

DOI: 10.11766/trxb201805020169

生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响*

王富华 黄容 高明[†] 王子芳 田冬

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要 以油菜/玉米轮作农田生态系统为研究对象, 通过田间微区试验, 研究了生物质炭、秸秆 (BC: 8 000 kg·hm⁻²生物质炭、CS: 8 000 kg·hm⁻²秸秆、0.5BC: 4 000 kg·hm⁻²生物质炭、0.5CS: 4 000 kg·hm⁻²秸秆、BC+CS: 4 000 kg·hm⁻²生物质炭+4 000 kg·hm⁻²秸秆) 与化肥配施对紫色土团聚体含量及稳定性、土壤有机碳及有机碳在各粒级团聚体中分布的影响, 为合理利用有机物料及为紫色土培肥提供依据。结果表明: (1) 与对照 (CK) 相比, 秸秆、生物质炭还田 (除 0.5BC 处理外) 均能提高 >2 mm 粒级团聚体含量, 降低 <0.053 mm 粒级团聚体含量, 同时提高水稳性团聚体的平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、大于 0.25 mm 团聚体含量 ($R_{0.25}$), 其中只有 CS 处理达到了显著水平, 且随着秸秆施用量增加, 效果越显著。CS+BC 处理则能显著提高 0.25 ~ 2 mm 粒级水稳性团聚体含量。(2) 除 CS 处理, 其他各处理较 CK 均能显著提高土壤总有机碳含量, 其中 BC 和 CS+BC 处理分别提高了 45.55% 和 44.45% ($P < 0.05$), 效果优于单施秸秆处理, 且随着生物质炭施用量的增加, 土壤总有机碳呈增加趋势。对不同粒级团聚体有机碳而言, 各处理的团聚体有机碳主要分布在 <0.053 mm 和 >2 mm 粒级团聚体中; BC 处理较其他处理能提高土壤不同粒级团聚体有机碳含量, 其次为 CS+BC 处理。(3) 通过计算团聚体有机碳贡献率发现, 各处理对土壤团聚体有机碳贡献率主要分布在 0.25 ~ 2 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体中, 其中仅 CS 处理显著提高了 >2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率, 较 CK 提高了 53.53%; CS+BC、0.5BC 处理分别较 CK 显著提高了 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率, 增幅为 26.20%, 48.63%。(4) 秸秆和生物质炭还田能提高玉米和油菜的生物产量和经济产量, 其中 CS、BC、CS+BC 效果较明显。总之, 秸秆与生物质炭配施是改善紫色土结构和提升碳水平的较优培肥措施。

关键词 生物质炭; 秸秆; 团聚体稳定性; 有机碳; 有机碳贡献率

中图分类号 X53 **文献标识码** A

土壤团聚体和有机碳是评价土壤地力的重要指标^[1]。土壤团聚体能协调土壤中的水、肥、气、热, 稳定土壤疏松熟化层, 作为农田土壤的重要组成部分, 其结构组成和形态稳定 (尤其是水稳

定性) 对土壤肥力、结构、性质等方面有显著影响^[2]。土壤有机碳是团聚体的胶结物质, 对团粒结构的形成和稳定有重要影响, 同时土壤团聚体有机碳提供了保护场所减缓微生物分解, 促进土

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0800101)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

作者简介: 王富华 (1992—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: 2046754536@qq.com

收稿日期: 2018-05-02; 收到修改稿日期: 2018-06-12; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-08-15

壤有机碳稳定和累积,因此,土壤团聚体的形成、转化与土壤固碳过程密不可分^[3-4]。人类的耕作活动会降低水稳定性大团聚体的含量和有机碳库储量^[5],而施用秸秆、生物质炭能增加土壤团聚化过程,可在一定程度上减少耕作活动对团聚体的破坏作用,提高土壤大团聚体的含量^[6]。毛霞丽等^[7]对浙江省稻田长期定位试验表明,秸秆还田显著提高了大团聚体水稳定性,同时强化团聚体对有机碳的保护作用。张鹏等^[8]的研究也表明不同秸秆还田处理下 >0.25 mm粒级团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均显著高于CK处理。但是关于生物质炭施入土壤对土壤团聚体及其稳定性的研究结果仍存在着争议。付琳琳等^[9]研究表明,生物质炭施入土壤后可以显著提高土壤团聚体中有机碳含量,但也有研究表明单施生物质炭对土壤大团聚体含量和稳定性的影响不显著,甚至降低了土壤团聚体的稳定性,而生物质炭与秸秆配合的效果比较明显^[10-11]。紫色土的抗侵蚀能力弱,其团聚体结构也易破坏。以往的研究多集中单施秸秆或生物质炭对土壤团聚体中有机碳的研究,尤其是在黄土丘陵区 and 南方红壤上研究颇多,而对生物质炭与秸秆配合施用的研究较少,且它们的不同施用量对土壤团聚体组成及其有机碳的分布特征影响尚不清楚,尤其是在西南紫色土丘陵区还鲜有报道。本试验通过田间微区试验,研究了油菜/玉米轮作下单施秸秆、生物质炭以及它们的配施对紫色土团聚体和有机碳的影响,旨在为改善四川盆地紫色土壤结构特征及团聚体中有机碳的分布提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布置于重庆市北碚区西南大学试验农场内,该地属于亚热带季风湿润气候,雨量充沛,年降雨量为1 087 mm,有春早、夏热、秋短、冬迟特征,最高气温44.3℃,最低气温-3.1℃,年平均气温18.2℃,≥10℃的积温6 006℃,年日照时数1 277 h,海拔高度266.3 m。

