

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0345

陆畅,徐畅,黄容,田冬,高明.秸秆和生物炭对油菜—玉米轮作下紫色土有机碳及碳库管理指数的影响.草业科学,2018,35(3):482-490.

Lu C, Xu C, Huang R, Tian D, Gao M. Effect of straw and biochar on soil organic carbon and carbon pool management index in purple soil under rape—maize rotation. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 482-490.

秸秆和生物炭对油菜—玉米轮作下紫色土 有机碳及碳库管理指数的影响

陆畅¹, 徐畅², 黄容¹, 田冬¹, 高明¹

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400715; 2.中国烟草总公司重庆市公司,重庆 400023)

摘要:为揭示西南紫色土区有机碳库对秸秆还田和施用生物炭的响应,采用田间试验的方法,研究了油菜(*Brassica napus*)—玉米(*Zea mays*)轮作制度下,对照(CK)、秸秆还田(CS)、施用生物炭(BC)、秸秆+生物炭1:1混施还田(CS+BC)、秸秆+速腐剂还田(CS+D)5种处理的紫色土各形态有机碳含量及碳库管理指数(CPMI)。结果表明,与CK相比,秸秆还田和施用生物炭各处理均能提高土壤有机碳、微生物生物量碳、颗粒有机碳、矿物结合态有机碳、活性有机碳含量及碳库管理指数,其中CS+D处理的微生物生物量碳、粗颗粒有机碳含量、土壤微生物熵最高,增幅分别为104.17%、248.57%和66.61%;其次为CS处理,增幅分别为75.25%、211.43%和51.38%;CS+D和CS处理的碳库管理指数分别比CK处理高87.42和70.95;BC处理下土壤矿物结合态有机碳含量最高,达到了13.14 g·kg⁻¹。可见,秸秆还田、秸秆+速腐剂还田提高土壤有机碳活性和碳库管理指数的效果优于施用生物炭,有利于提升地力和改善土壤质量,而施用生物炭下土壤有机碳稳定性较高,有利于土壤有机碳长期稳定固持。

关键词:秸秆;生物炭;颗粒有机碳;活性有机碳;碳库管理指数

中图分类号:S344.1⁺5;S155.2⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2018)03-0482-09*

Effect of straw and biochar on soil organic carbon and carbon pool management index in purple soil under rape —maize rotation

Lu Chang¹, Xu Chang², Huang Rong¹, Tian Dong¹, Gao Ming¹

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Municipal Tobacco Company, Chongqing 400023, China)

Abstract: In order to reveal the response of the organic carbon pool of purple soil to straw and biochar application in Southwest China, this experiment quantified the content of various forms of organic carbon and the carbon pool management index in rape—maize rotation systems in the national monitoring station for soil fertility and fertilizer efficiency of purple soils. There were five treatments, including no organic material (CK), straw (CS), biochar (BC), 50% straw+50% biochar (CS+BC), and straw+microorganisms (CS+D), which were repeated three times. The results showed that straw and biochar addition increased soil total organic carbon, microbial biomass carbon, particulate organic carbon, mineral-associated organic carbon, labile organic carbon, and carbon pool management index as compared with those of the CK treatment. The highest content of microbial biomass carbon, coarse particulate organic carbon, and soil microbial entropy were found in the CS+D

* 收稿日期:2017-06-23 接受日期:2017-11-21

基金项目:重庆市农业综合开发办项目(CQNZ2016DY12);国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B18)

第一作者:陆畅(1993-),女,四川岳池人,在读硕士生,研究方向为土地利用规划和土地质量提升。E-mail:897305986@qq.com

通信作者:高明(1965-),男,重庆合川人,研究员,博导,博士,研究方向为土壤质量与环境及土地整理。E-mail:gaoming@swu.edu.cn

treatment, with increases of 104.17%, 248.57%, and 66.61%, respectively. The content of microbial biomass carbon, coarse particulate organic carbon, and soil microbial entropy increased by 75.25%, 211.43%, and 51.38%, respectively, in the CS treatment. As compared with the CK treatment, carbon pool management index increased by 87.42 and 70.95 in the CS+D and CS treatments, respectively. The highest content of mineral-associated organic carbon was $13.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the BC treatment. Overall, the activity and quality of soil organic carbon improved by the addition of straw and straw + microorganism, whereas the stability of soil organic carbon was improved by the addition of biochar, which is beneficial for the long-term stable fixation of soil organic carbon.

