOC 含量, 而等碳量生物质炭、秸秆添加处理间的 SOC 含量无显著差异。对土壤活性碳组分而言, 添加中、高量生物质炭土壤的 EOC、POC 含量及比例显著高于等碳量秸秆处理, 而其 MBC、DOC 含量及比例显著低于等碳量秸秆处理。随着生物质炭添加量的增加, 土壤 EOC、POC、DOC 含量及比例显著增加; 而 MBC 含量及比例呈显著降低的趋势。等碳量添加秸秆与生物质炭显著增加了土壤全氮、速效氮、粉粒、黏粒含量及容重, 显著降低了土壤全盐、砂粒含量, 且以添加生物质炭对土壤全氮、速效氮、黏粒含量的增加作用更明显。土壤 SOC、EOC、DOC、POC 含量与速效氮含量极显著正相关, 与全盐、砂粒含量极显著负相关; 土壤 EOC、DOC、POC 含量与容重极显著负相关。另外, EOC 含量与黏粒含量显著正相关, POC 含量与全氮、黏粒含量显著正相关, MBC 与理化性质之间无显著相关性。综上, 在风沙土中添加生物质炭更有利于土壤活性碳库提升和理化性质改善, 且以年添加量 7 t/hm² 以上为宜。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [2] Mandal N, Dwivedi B S, Meena M C, et al. Effect of induced defoliation in pigeonpea, farmyard manure and sulphitation pressmud on soil organic carbon fractions, mineral nitrogen and crop yields in a pigeonpea-wheat cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 178–187.
- [3] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4327–4337.
- [4] 徐江兵, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥处理红壤生物活性有机碳变化及与有机碳组分的关系[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 627–632.
- [5] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723–729.
- [6] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: Critical review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 115–131.
- [7] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403–427.
- [8] 王玉竹, 周萍, 王娟, 等. 亚热带几种典型稻田与旱作土壤中外源输入秸秆的分解与转化差异[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6457–6465.
- [9] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 509–517.
- [10] 黎嘉成, 高明, 田冬, 等. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(5): 39–50.
- [11] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(2): 88–94.
- [12] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.
- [13] Carter M R. Soil sampling and methods of analysis[M]. Manitoba: Canadian Society of Soil Science, 1993: 397–407.
- [14] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544–550.
- [15] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] 樊丽琴, 李磊, 吴霞, 等. 种植方式对宁夏银北灌区盐碱地土壤水热盐及玉米生长的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1403–1408.
- [17] 李婧, 迟凤琴, 魏丹, 等. 不同有机物料还田对黑土活性有机碳组分含量的影响[J]. *大豆科学*, 2016, 35(6): 975–980.
- [18] 李程, 李小平. 生物质炭制备及不同施用量对土壤碳库和植物生长的影响[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(10): 1786–1791.
- [19] 徐萌, 张玉龙, 黄毅, 等. 秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 153–156.
- [20] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5838–5846.
- [21] Lemke R L, VandenBygaart A J, Campbell C A, et al. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 42–51.
- [22] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513–519.
- [23] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index

- to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. CATENA, 2015, 135: 283–289.
- [24] 胡乃娟. 秸秆还田量对稻麦轮作农田土壤碳库、微生物及产量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [25] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371–377.
- [26] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 724–730.
- [27] 郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1290–1299.
- [28] 孙琦. 培肥对作物光谱、土壤理化性质和呼吸的影响[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [29] 魏自民, 谷思玉, 赵越, 等. 有机物料对风沙土主要物理性质的影响[J]. 吉林农业科学, 2003, 28(3): 16–18.
- [30] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1836–1844.
- [31] Xiu L Q, Zhang W M, Sun Y Y, et al. Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. CATENA, 2019, 173: 481–493.