1.2 供试材料

供试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,

是重庆、四川紫色土区分布最广的一种土壤。其基本理化性质为:有机碳 $9.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $135.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $17.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $206.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH为6.7。

试验中所用生物质炭由四川省久晟农业有限责任公司提供,以油菜秸秆为原料在500℃高温厌氧条件下热解2 h烧制,其碳含量为62.58%,C/N为45.52,pH为8.9。油菜秸秆的有机碳含量为 $392.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为41.56,玉米秸秆的有机碳含量为 $412.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为47.74。

1.3 试验设计

试验地种植模式为油菜/玉米轮作种植。本试验共设置6个处理,每个处理3次重复,采用随机区组排列在18个微区中,微区大小为 $2 \text{ m}\times 1 \text{ m}$,能独立排灌,各个微区的水肥管理均相同。六个处理分别为CK(单施化肥,无物料还田)、BC($8\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭配施化肥还田)、0.5BC($4\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭配施化肥还田)、CS($8\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆配施化肥还田)、0.5CS($4\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆配施化肥还田)、BC+CS($4\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭+ $4\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆配施化肥还田)。本试验以“等碳量”的原则施用秸秆或生物质炭,施入的具体措施为在油菜季还玉米秸秆,在玉米季还油菜秸秆;生物质炭由油菜秸秆而制成;将秸秆通过粉碎机粉碎成2 cm左右,生物质炭过10 mm筛,移栽作物前3 d将秸秆或生物质炭均匀覆盖于地表,然后进行10 cm深翻耕。

试验于2015年10月11日开始,2016年8月1日结束,各作物的氮、磷、钾、硼养分量根据《中国主要作物施肥指南》来确定,各季作物栽培方式和田间管理措施按照当地习惯进行。其中油菜(96V44,密度 $8 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$)于2015年10月11日育苗,2015年11月3日移栽,2016年4月19日收获。玉米(中豪9号,密度 $4 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$)于2016年4月9日育苗,4月20日移栽,8月1日收获。油菜季的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥和硼肥用量分别为150、90、90和15 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占70%),磷钾硼肥做基肥一次性施用。基肥和基肥分别于2015年11月1日和2016年2月20日施用,施用方法为小雨前后撒施。玉米季各处理的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥分别为180、60、90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全部作为基肥在玉米移栽时施

入。氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、硫酸钾(K₂O 51%)、硼砂(含 B 12%)，所有处理田间管理技术与当地农民习惯一样。

1.4 样品采集与测定方法

于2016年8月收获玉米，随后再采集土壤样品。在每一个小区内采集0~20 cm的原状土壤，每个小区随机采集5个样点，将5个点采集的土壤混合为一个土壤样品，然后装入自封袋内带回实验室。土壤样品去除杂物，将大土块沿土体自然裂隙轻轻掰开，过10 mm筛，用于土壤团聚体的测定。

团聚体根据Elliott^[12]的土壤团聚体湿筛法测定：先将测定土壤团聚体的筛子依次套好（从上到下的顺序依次为2 mm、0.25 mm、0.053 mm），然后称取50 g风干土样（过10 mm的筛）平铺于2 mm的筛子上，将套筛放入木桶中浸泡5 min后，手动上下振荡2 min（振幅3 cm，频率为30次·min⁻¹），然后按次序收集不同粒级孔筛中及木桶中的土样于铝盒中，依次分别为粒径>2 mm的大团聚体、粒径为0.25~2 mm的较大团聚体、粒径为0.053~0.25 mm的微团聚体、粒径<0.053 mm的黏粉粒组分，然后将铝盒放置于烘箱，60℃烘干称重，计算各级团聚体的质量百分比。然后将各粒级土研磨过0.25 mm的筛，分别放置于自封袋中于室温下保存，用于测定不同粒级团聚体的有机质（采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法）。

1.5 数据处理

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）和>0.25 mm团聚体含量（ $R_{0.25}$ ）描述。其计算公式如下：

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i \bar{X}_i$$

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i \right)$$

式中， \bar{X}_i 为某级团聚体平均直径（本研究各级团聚体平均直径取值分别为大团聚体（6 mm）、较大团聚体（1.125 mm）、微团聚体（0.1515 mm）、黏粉粒组分（0.0265 mm））， W_i 为第*i*级团聚体的质量。

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{x < 0.25}}{M_T}$$

式中， $M_{x < 0.25}$ 为粒径<0.25 mm团聚体的质量， M_T 为团聚体总质量。

$$\text{某粒级团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率} = \frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体含量} (\%) \times 100}{\text{土壤总有机碳含量}}$$

通过此公式可以计算出各粒级团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率。

利用SPASS version20软件进行方差分析和多重比较，显著性分析采用LSD（Duncan）法进行，本试验作图采用Origin 9.0，表格采用Excel 2016。