Key words: straw; biochar; particulate organic carbon; labile organic carbon; carbon pool management index

Corresponding author: Gao Ming E-mail: gaoming@swu.edu.cn

紫色土作为中国西南地区重要的农田土壤之一,是亚热带条件下紫色母岩发育形成的岩性土,具有成土时间短、发育浅、风化程度低和有机质缺乏等特点,因此如何改善土壤质量和持续提高土壤生产力是紫色土研究的热点问题^[1]。土壤有机碳库是评估土壤质量的重要指标,土壤总有机碳变化极其缓慢,而活性有机碳对环境变化较敏感,具有易被土壤微生物分解矿化、转移迅速等特性,可以更好地反映土壤碳库的周转变化的指示土壤质量^[2]。土壤活性有机碳表征指标常选用土壤微生物生物量碳、溶解性有机碳、颗粒有机碳和易氧化碳等^[3],且由土壤活性有机碳计算的碳库管理指数(CPMI)更能全面动态地反映土壤碳库有效性及质量的变化^[4],因此研究土壤活性有机碳和碳库管理指数对提高土壤肥力和土壤质量具有重要意义^[5]。

有机物料还田是影响土壤有机碳质量的重要农田管理措施^[6]。秸秆还田不仅可以解决环境污染和资源浪费问题,还能增加土壤外源有机碳的输入,改变土壤有机碳活性和稳定性^[7]。生物炭是生物质废弃物在高温隔氧条件下热解生成的一类高度芳香化难溶性固态物质,施用生物炭可以改善土壤养分状况^[8],能够提高土壤酶活性,促进微生物生长,提升土壤肥力^[9]。不同土壤类型和有机物料种类对土壤有机碳及碳库管理指数的影响存在明显差异,前人研究多见于江苏水稻土^[10]、宁夏沙化土壤^[11]、陕西塿土^[12]等土壤类型,而从秸秆还田和施用生物炭角度分析紫色土的土壤有机碳库和碳库管理指数的研究还鲜见报道。本研究在国家紫色土土壤肥力与肥料效益长期监测基地开展了油菜(*Brassica napus*)-玉米(*Zea mays*)轮作的田间试验,通过分析对照(CK)、秸秆还田(CS)、施用生物炭(BC)、秸秆+生物炭1:1混施还田(CS+BC)、秸秆+速腐剂还田(CS+D)5种处理下有机碳组分、碳库管理指数的变化及其响应,旨在揭示紫色土固碳机制,为优化秸秆还田技术提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于重庆市北碚区西南大学试验农场,地理位置为 $30^{\circ}26' \text{ N}$, $106^{\circ}26' \text{ E}$,海拔 266.3 m,属亚热带季风气候,年均气温 $18.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年 $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $6\ 006 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$,年降水量 $1\ 086 \text{ mm}$,年日照时数 $1\ 276.7 \text{ h}$ 。试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属。供试土壤基本理化性质为:有机碳含量为 $9.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $135.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $17.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $206.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.7。

1.2 试验设计

试验采用微区试验的方法,于2015年10月开始进行,以“等碳量”原则施入秸秆或生物炭,采用随机区组设计,共设置5个处理(表1),3次重复,微区面积为 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,各个微区的水肥管理均相同。

试验采用“油菜-玉米新两熟”种植制度,即:与传统的小麦(*Triticum aestivum*)-玉米轮作模式相比,采用油菜-玉米轮作,将油菜晚熟品种改为早熟品种,保障粮油安全。油菜于2015年10月11日育苗,2015年11月3日移栽(品种为96v44,密度为 $8 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$),2016年4月19日收获。玉米于2016年4月9日育苗,4月20日移栽(品种为中豪9号,密度为 $4 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$),8月1日收获。各处理施肥量相同,油菜季各处理的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥和硼肥用量分别为 150 、 90 、 90 和 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷、钾、硼肥、70%氮肥作为基肥于2015年11月1日施用,30%氮肥作为基肥于2016年2月20日施用。玉米季各处理的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥用量分别为 180 、 60 、 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,作为基肥于2016年4月20日施用。氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)和硫酸钾(K_2O 51%)、硼砂

表1 试验处理描述

Table 1 Treatment designing in the experiment

代码 Code	处理 Treatment	施入量 Application rate/ (kg · hm ⁻²)	具体措施 Concrete measurement
CK	对照 No organic material	0	将秸秆用粉碎机粉碎成2 cm左右,生物炭过10 mm筛,移栽油菜前3 d将秸秆或生物炭均匀覆盖于地表,然后进行10 cm深翻耕。 The straw was crushed to pieces of approximately 2 cm by a pulverizer. The biochar was sieved using a 10 mm mesh. The straw or biochar was evenly covered on the surface on the third day before transplanting rape, and then 10 cm deep tillage was carried out.
CS	秸秆还田 Straw	8 000	
BC	施用生物炭 Biochar	5 274	
CS+BC	秸秆+生物炭1:1混施还田 50% straw+50% biochar	4 000+2 637	
CS+D	秸秆+速腐剂还田 Straw+microorganism	8 000+16	

(B 12%)。所有田间管理措施按当地习惯进行。

秸秆为前季残留的油菜地上部分秸秆,其有机碳含量为 392.05 g · kg⁻¹, 碳氮比为 41.56。生物炭由四川省久晨农业有限责任公司提供,以油菜秸秆为原料在 500 °C 高温厌氧条件下热解 2 h 烧制,其碳含量为 62.58%,碳氮比为 45.52, pH 为 8.9。秸秆速腐剂采用由北京康源绿洲生物科技有限公司提供的堆肥专用菌种,速腐剂计量为秸秆量的 0.2%。