2 结果

2.1 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体含量的影响

从表1可以看出，除0.5BC外，各处理的土壤团聚体的优势粒径为0.053~0.25 mm（29.45%~34.44%），其次为0.25~2 mm和<0.053 mm，而>2 mm（7.17%~18.56%）粒级土壤团聚体含量最少。除0.5BC处理，各处理较CK均能提高>2 mm粒级团聚体含量，其中CS处理效果最显著，提高了117.8%，且CS处理较BC、CS+BC、0.5CS处理也均能显著提高>2 mm粒级团聚体含量，分别提高了70.90%、84.68%、52.63%。在0.25~2 mm粒级团聚体中，BC、CS+BC、0.5CS处理较CK均有不同程度的提高，其中CS+BC处理最显著，提高了13.31%，而CS、0.5BC处理却降低了0.25~2 mm粒级团聚体含量。各处理的0.053~0.25 mm团聚体含量较CK处理均有所下降，但差异不显著。在粒径<0.053 mm土壤团聚体中，仅0.5BC处理较CK显著提高了26.14%，其他各处理均降低了<0.053 mm粒级团聚体含量。总体上，单施秸秆、秸秆与生物质炭配施对团聚体含量的影响效果较单施生物质炭好。

2.2 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体稳定性的影响

不同处理对土壤水稳性团聚体稳定性的影响从表2可以看出，与CK相比，除0.5BC处理，各处理的水稳性团聚体的MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 均有不同程度的提高，其中CS处理的MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 最高，分别较CK显著提高了65.52%、57.14%、22.13%，其次为0.5CS处理，且CS+BC和BC处理的 $R_{0.25}$ 较CK分别提高了14.47%和9.29%。而0.5BC处理的MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 较CK均有所降低。总体上单施秸秆效果

表1 不同处理对各粒级团聚体含量的影响

Table 1 Effects of the treatments on content of soil aggregates relative to fraction

处理 Treatment	团聚体相对含量 Relative content of soil aggregates by fraction /%			
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
CK	8.52 ± 3.46bc	26.59 ± 2.53bc	34.44 ± 2.75a	30.45 ± 3.28b
CS	18.56 ± 2.02a	24.32 ± 1.61c	34.29 ± 4.77a	22.83 ± 3.19c
BC	10.86 ± 2.80bc	27.52 ± 3.16abc	34.19 ± 4.83a	27.43 ± 3.64bc
CS+BC	10.05 ± 0.54bc	30.13 ± 0.18a	32.67 ± 3.20a	27.15 ± 4.10bc
0.5BC	7.17 ± 0.14c	24.97 ± 0.06bc	29.45 ± 0.53a	38.41 ± 0.41a
0.5CS	12.16 ± 0.06b	27.86 ± 0.22ab	31.44 ± 0.41a	28.54 ± 0.49b

注：不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。下同 Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$)

表2 不同处理对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

Table 2 Effects of the treatments on stability of soil water-stable aggregates

处理 Treatment	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$
CK	0.87 ± 0.20bc	0.21 ± 0.04bc	35.11 ± 4.26bc
CS	1.44 ± 0.13a	0.33 ± 0.04a	42.88 ± 3.62a
BC	1.02 ± 0.19b	0.25 ± 0.05b	38.37 ± 5.65ab
CS+BC	1.00 ± 0.03bc	0.25 ± 0.02b	40.19 ± 0.40ab
0.5BC	0.77 ± 0.01c	0.17 ± 0.00c	32.14 ± 0.09c
0.5CS	1.10 ± 0.00b	0.25 ± 0.00b	40.01 ± 0.16ab

较佳，且秸秆施用量越多，效果越显著，而秸秆与生物质炭配施的效果优于单施生物质炭。

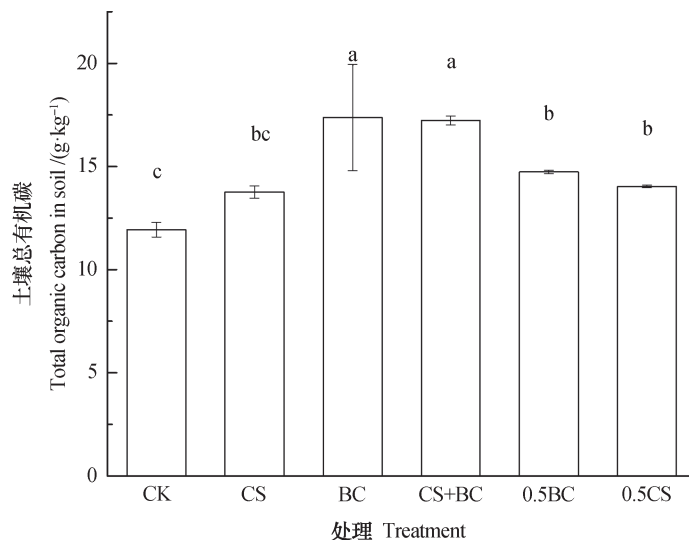
2.3 生物质炭与秸秆配施对紫色土总有机碳及团聚体有机碳分配的影响

秸秆与生物质炭还田对土壤总有机碳含量的影响如图1所示，与CK相比，各处理均不同程度地提高了土壤总有机碳的含量，其中BC处理的土壤总有机碳含量最高，较CK显著提高了45.55%，其次为CS+BC，较CK显著提高了44.45%，而CS处理较CK仅提高了15.30%，没有达到显著水平。而BC、CS+BC处理较CS处理分别显著提高了26.24%、25.28%，同时BC处理较0.5BC处理显著提高了17.87%。这表明单施生物质炭、秸秆与生物质炭配施对提高土壤总有机碳的效果要优于单施秸秆，且随着生物质炭施用量增多，土壤总有机碳含量呈增加趋势。

除CK处理外，各处理的不同粒级团聚体有机碳含量从大到小依次为 <0.053 mm、0.25 ~ 2 mm、>2 mm、0.053 ~ 0.25 mm团聚体 (表3)。与CK相比，BC处理显著增加了各粒级团聚体有机

碳含量。CS+BC和0.5CS处理较CK处理显著增加了0.25 ~ 2 mm粒级团聚体有机碳含量，分别增加了9.48%和9.67%。CS和CS+BC处理显著增加了<0.053 mm粒级团聚体有机碳含量，较CK处理分别增加了60.12%、117.3%。除0.5CS处理稍微降低了>2 mm粒级团聚体有机碳含量外，其他各处理均能增加各粒级团聚体有机碳含量，其中提高幅度最大的是<0.053 mm，增幅为41.04% ~ 117.3%，>2 mm和0.25 ~ 2 mm粒级团聚体提高的幅度比较小。

秸秆与生物质炭还田对土壤团聚体有机碳的贡献率的影响如表4所示，各处理对土壤团聚体有机碳贡献率主要分布在0.25 ~ 2 mm和<0.053 mm粒级团聚体中，而对>2 mm和0.053 ~ 0.25 mm粒级团聚体有机碳贡献率较小。与CK相比，CS处理显著提高了>2 mm粒级团聚体有机碳贡献率，达到了53.53%，其他各处理对>2 mm粒级团聚体有机碳贡献率影响不显著。各处理对<0.053 mm粒级团聚体有机碳贡献率均有所提高，表现为0.5BC>CS+BC>0.5CS>BC>CS，



注：小写字母不同表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Note: Different lowercase letters above the column indicate that significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图1 不同处理对土壤总有机碳的影响

Fig. 1 Effects of the treatments on soil total organic carbon

表3 不同处理对土壤团聚体有机碳的影响

Table 3 Effects of the treatments on soil aggregate organic carbon

处理 Treatment	团聚体有机碳含量 Organic carbon content of aggregates/(g·kg ⁻¹)			
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
CK	13.16 ± 0.5b	15.83 ± 1.20c	7.52 ± 0.42b	12.16 ± 1.54c
CS	15.70 ± 2.70ab	16.30 ± 0.90bc	8.58 ± 0.40b	19.47 ± 3.43b
BC	17.43 ± 3.78a	20.32 ± 0.99a	12.12 ± 2.60a	21.20 ± 6.71ab
CS+BC	16.30 ± 0.97ab	17.33 ± 0.36b	9.63 ± 0.03b	26.42 ± 2.34a
0.5BC	14.17 ± 0.11ab	16.40 ± 0.09bc	9.23 ± 0.03b	17.79 ± 0.01bc
0.5CS	12.65 ± 0.14b	17.36 ± 0.06b	8.93 ± 0.04b	17.15 ± 0.13bc

其中CS+BC、0.5BC处理分别较CK显著提高了26.20%、48.63%。与CK相比，除BC处理提高了0.053 ~ 0.25 mm粒级团聚体有机碳贡献率外，其他处理均降低了该粒级团聚体有机碳贡献率。

表4 不同处理对土壤团聚体有机碳的贡献率

Table 4 Contribution rate of soil aggregates by fraction to soil organic carbon relative to treatment

处理 Treatment	团聚体有机碳相对贡献率 Relative contribution rate of soil aggregates to soil organic carbon /%			
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
CK	11.60 ± 5.90b	35.32 ± 4.72a	21.74 ± 2.48a	31.34 ± 7.24c
CS	17.81 ± 2.68a	28.88 ± 3.50a	21.41 ± 3.27a	31.90 ± 3.72c
BC	10.67 ± 1.86b	32.81 ± 7.56a	23.79 ± 4.61a	32.73 ± 4.79bc
CS+BC	9.25 ± 1.37b	30.85 ± 0.82a	20.35 ± 2.63a	39.55 ± 0.40b
0.5BC	6.99 ± 0.04b	28.02 ± 0.10a	18.41 ± 0.02a	46.58 ± 0.24a
0.5CS	11.04 ± 0.15b	34.10 ± 0.10a	19.94 ± 0.26a	34.92 ± 0.20bc

2.4 生物质炭与秸秆配施对作物产量的影响

从表5可以看出秸秆与生物质炭还田可以明显提高作物产量。除0.5BC处理,各处理均能提高玉米和油菜的生物产量。各处理的玉米经济产量大小依次为BC>CS>CS+BC>CK>0.5CS>0.5BC,与CK(8.42 t·hm⁻²)相比,BC、CS、CS+BC处