1.3 测定方法

1.3.1 分析方法 2016年8月玉米收获后,用土钻在每个小区内按“S”型采集5个随机的表层土样,取样深度为20 cm,混合作为该小区混合样,装入灭菌自封袋。一部分样品立即放入4 °C冰箱保存,用来测定土壤微生物生物量碳,另一部分样品采回后,剔除植物残体和其他杂物,置于阴凉通风处摊晾风干,磨细,过2 mm筛备用。

土壤颗粒有机碳(POC)的提取采用参考文献[13]的方法,具体如下:称取10 g过2 mm筛的风干土样于250 mL三角瓶中,加入50 mL六偏磷酸钠振荡分散16 h,分散液过53 μm筛,筛上部分为颗粒有机碳,筛下部分(<53 μm)为矿物结合态有机碳(MOC);再用0.25 mm筛将其分离为粗颗粒态有机碳(coarse POC,即CPOC,250~2 000 μm)和细颗粒态有机碳(fine POC,即FPOC,53~250 μm),各组分烘干称重并计算其占全土的百分比,将以上各粒级土壤颗粒磨碎过0.149 mm筛并测定其有机碳含量。土壤容重采用环刀法测定;土壤总有机碳(TOC)和颗粒有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[14];矿物结合态有机碳(MOC)为总有机碳和颗粒有机碳的差值;活性有机碳(LOC)采用高锰酸钾氧化法测定^[15];微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法测定^[16]。

1.3.2 计算公式

微生物熵=微生物生物量碳含量/土壤总有机碳含量^[17];

不同粒径土壤颗粒有机碳含量=不同粒径土壤颗粒有机碳×不同粒径颗粒占土壤的百分比;

不同粒径土壤颗粒有机碳分配比例=不同粒径土壤颗粒有机碳含量/土壤总有机碳含量×100%^[18]。

以对照处理的土壤作为参考土壤,则碳库管理指数的计算公式^[19]:

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量/参考处理土壤总有机碳含量;

碳库活度(A)=活性有机碳含量/非活性有机碳含量;

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度;

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100;

活性有机碳有效率(ER)=活性有机碳含量/土壤总有机碳含量;

活性有机碳氧化稳定系数(Kos)=非活性有机碳含量/活性有机碳含量。

1.4 数据处理

试验数据采用SPSS 19.0和Excel 2013软件进行数据处理、绘图制表。所有的结果均用3次测定结果的平均值表示。不同处理之间的多重比较采用LSD最小显著差数法($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和施用生物炭下土壤总有机碳及土壤微生物量碳

与CK处理相比,各物料还田处理均能提高土壤有机碳含量(表2)。各处理下土壤有机碳含量表现为

BC>CS+BC>CS+D>CS>CK,其中BC处理较CK处理显著提高了45.48% ($P<0.05$)。除CS处理外,其他处理均与CK处理有显著差异 ($P<0.05$)。可见,施用生物炭提高土壤有机碳含量的效果明显优于秸秆还田。

各物料还田处理的微生物量碳含量均高于CK处理,且均显著提高了28.64%~104.18% ($P<0.05$) (表2)。其中CS+D处理最高,为227.69 g·kg⁻¹,其次为CS处理,CS+BC处理与CK处理间差异不显著 ($P>0.05$),说明秸秆还田有利于土壤微生物量碳的增加,且速腐剂有促进作用。

本研究中只有CS+D处理显著增加了土壤微生物熵 ($P<0.05$),而BC处理土壤微生物熵存在一定程度的下降,但与CK处理差异不显著 ($P>0.05$) (表2)。

2.2 秸秆还田和施用生物炭下土壤颗粒有机碳

各物料还田处理下颗粒有机碳、粗颗粒有机碳和细颗粒有机碳含量与CK处理差异显著 ($P<0.05$) (表3)。各处理下土壤颗粒有机碳含量表现为

CS+BC>CS+D>CS>BC>CS, CS+BC和CS+D处理比CK处理显著提高了89.93%和88.81% ($P<0.05$); CS+D、CS和CS+BC处理下土壤CPOC含量分别是CK处理的3.49、3.11、2.94倍,且均与BC处理差异显著 ($P<0.05$); 与CK处理相比,各物料还田处理的土壤FPOC含量显著提高0.98~1.74 g·kg⁻¹ ($P<0.05$),其中CS+BC处理的土壤FPOC含量最高。

与CK处理相比,各物料还田处理还能提高颗粒有机碳、粗颗粒有机碳和细颗粒有机碳的分配比例 (表3)。CPOC/TOC表现为CS+D>CS>CS+BC>BC>CK,与CPOC含量的趋势相同,其中CS+D和CS处理下CPOC/TOC分别是CK处理的2.83、2.68倍,且两种处理的CPOC/TOC显著高于CS+BC处理 ($P<0.05$) (表3); 占支配地位的颗粒有机碳为细颗粒有机碳,各处理下FPOC/TOC在19.44%~26.25%变化;与CK处理相比,CS+D、CS、CS+BC处理均显著提高了POC/TOC,增幅分别为54.49%、42.38%、40.33% ($P<0.05$)。