理分别提高了2.38%、2.14%、1.43%。与CK处理相比,CS、0.5CS处理的油菜经济产量均提高了5.59%,达到了显著水平;CS+BC、BC处理分别提高了4.47%、3.35%,但不显著。可以看出,与常规施肥相比,秸秆与生物质炭还田均能提高作物产量。

表5 不同处理对作物产量的影响

Table 5 Effects of the treatments on crop yield

作物 Crop	处理 Treatment	穗轴/角壳干重 Cob/ rape pod shell dry weight/(t·hm ⁻²)	茎叶干重 Stems and leaves dry weight/(t·hm ⁻²)	籽粒干重 Grain dry weight/(t·hm ⁻²)
玉米 Maize	CK	2.19 ± 0.07a	10.18 ± 0.39c	8.42 ± 0.26ab
	CS	2.24 ± 0.02a	11.35 ± 0.25b	8.60 ± 0.08a
	BC	2.24 ± 0.09a	11.04 ± 0.08b	8.62 ± 0.36a
	CS+BC	2.22 ± 0.09a	11.28 ± 0.33b	8.54 ± 0.33ab
	0.5CS	2.25 ± 0.09a	10.40 ± 0.25c	8.34 ± 0.05ab
	0.5BC	2.09 ± 0.19a	12.14 ± 0.03a	8.12 ± 0.08b
油菜 Rape	CK	3.78 ± 0.19b	5.78 ± 0.26b	1.79 ± 0.02b
	CS	5.85 ± 0.26a	6.50 ± 0.32a	1.89 ± 0.06a
	BC	5.61 ± 0.28a	6.29 ± 0.32ab	1.85 ± 0.05ab
	CS+BC	5.98 ± 0.12a	6.92 ± 0.15a	1.87 ± 0.07ab
	0.5CS	5.80 ± 0.25a	6.62 ± 0.64a	1.89 ± 0.05a
	0.5BC	4.05 ± 0.44b	4.35 ± 0.31c	1.60 ± 0.03c

3 讨论

3.1 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体分布和稳定性的影响

通常用>0.25 mm水稳定性团聚体的数量来判断土壤结构的好坏,其含量越高,表明土壤结构越好^[13]。本研究表明,较对照CK而言,秸秆全量还田(CS)处理能显著提高土壤中>2 mm粒级团聚体含量,且降低<0.053 mm粒级团聚体的含量。这与关松等^[14]的研究结果一致。这是因为秸秆作为新鲜有机残茬施入土壤会释放养分,提高土壤中微生物的活性且促进土壤中真菌菌丝的生长和微生物的分泌液^[13],微生物分解产生的有机酸、腐殖物质和秸秆中的多糖、木质素等这些土壤中重要的有机胶结物质与菌丝发生缠绕作用将土壤小颗粒胶结成微团聚体,进一步胶结成大团聚体^[15]。但本研究中生物质炭处理(BC)却未能显著提高土壤中>0.25 mm粒级水稳性团聚体的含

量和土壤MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 的值,生物质炭减半处理(0.5BC)处理甚至降低了大团聚体的含量和土壤MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 的值。虽然生物质炭本身作为胶结物质能将较小粒级的团聚体胶结成大团聚体,且其表面具有的特殊理化性质(CEC、巨大比表面积等)如同土壤黏粒一样吸附微生物,促进团聚体形成^[16]。但是与秸秆不同,生物质炭是在高温条件下制备的(本研究中为500℃),属惰性固体材料,具有高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构,较秸秆难以被微生物分解利用^[17];还可能是生物质炭由于自身分解能力小,在施入土壤初期并不能产生足够多的团聚体胶结黏液,因此对大团聚体的结合能力并不显著^[10]。所以生物质炭对提高土壤团聚体含量方面没有秸秆效果好。但李江舟等^[18]的研究则表明,不同用量的生物质炭处理(B15、B30)的土壤团聚体MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 的值较常规施肥处理显著增加。这主要是由于土壤类型和生物质炭施用水平等条件的差异^[19],以及生物质炭

制备的原料、温度、培养时间的不同^[20]，会使不同来源的生物质炭处理对团聚体稳定性影响效果不同。单施秸秆、生物质炭处理中，随施用量增加土壤团聚体稳定性也逐渐增加，这可能是因为土壤有机物增加对土壤微生物活性有激活作用，达到提高微生物生物量的作用，进而分泌更多的土壤胶结物促进大团聚体形成^[21]。目前关于秸秆与生物质炭配施的研究很少，其中侯晓娜等^[11]研究表明秸秆与生物质炭配施处理较对照能显著提高1~2 mm粒级团聚体含量；本研究中的秸秆与生物质炭配施处理较CK显著提高了0.25~2 mm粒级团聚体含量，且秸秆与生物质炭配施处理的 $R_{0.25}$ 提高了14.47%。这是因为秸秆与生物质炭结合施入土壤中，不仅有秸秆这种新鲜有机物料能促进土壤真菌菌丝生长和微生物分泌的胶结物质，还有生物质炭其本身就可以作为土壤胶结物质，这些均可以将小粒级团聚体胶结成大团聚体，从而有利于大团聚体的形成，因此秸秆与生物质炭配施较生物质炭单独施用能显著提高大团聚体含量，改善土壤结构。