表2 不同处理对土壤有机碳和微生物量碳的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil total organic carbon and soil microbial biomass carbon

处理 Treatment	TOC/(g·kg ⁻¹)	MBC/(g·kg ⁻¹)	MQ
CK	11.94±0.36c	111.52±9.21c	9.35±0.85bc
CS	13.76±0.30bc	195.44±81.21ab	14.15±5.68ab
BC	17.37±2.57a	143.46±21.61b	8.38±1.72c
CS+BC	16.32±1.26ab	128.61±27.47bc	7.99±2.21c
CS+D	14.69±0.96b	227.69±36.53a	15.58±2.85a

平均值±标准差 ($n=3$), 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。TOC, 有机碳; MBC, 微生物生物量碳; MQ, 微生物熵。表6同。

Data show as Mean±SD ($n=3$), different lowercase letters within a column indicate significant difference at the 0.05 level. TOC, total organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; MQ, microbial entropy; similarly for Table 6.

表3 不同处理对土壤颗粒有机碳的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil particulate organic carbon

处理 Treatment	POC/(g·kg ⁻¹)	CPOC/(g·kg ⁻¹)	FPOC/(g·kg ⁻¹)	CPOC/TOC/%	FPOC/TOC/%	POC/TOC/%
CK	2.68±0.25c	0.35±0.06c	2.32±0.21c	2.95±0.41c	19.44±1.13c	22.39±1.40b
CS	4.39±0.28ab	1.09±0.04a	3.30±0.27b	7.91±0.02a	23.97±1.50abc	31.88±1.37a
BC	4.23±0.53b	0.69±0.03b	3.54±0.55ab	4.05±0.77c	20.58±3.56bc	24.62±4.03b
CS+BC	5.09±0.28a	1.03±0.03a	4.06±0.28a	6.36±0.53b	25.06±3.70ab	31.42±4.19a
CS+D	5.06±0.56a	1.22±0.23a	3.83±0.37ab	8.34±1.51a	26.25±3.78a	34.59±4.96a

POC, 颗粒有机碳; CPOC, 粗颗粒有机碳; FPOC, 细颗粒有机碳。表6同。

POC, particulate organic carbon; CPOC, coarse particulate organic carbon; FPOC, fine particulate organic carbon; similarly for Table 6.

2.3 秸秆还田和施用生物炭下土壤矿物结合态有机碳

各处理下矿物结合态有机碳含量呈现与土壤有机碳含量大小趋势一致(表 4),具体表现为 $BC > CS + BC > CS + D > CS > CK$,其中,最高的 BC 处理,较 CK 处理显著增加了 $3.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$)。CK 和 BC 处理下矿物结合态有机碳分配比例最高,分别为 77.61% 和 75.38%。POC/MOC 可在一定程度上反映土壤有机碳的稳定程度,其值越大,土壤有机碳活性越高、周转期越短,其值小则土壤有机碳较稳定,不易被生物所利用^[20]。CS+D 和 CS 处理的 POC/MOC 显著高于 BC 和 CK 处理,表明 CK 和 BC 处理下土壤有机碳稳定性较高,土壤有机碳能稳定积累,而 CS+D 和 CS 处理下土壤有机碳活性高,周转较快。

2.4 秸秆还田和施用生物炭下土壤活性有机碳及碳库管理指数

对土壤活性有机碳而言,各物料还田处理较 CK 处理提高 $0.56 \sim 1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中 BC 处理最大,为 $3.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为 CS+D 处理,但各处理间差异不显著($P > 0.05$)(表 5);BC、CS+BC 处理下非活性

有机碳含量分别较 CK 处理显著提高 42.05%、38.07% ($P < 0.05$);CS+D、CS 处理的活性有机碳有效率值较 CK 处理提高了 0.28~0.30 个单位,但各处理间无显著差异($P > 0.05$);CS+BC 处理下活性有机碳氧化稳定系数最高,是 CK 处理的 1.44 倍,而其他处理均小于 CK 处理;各处理下碳库管理指数表现为 $CS + D > CS + BC > BC > CS > CK$,各处理分别比 CK 处理高 87.42%、83.68%、72.86% 和 70.95%,但均未达到显著水平($P > 0.05$)。

2.5 土壤有机碳相关指标之间的相关分析

土壤有机碳相关指标之间的相关性如表 6 所列,POC 与 TOC 之间呈显著相关($P < 0.05$),说明物料还田处理下土壤有机碳的含量增加可能主要是通过提高土壤颗粒有机碳来实现的。MOC 与 TOC 存在极显著相关性($P < 0.01$),说明本研究区矿物结合态有机碳与土壤有机碳存在密切的转化关系。CPMI 与 TOC 间相关性不显著($P > 0.05$),而与 LOC 之间呈极显著相关,表明碳库管理指数仅能够指示土壤有机碳的活性变化情况,而对土壤总有机碳数量变化响应不灵敏。

表 4 不同处理对土壤矿物结合态有机碳的影响

Table 4 Effects of different treatments on soil mineral-associated organic carbon

处理 Treatment	MOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MOC/TOC/%	POC/MOC/%
CK	$9.26 \pm 0.11\text{b}$	$77.61 \pm 1.40\text{a}$	$0.29 \pm 0.02\text{c}$
CS	$9.37 \pm 0.06\text{b}$	$68.12 \pm 1.37\text{b}$	$0.47 \pm 0.30\text{a}$
BC	$13.14 \pm 2.42\text{a}$	$75.38 \pm 4.03\text{a}$	$0.33 \pm 0.07\text{bc}$
CS+BC	$11.23 \pm 1.53\text{ab}$	$68.58 \pm 4.19\text{b}$	$0.46 \pm 0.09\text{ab}$
CS+D	$9.63 \pm 1.22\text{b}$	$65.41 \pm 4.96\text{b}$	$0.53 \pm 0.11\text{a}$

MOC,矿物结合态有机碳。表 6 同。

MOC, mineral-associated organic carbon; similarly for the Table 6.

表 5 不同处理对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响

Table 5 Effects of different treatments on soil labile organic carbon and carbon pool management index

处理 Treatment	LOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	NLOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ER/%	NLOC/TOC /%	Kos/%	A	CPMI
CK	$1.87 \pm 0.68\text{a}$	$10.06 \pm 0.81\text{c}$	$15.73 \pm 5.90\text{a}$	$84.27 \pm 5.90\text{a}$	$594.12 \pm 237.60\text{a}$	$0.19 \pm 0.09\text{a}$	$100.00 \pm 0.00\text{a}$
CS	$2.76 \pm 0.17\text{a}$	$11.00 \pm 0.19\text{bc}$	$20.06 \pm 0.90\text{a}$	$79.94 \pm 0.90\text{a}$	$399.27 \pm 21.84\text{a}$	$0.25 \pm 0.01\text{a}$	$170.95 \pm 64.33\text{a}$
BC	$3.08 \pm 1.11\text{a}$	$14.29 \pm 2.06\text{a}$	$17.60 \pm 4.79\text{a}$	$82.40 \pm 4.79\text{a}$	$499.39 \pm 174.41\text{a}$	$0.22 \pm 0.07\text{a}$	$172.86 \pm 48.07\text{a}$
CS+BC	$2.43 \pm 1.55\text{a}$	$13.89 \pm 2.81\text{ab}$	$15.43 \pm 1.90\text{a}$	$84.57 \pm 10.90\text{a}$	$853.94 \pm 711.04\text{a}$	$0.20 \pm 0.16\text{a}$	$183.68 \pm 188.10\text{a}$
CS+D	$2.99 \pm 1.18\text{a}$	$11.70 \pm 1.57\text{abc}$	$20.44 \pm 8.12\text{a}$	$79.56 \pm 8.12\text{a}$	$466.18 \pm 290.85\text{a}$	$0.27 \pm 0.12\text{a}$	$187.42 \pm 112.36\text{a}$

LOC,活性有机碳;NLOC,非活性有机碳;ER,活性有机碳有效率;Kos,活性有机碳氧化稳定系数;A,碳库活性;CPMI,碳库管理指数。表 6 同。

LOC, labile organic carbon; NLOC, no labile organic carbon; ER, effective rate of labile organic carbon; Kos, the coefficient of oxidation stability of labile organic carbon; A, carbon pool activity; CPMI, carbon pool management index; similarly for Table 6.

表 6 土壤有机碳相关指标之间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients of related indicators of soil organic carbon

指标 Index	TOC	MBC	POC	MOC	LOC	CPMI
TOC	1.000					
MBC	0.011	1.000				
POC	0.545 *	0.441	1.000			
MOC	0.908 **	-0.234	0.143	1.000		
LOC	0.252	0.330	0.535 *	0.030	1.000	
CPMI	0.064	0.280	0.457	-0.304	0.676 **	1.000

* 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关 ($n=15$)。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively ($n=15$).

3 讨论

3.1 秸秆还田和施用生物炭对土壤有机碳、微生物熵及碳库管理指数的影响

有机物料还田不仅能直接增加土壤有机碳含量, 增加土壤微生物数量与活性, 还能改善农田生产环境, 提高土壤肥力^[21]。本研究结果表明, 与无物料还田对比, 各物料还田处理均能显著增加土壤总有机碳含量, 这与马超等^[22]和徐蒋来等^[10]的研究结果类似。秸秆还田和施用生物炭是重要的农田碳管理方式, 因此, 未来提升农田土壤固碳减排潜力, 应该加强秸秆和生物炭施用。有机物料的化学组成决定其分解过程, 分解过程的快慢影响土壤有机碳的积累。秸秆和生物炭是两种含碳物质组成比例完全不同的有机物料, 因此, 秸秆与生物炭还田对土壤截碳和固碳潜力的影响不一致。有研究表明, 生物炭改良后的土壤, 其有机碳含量明显高于秸秆^[23]。本研究中, 施用生物炭的土壤总有机碳含量高于秸秆还田处理, 这是因为生物炭中芳香碳所占比例较大^[24], 属惰性碳, 从而导致生物炭稳定性较高且不易被分解, 更容易长期固存于土壤中, 而秸秆富含新鲜有机质, 施入后易引起土壤有机碳的激发效应, 加快秸秆分解。