3.2 生物质炭与秸秆配施对紫色土总有机碳以及团聚体有机碳分配的影响

秸秆还田后经过分解可以提高土壤总有机碳含量，减少土壤有机碳矿化分解^[22]。而生物质炭本身含碳量非常高，施入农田土壤后，不仅可以促进腐殖酸、富里酸等土壤腐殖质的形成，而且有助于土壤中碳水化合物、酯族、芳烃等有机大分子的形成，从而提高土壤有机碳含量^[23]。本研究中，各处理较CK均能提高土壤总有机碳含量。一方面，有机碳作为团聚体重要的胶结物，有利于土壤中矿物和黏粒胶结形成水稳性大团聚体，这符合本研究中各处理（除0.5BC处理）均能提高土壤>2 mm粒级团聚体含量和各项稳定性指标。另一方面，土壤有机碳是土壤肥力和作物产量高低的决定性因子。随着秸秆、生物质炭还田，本研究各处理（除0.5BC处理）的玉米和油菜的生物产量和经济产量也均有所增加，尤其是秸秆全量还田、单施生物质炭及秸秆与生物质炭配施处理效果比较明显，这与邱建军等^[24]的模拟研究结果类似，即在常规施肥的条件下，全国各地均存在通过提高耕地有机碳含量增加产量的潜力。其中本研究中生物质炭处理（BC）和秸秆与生物质炭配施处理较对照分别显著提高了

45.55%、44.45%（ $P<0.05$ ），效果较单施秸秆处理显著，这与侯晓娜等^[11]研究结果一致。这是因为一方面生物质炭其自身稳定性较高，难以被土壤微生物降解利用，且能降低土壤呼吸^[25]。另一方面生物质炭自身的孔隙结构和大的比表面积，能将土壤有机碳吸附在其表面或孔隙内，降低有机碳的生物活性或起到一定的隔离作用，这都会抑制土壤中被吸附的有机碳的分解^[26]。而秸秆会促进土壤脱氢酶活性和土壤 β -糖苷酶活性，加强土壤的呼吸作用，导致土壤碳素的损失^[25]，因此秸秆与生物质炭配施处理的土壤总有机碳含量高于单施生物质炭处理。

团聚体是土壤有机碳的重要储存场所。安艳等^[27]研究表明，土壤中添加生物质炭可以显著提高团聚体中有机碳含量，且随着施用量的增加而增加。本研究也发现，生物质炭处理较对照显著提高团聚体中有机碳含量，且随着施用量的增加，有机碳含量呈增加趋势，单施秸秆、秸秆与生物质炭配施同样能提高团聚体中有机碳含量，但效果没有生物质炭显著。这是因为生物质炭和秸秆这两种有机物料作为外加碳源，还田后能提高土壤碳库。本研究中，有机碳主要分布在>0.25 mm和<0.053 mm粒级团聚体中，而粒径为0.053~0.25 mm中有机碳含量分布最少，这与Huang等^[28]研究结果一致。主要原因是有机碳本身作为胶结物质能将0.053~0.25 mm粒级团聚体胶结成大团聚体，同时大团聚体中一般较其他粒级团聚体含有较多的菌丝，而处于分解状态的菌丝可以提高大团聚体中有机碳浓度^[29]，因此>0.25 mm粒级团聚体中的有机碳含量较高。此外，<0.053 mm粒级团聚体中分布较多的<0.2 μm 孔径孔隙，其孔隙小于细菌所能通过的限度（3 μm ），使该粒级有利于胡敏酸的形成和积累^[30]，从而增加了<0.053 mm粒级团聚体有机碳含量。但是由于大团聚体有机碳易受耕作方式等外界因素的影响，而粉粘粒包裹的有机碳受到了更强的物理保护，不易受到外界的影响^[31]。所以本研究得出<0.053 mm粒级团聚体有机碳含量提高幅度最大，而>2 mm粒级团聚体提高幅度最小。

刘满强等^[30]研究指出<0.053 mm粒级团聚体中粉粒和黏粒具有较大的比表面积和表面电荷，能够与有机碳紧密结合形成极为稳定的有机-无机复合体，因此该粒级的团聚体有机碳极为稳定。本研究

中<0.053 mm粒级团聚体有机碳贡献率相对较高,其贡献率为31.34%~46.58%,其次为0.25~2 mm,而>2 mm粒级团聚体有机碳贡献率较低。一方面是由于粉黏粒对有机碳库有较好的保护,另一方面是因为团聚体有机碳贡献率实际上是团聚体比例和团聚体有机碳含量共同决定的。虽然>2 mm粒级团聚体有机碳含量相对较高,但是该粒级团聚体所占比例较少。而<0.053 mm粒级团聚体不仅有机碳含量相对较高,其团聚体含量也相对较高,所以其团聚体有机碳贡献率相对较高。新鲜有机质如秸秆进入土壤时,碳元素更倾向于或优先被大团聚体所固定^[32],因此本试验条件下单施秸秆处理能显著提高>2 mm粒级团聚体有机碳贡献率,而其他粒级团聚体有机碳贡献率较对照均有所下降,这与孙汉印等^[33]研究结果一致。