微生物熵的变化能较好地反映出土壤碳库的容量和活性特征, 增加有机物输入能够提高土壤微生物熵^[25], 本研究中, 秸秆还田和秸秆+速腐剂还田处理下土壤微生物熵较高, 这与龙攀等^[26]的研究一致, 可能是因为向土壤中归还的秸秆为微生物提供了可直接利用的碳源, 提高了微生物数量和活性, 有利于微生物固定有机碳。生物炭在一定程度上也可增加土壤微生物量, 一方面, 由于生物炭具有结构疏松多孔、表面积巨大及阳离子交换量较高等特点, 可为土壤微生物提供良好的环境^[9]; 另一方面, 生物炭含有丰富的营养物

质, 为微生物提供充足的养分来源, 促进微生物的生长、繁殖并改变土壤中微生物群落结构, 进而显著增加土壤微生物数量^[27]。但是本研究中施用生物炭处理下微生物熵低于秸秆还田处理, 其原因可能有: 生物炭具有稳定的有机碳形态, 微生物利用生物炭中有机碳的能力较低^[28]; 生物炭的包封吸附作用会降低土壤原有有机碳的分解转化, 从而减缓了土壤微生物量碳的周转; 同时生物炭的施用增加了碳水化合物、酯族、芳烃等难以被微生物利用的有机大分子的形成, 这种过程降低土壤微生物量^[29]。施用生物炭处理下有机碳的微生物分解率低于秸秆还田, 因此生物炭更有利于土壤固碳。

碳库管理指数可以反映不同土壤碳库变化的差异及生态恢复能力^[3]。杨滨娟等^[30]通过对施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响研究发现, 施绿肥或绿肥氮肥配施较对照显著提高土壤碳库管理指数。本研究结果表明, 各物料还田处理较对照处理不仅能增加各形态有机碳含量, 还能提高土壤碳库管理指数。其中以秸秆+速腐剂还田效果为最好, 这可能是因为速腐剂含有较多的活性微生物, 因而其进入土壤后, 直接增加了土壤中可降解秸秆的微生物数量, 提高了土壤有机碳活性^[31]。相关分析的结果表明, 碳库管理指数与土壤总有机碳的相关性较弱, 而与微生物量碳、颗粒有机碳相关性较强, 与活性有机碳呈极显著相关, 因此, 微生物量碳、颗粒有机碳、活性有机碳的动态变化可以指示有机碳短期的改变, 可作为评价短期内土壤有机碳变化及其质量对有机物料还田的敏感性指标。

3.2 秸秆还田和施用生物炭对土壤不同形态有机碳及其分配比例的影响

土壤不同形态有机碳分配比例综合了土壤有机碳绝对量与各组分有机碳含量, 更能表明不同处理影响

有机碳稳定性的强度,避免使用绝对量的差异^[32]。土壤颗粒有机碳在土壤中周转速度较快,比土壤有机碳更易受农田管理措施的影响,能在较短时间内反映土壤质量变化^[33],被认为是土壤活性有机碳的组分和量度指标。研究表明,土壤颗粒有机碳的分配比例一般在10%以上,可高达30%~85%^[34]。本研究结果显示,各处理的POC/TOC值为22.39%~34.59%,这与王虎等^[35]的结果基本一致。吴萍萍等^[36]的研究表明,秸秆还田显著提高颗粒有机碳含量。本研究发现,秸秆还田、秸秆+生物炭混施还田、秸秆+速腐剂还田较对照处理都显著提高了土壤颗粒有机碳的含量和分配比例,这可能是由于秸秆含有丰富的矿质元素,还田后能促进微生物生长,进而提高微生物量;秸秆+速腐剂还田处理的粗颗粒有机碳、颗粒有机碳分配比例最高,这可能是由于速腐剂中富含的功能微生物可以增加土壤微生物群落的功能多样性和活性,加快还田秸秆腐解进程,最终实现对土壤养分含量的有效提升^[22]。土壤矿物结合态有机碳是有机碳的最终分解

产物,在土壤黏粒和粉粒的保护下具有较高的稳定性,对土壤有机碳具有较强的固持和保护作用^[37]。本研究发现,施用生物炭的土壤矿物结合态有机碳分配比例显著高于秸秆还田、秸秆+速腐剂还田,这可能是由于施用生物炭对土壤黏粒的影响较小,从而使矿物结合态有机碳受到良好的保护,分配比例较高,有利于土壤有机碳长期稳定固持。

4 结论

秸秆还田和施用生物炭均提高了土壤活性有机碳和碳库管理指数,改善了土壤有机碳质量,有利于保持土壤的可持续生产力。其中秸秆还田、秸秆+速腐剂还田更有助于紫色土促进有机活性碳的累积,而施用生物炭下紫色土矿物态结合有机碳的含量较高,有机碳稳定性较高,是提高农田土壤固碳能力的重要措施。土壤碳库管理指数与土壤活性有机碳呈极显著相关,碳库管理指数能作为反映土壤有机碳变化的早期指示。

参考文献 References:

- [1] 何毓蓉.中国紫色土,第二版.北京:科学出版社,2003:56-78.
He Y R.Purple Soil in China,2nd edition,Beijing:Science Press,2003:56-78.(in Chinese)
- [2] 杨合龙,孙宗玖,杨静,马慧敏.封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响,草业科学,2015,32(12):1945-1952.
Yang H L,Sun Z Z,Yang J,Ma H M.Effects of enclosure periods on soil active organic carbon and carbon pool management index in *Seriphidium transiliense* desert grassland.Pratacultural Science,2015,32(12):1945-1952.(in Chinese)
- [3] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应,生态学杂志,1999,18(3):33-39.
Shen H,Cao Z H,Hu Z Y.Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil.Chinese Journal of Ecology,1999,18(3):33-39.(in Chinese)
- [4] 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.土壤学报,2006,43(5):723-729.
Xu M G,Yu R,Wang B R.Labile organic matter and carbon management index in read soil under long-term fertilization.Acta Pedologica Sinica,2006,43(5):723-729.(in Chinese)
- [5] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,黄宇.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系.生态学报,2005,25(3):513-519.
Wang Q K,Wang S L,Feng Z W,Huang Y.A dive soil organic matter and its relationship with soil quality.Acta Ecologica Sinica,2005,25(3):513-519.(in Chinese)
- [6] Liao Y,Wu W L,Meng F Q,Smith P,Lal R.Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China.Bio-geosciences,2014,11(11):1403-1413.
- [7] 张翰林,郑宪清,何七勇,李双喜,张娟琴,吕卫光.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响.水土保持学报,2016,30(4):216-220.
Zhang H L,Zheng X Q,He Q Y,Li S X,Zhang J Q,Lyu W G.Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems.Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(4):216-220.(in Chinese)
- [8] 尚杰,耿增超,陈心想,赵军,耿荣,王森.施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响.农业环境科学学报,2015,34(3):509-517.
Shang J,Geng Z C,Chen X X,Zhao J,Geng R,Wang S.Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland.Journal of Agro-Environment Science,2015,34(3):509-517.(in Chinese)

- [9] 何莉莉,杨惠敏,钟哲科,公丕涛,刘玉学,吕豪豪,杨生茂.生物炭对农田土壤细菌群落多样性影响的 PCR-DGGE 分析.生态学报,2014,34(15):4288-4294.
He L L, Yang H M, Zhong Z K, Gong P T, Liu Y X, Lyu H H, Yang S M. PCR-DGGE analysis of soil bacterium community diversity in farmland influenced by biochar. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4288-4294. (in Chinese)
- [10] 徐蒋来,胡乃娟,张政文,朱利群.连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响.土壤,2016,48(1):71-75.
Xu J L, Hu N J, Zhang Z W, Zhu L Q. Effects of continuous straw returning on soil nutrients and carbon pool in rice-wheat rotation system. *Soil*, 2016, 48(1): 71-75. (in Chinese)
- [11] 屈皖华,李志刚,李健.施用有机物料对沙化土壤碳氮含量、酶活性及紫花苜蓿生物量的影响.草业科学,2017,34(3):456-464.
Qu W H, Li Z G, Li J. Effects of fertilizing organic materials on contents of carbon and nitrogen, enzyme activity of desertified soils and alfalfa biomass. *Pratacultural Science*, 2017, 34(3): 456-464. (in Chinese)
- [12] 王月玲,耿增超,尚杰,曹胜磊,耿荣,赵军,林云.施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化.农业环境科学学报,2016,35(3):532-539.
Wang Y L, Geng Z C, Shang J, Cao S L, Geng R, Zhao J, Lin Y. Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in Loess soil as influenced by biochar. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 532-539. (in Chinese)
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [14] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测.北京:中国大地出版社,2008:27-34.
Yang J H, Wang C L, Dai H L. *Soil Agrochemical Analysis and Environmental Monitoring*. Beijing: China Land Press, 2008: 27-34. (in Chinese)
- [15] 于荣,徐明岗,王伯仁.土壤活性有机质测定方法的比较.中国土壤与肥料,2005(2):49-52.
Yu R, Xu M G, Wang B R. Study on methods for determining labile organic matter of soils. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2005(2): 49-52. (in Chinese)
- [16] 林启美,吴玉光.熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进.生态学杂志,1999,18(2):63-66.
Lin Q M, Wu Y G. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63-66. (in Chinese)
- [17] 周丽霞,丁明懋.土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用.生物多样性,2007,15(2):162-171.
Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 162-171. (in Chinese)
- [18] 廖洪凯,龙健.喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化.应用生态学报,2011,22(9):2253-2258.
Liao H K, Long J. Variation of soil organic carbon under different vegetation types in Karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2253-2258. (in Chinese)
- [19] 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. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393-406.
- [20] 于建光,李辉信,胡锋,沈英.施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响.生态环境,2006,15(3):606-610.
Yu J G, Li H X, Hu F, Shen Y. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3): 606-610. (in Chinese)
- [21] 杨封科,何宝林,张立功,高应平.膜下秸秆还田双垄种植对土壤养分平衡及玉米产量的影响.草业科学,2015,32(11):1892-1900.
Yang F K, He B L, Zhang L G, Gao Y P. Effects of double mulched furrow-ridge cropping with film and straw on soil nutrients balance and maize yield in semiarid area of China. *Pratacultural Science*, 2015, 32(11): 1892-1900. (in Chinese)
- [22] 马超,周静,刘满强,郑学博,崔键,李辉信,康炳龙.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响.土壤学报,2013,50(5):915-921.
Ma C, Zhou J, Liu M Q, Zheng X B, Cui J, Li H X, Kang B L. Effects of incorporation of pretreated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang Black Soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 915-921. (in Chinese)
- [23] 刘鸿骄,侯亚红,王磊.秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良.环境科学与技术,2014,37(1):75-80.
Liu H J, Hou Y H, Wang L. Amelioration effect of reed straw biochar returning to salty soil in the view of low carbon point. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1): 75-80. (in Chinese)