4 结论

单施秸秆对紫色土团聚体稳定性有较大的改善作用,但并未对土壤碳水平的提升有显著的影响,相反,单施生物质炭对紫色土总有机碳和各粒级团聚体有机碳含量均有显著提高,但对土壤团聚体稳定性影响较小,且单施秸秆和生物质炭均随着施用量的增加,效果越好。此外,单施秸秆和单施生物质炭均能有效提高玉米和油菜的生物产量和经济产量。秸秆与生物质炭配施不仅对紫色土团聚体稳定性方面有明显的改善作用,且能显著提高土壤有机碳和各粒级团聚体中有机碳含量,同时能有效提高玉米和油菜的生物产量和经济产量。综合考虑,秸秆与生物质炭配施显著提高了水稳性大团聚体含量、土壤有机碳和团聚体有机碳含量,这不仅是增强紫色土抗侵蚀能力的重要途径,也是提升土壤碳水平的较佳培肥措施。

参考文献

- [1] Yin Y, Liang C H, Pei Z J. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China. *Catena*, 2015, 131: 412—419
- [2] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1149—1157
- Liu Z L, Yu W T, Zhou H, et al. Effects of different organic manure inputs on organic carbon fractions in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1149—1157
- [3] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralization C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, 2004, 120 (3/4): 273—282
- [4] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展. *土壤通报*, 2017, 48 (6): 1523—1529
- Xu X R, Wang J K. Research progress on stable mechanism of soil aggregates and organic carbon (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (6): 1523—1529
- [5] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035—1041
- Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Effects of different fertilization treatments on the distribution of soil water-stable aggregates and organic carbon (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (4): 1035—1041
- [6] 王秀娟, 解占军, 董环, 等. 秸秆还田对玉米产量和土壤团聚体组成及有机碳分布的影响. *玉米科学*, 2018, 26 (1): 108—115
- Wang X J, Xie Z J, Dong H, et al. Effect of straw returning on maize yield, soil aggregate composition and organic carbon distribution (In Chinese). *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26 (1): 108—115
- [7] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 828—838
- Mao X L, Lu K P, He L Z, et al. Effect of long-term fertilization on distribution of soil aggregates and organic carbon in paddy soil in Zhejiang Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 828—838
- [8] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响. *中国农业科学*, 2012, 45 (8): 1513—1520
- Zhang P, Jia Z K, Wang W, et al. Effect of straw returning on soil aggregate characteristics in semi-arid area of Ningnan (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (8): 1513—1520
- [9] 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. *土壤通报*, 2013, 44 (6): 1379—1384
- Fu L L, Lin H H, Li L Q, et al. Effect of biochar on persistence of soil organic carbon in rice fields (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (6): 1379—1384
- [10] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物质黑炭对红壤

- 结构稳定性的影响. 土壤, 2012, 44 (1): 62—66
- Ye L L, Wang C H, Zhou H, et al. The effect of adding biomass black charcoal on the structural stability of red soil (In Chinese). Soils, 2012, 44 (1): 62—66
- [11] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响. 中国农业科学, 2015, 48 (4): 705—712
- Hou X N, Li H, Zhu L B, et al. Effects of biochar and straw addition on aggregate composition and organic carbon distribution in sand ginger black soil (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (4): 705—712
- [12] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3): 627—633
- [13] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota Prairie Ustolls and Usterts. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (4): 1360—1365
- [14] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响. 水土保持学报, 2010, 24 (4): 187—191
- Guan S, Dou S, Hu Y Z, et al. Effect of corn straw on the distribution of carbon and nitrogen in black soil aggregates (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (4): 187—191
- [15] Sodhi G P, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. Soil & Tillage Research, 2009, 103 (2): 412—418
- [16] 姬强. 不同耕作措施和外源碳输入对土壤结构和有机碳库的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- Ji Q. Effects of different tillage measures and external carbon inputs on soil structure and organic carbon pools (In Chinese). Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2016
- [17] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其CO₂释放的影响. 环境科学, 2014, 35 (1): 93—99
- Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, et al. Effects of rice straw biochar on soil organic carbon and CO₂ release in farmland (In Chinese). Environmental Science, 2014, 35 (1): 93—99
- [18] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响. 环境科学学报, 2016, 36 (6): 2114—2120
- Li J Z, Dai K, Zhang L M, et al. Effects of biochar application on aggregate composition and organic carbon distribution in red soil of Yunnan tobacco-growing areas (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (6): 2114—2120
- [19] Busscher W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. Soil Science, 2010, 175 (1): 10—14
- [20] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. Soil & Tillage Research, 2011, 112 (2): 159—166
- [21] Deneff K, Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. European Journal of Soil Science, 2005, 56 (4): 469—479
- [22] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30 (12): 2518—2525
- Zhang P, Li H, Jia Z K, et al. Effect of straw returning on soil organic carbon content and soil carbon mineralization in the arid region of Ningnan (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (12): 2518—2525
- [23] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究. 生态环境学报, 2012, 21 (11): 1795—1799
- Hua L, Jin S S, Luo J J. Effects of biochar input on soil microdomain characteristics and soil humus (In Chinese). Ecology and Environment, 2012, 21 (11): 1795—1799
- [24] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究. 中国农业科学, 2009, 42 (1): 154—161
- Qiu J J, Wang L G, Li H, et al. Simulation study on effect of soil organic carbon content on crop yield in farmland (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42 (1): 154—161
- [25] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应. 环境科学, 2017, 38 (7): 2988—2999
- Tian D, Gao M, Huang R, et al. The response of soil respiration and heterotrophic respiration in rapeseed/corn rotation field to straw and biochar returning (In Chinese). Environmental Science, 2017, 38 (7): 2988—2999

- [26] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (6) : 1169—1179
- [27] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响. *环境科学*, 2016, 37 (1) : 293—300
An Y, Ji Q, Zhao S X, et al. The effect of biochar on the distribution and water retention of orchard soil aggregates (In Chinese). *Environmental Science*, 2016, 37 (1) : 293—300
- [28] Huang R, Lan M, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: The role of different straws returning. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24 (36) : 27942—27952
- [29] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (14) : 2099—2103
- [30] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. *生态学报*, 2007, 27 (6) : 2642—2650
Liu M Q, Hu F, Chen X Y. Advances in research on the mechanism of soil organic carbon stabilization (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6) : 2642—2650
- [31] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79 (1) : 7—31
- [32] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28 (4/5) : 665—676
- [33] 孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (2) : 369—376
Sun H Y, Ji Q, Wang Y, et al. The effect of organic carbon distribution in water-stable aggregates and their oxidative stability under different straw return patterns (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (2) : 369—376

Effect of Combined Application of Biochar and Straw on Organic Carbon Content in Purple Soil Aggregates

WANG Fuhua HUANG Rong GAO Ming[†] WANG Zifang TIAN Dong
(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract 【Objective】 Purple soil is weak in erosion resistance, and its soil aggregates are also vulnerable in structure. This study was oriented to explore how to reasonably utilize organic material resources, like crop straw, and improve structure of the purple soil, and how organic carbon is distributed in soil aggregates of the purple soil in the Sichuan Basin. 【Method】 A tract of farmland under the rape/maize rotation ecosystem was selected for an in-situ field experiment to explore effects of application of chemical fertilizer coupled with biochar and/or crop straw on content and stability of soil aggregates and soil organic carbon of the purple soil and distribution of organic carbon in aggregates by fraction. The experiment was designed to have control (CK) and 5 treatments, that is, CK (application of chemical fertilizer only), BC (application of chemical fertilizer + 8 000 kg·hm⁻² biochar), CS (application of chemical fertilizer + 8 000 kg·hm⁻² straw), 0.5BC (application of chemical fertilizer + 4 000 kg·hm⁻² biochar), 0.5CS (application of chemical fertilizer + 4 000 kg·hm⁻² straw) and BC+CS (application of chemical fertilizer + 4 000 kg·hm⁻² biochar and 4 000 kg·hm⁻² straw). 【Result】 Results show: (1) compared with the control (CK), all the treatments, except for Treatment 0.5BC, increased the content of >2 mm aggregates, while reducing the content of <0.053 mm aggregates. They also increased mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the water-stable soil aggregates and content of the >0.25 mm aggregates ($R_{0.25}$), with

Treatment CS, in particular, where the effects became more significant with rising straw application rate. Treatment CS+BC significantly increased the content of 0.25 ~ 2 mm water-stable aggregates. (2) Except for Treatment CS, all the treatments significantly increased the content of total soil organic carbon as compared with CK. Among them, Treatment BC and CS+BC treatment did by 45.55% and by 44.45%, respectively ($P < 0.05$), and the effect of Treatment CS was not so significant. With rising biochar application rate, the content of total organic carbon in the soil increased correspondingly. The increase was especially significant in < 0.053 mm and > 2 mm fractions of soil aggregates; Compared with other treatments, Treatment BC increased the content of organic carbon in all soil aggregates in the soil, regardless of size fraction, and followed by Treatment CS+BC in this effect. (3) By calculating contribution rate of each fraction of aggregates to total organic carbon in the soil, it was found out that the effects of the treatments increasing contribution of soil aggregates to total organic carbon in the soil were the most significantly reflected in the 0.25 ~ 2 mm and < 0.053 mm fractions of soil aggregates. However, Treatment CS was the only one that significantly increased the organic carbon contribution rate of the > 2 mm fraction of soil aggregates, or by 53.53% as compared with CK, and Treatment CS+BC and 0.5BC increased the rate of the < 0.053 mm fraction of aggregates by 26.20% and 48.63%, respectively. (4) Application of straw and/or biochar increased the biomass and economic yield of maize and rapeseed, especially Treatments CS, BC, and CS+BC in the experiment. 【 Conclusion 】 Combined application of straw and/or biochar with chemical fertilizer is an effective practice to improve structure of and increase carbon content in the purple soil.

Key words Biochar; Straw; Aggregate stability; Organic carbon; Contribution rate of organic carbon

(责任编辑：卢萍)