- [24] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [25] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1411-1418.
Liu S L, Su Y R, Huang D Y, Xiao H A, Wu J S. Response of Cmic-to-Corg to land use and fertilization in subtropical region of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1411-1418. (in Chinese)
- [26] 龙攀, 隋鹏, 高旺盛, 王彬彬, 严玲玲, 邢源, 陈源泉. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响. *中国农业大学学报*, 2015, 20(3): 153-160.
Long P, Sui P, Gao W S, Wang B B, Yan L L, Xing Y, Chen Y Q. Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil organic carbon and microbial carbon. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(3): 153-160. (in Chinese)
- [27] Verheijen F G A, Jeffery S, Bastos A C, van der Velde M, Dias I. *Biochar Application to Soils, A Xritical Acientific Eeview of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European, 2010.
- [28] 高学振, 张丛志, 张佳宝, 丁宁宁. 生物炭、秸秆和有机肥对砂姜黑土改性效果的对比研究. *土壤*, 2016, 48(3): 468-474.
Gao X Z, Zhang C Z, Zhang J B, Ding N N. Comparison of biochar, straw and manure in improving Shajiang Black Soil. *Soils*, 2016, 48(3): 468-474. (in Chinese)
- [29] 陈利军, 孙波, 金辰, 蒋瑀霁, 陈玲. 等碳投入的有机肥和生物炭对红壤微生物多样性和土壤呼吸的影响. *土壤*, 2015, 47(2): 340-348.
Chen L J, Sun B, Jin C, Jiang Y J, Chen L. Effect of organic manure and biochar with equal amount of carbon input on microbial diversity and respiration of red soil. *Soils*, 2015, 47(2): 340-348. (in Chinese)
- [30] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 陈洪俊, 王淑彬. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响. *应用生态学报*, 2014, 24(10): 2907-2913.
Yang B J, Huang G Q, Lan Y, Chen H J, Wang S B. Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2907-2913. (in Chinese)
- [31] 蔡立群, 牛怡, 罗珠珠, 武均, 岳丹, 周欢, 董博, 张仁陟. 秸秆促腐还田土壤养分及微生物量的动态变化. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9): 1047-1056.
Cai L Q, Niu Y, Luo Z Z, Wu J, Yue D, Zhou H, Dong B, Zhang R Z. Dynamic characteristics of soil nutrients and soil microbial biomass of field-returned straws at different decay accretion conditions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1047-1056. (in Chinese)
- [32] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 徐德应. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响. *林业科学*, 2002, 38(4): 19-29.
Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, Xu D Y. The effects of land use change on the distribution of soil organic in physical fractionation of soil. *Scientia Silvae Sinica*, 2002, 38(4): 19-29. (in Chinese)
- [33] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标. *生态环境*, 2003, 12(4): 500-504.
Zhang J B, Song C C. The sensitive evaluation indicators of effects of land use change on soil carbon pool. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 500-504. (in Chinese)
- [34] Carter M R, Kunelius H T, Angers D A. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1194-1199.
- [35] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3491-3498.
Wang H, Wang X D, Tian X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3491-3498. (in Chinese)
- [36] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 白土活性有机碳组分对不同施肥措施响应. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3474-3479.
Wu P P, Wang J J, Li L J. Responses of labile organic carbon components to different fertilization practices in white soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3474-3479. (in Chinese)
- [37] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, Clarke P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Soil Research*, 1994, 32(2): 285-309.

(责任编辑 苟燕妮)