

doi: 10.11838/sfsc.20180315

秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响

乔丹丹¹, 吴名字¹, 张倩¹, 韩燕来^{1,2}, 张毅博¹, 李培培¹, 李慧^{1*}

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002;

2. 河南省粮食作物协同创新中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 探明生物炭、秸秆和化肥配施对黄褐土条件下土壤团聚体的影响, 为降低黄淮海平原黄褐土生产障碍, 建立合理培肥制度提供参考。本研究通过3年定位试验, 设置了不同的施肥制度: 对照为不施肥(CK)、施用化肥(NPK)、生物炭配施化肥(NPKB)、秸秆配施化肥(NPKS)、生物炭和秸秆配施化肥(NPKSB)5个处理。对不同处理条件下湿筛的土壤团聚体指标进行了分析。结果表明: 施用有机物料后, 能增加大粒级土壤团聚体含量, 提升土壤团聚体稳定性, 提高土壤有机质含量。稳定性的提升幅度次序为 NPKS > NPKSB > NPKB。在试验期内, 添加生物炭能逐年提升土壤有机碳含量, 顺序为 NPKSB > NPKB。在所有施肥处理中, NPKSB 对提升大粒级团聚体有机碳贡献率效果最好。在本研究设置处理中, NPKSB 对提升土壤团聚体基本性能效果最好。

关键词: 生物炭; 秸秆; 黄褐土; 土壤团聚体; 土壤有机碳

中图分类号: S152.4; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257(2018)03-0092-08

土壤有机碳的增加对土壤肥力提升有积极的影响, 而且对调节土壤质量及土壤功能有积极作用^[1]。土壤团聚体由土壤颗粒和有机无机胶结物质结合而形成^[2], 对储存土壤养分和形成土壤孔隙都具有积极作用^[3]。土壤团聚体和土壤有机碳是相互依存的, 土壤有机碳作为形成土壤团聚体的主要胶结物质^[4], 其含量增加有利于土壤团粒结构的改善^[5]; 土壤团聚体能有效保护土壤有机碳, 避免其发生矿化^[6-7]。

黄褐土作为河南省主要耕作土壤类型之一, 其占地面积仅次于潮土^[8]。然而, 黄褐土土质较为粘重, 透水性能较差, 耕作较为困难, 是该地区典型障碍土壤之一。目前, 主要通过农艺措施对黄褐土土壤理化性质进行改良, 从而达到改善耕作性能, 提升土壤肥力的目的, 如: 有机肥代替化肥、秸秆还田等^[9]。秸秆和生物炭的配施对土壤团聚体分布及其有机碳分配的作用已经引起了人们广泛的关

注。秸秆还田后经微生物分解产生碳水化合物等, 对大团聚体的形成及团聚体稳定性的提高均有积极影响^[10]。生物炭作为土壤改良剂施入土壤后, 不仅可以增加其养分含量^[11-12], 而且对促进植物根系的生长及微生物的繁殖均有积极作用, 同时对形成大团聚体及增加有机碳的含量均有积极效果^[13]。如: 生物炭配施秸秆能促进砂姜黑土大团聚体的形成, 提高团聚体稳定性, 并可增加砂姜黑土中有机碳的含量^[14]; 紫色土条件下^[15], 秸秆还田对形成土壤大团聚体效果优于生物炭还田, 但是, 生物炭对提高团聚体中有机碳含量的效果比秸秆还田好; 生物炭和秸秆还田不仅能显著提升粉质粘壤土大团聚体含量及稳定性^[16], 还能增加红壤大团聚体的含量及显著提高其稳定性^[17]。然而, 生物炭和秸秆及化肥的配施对黄褐土团聚体的组成及其有机碳的分配研究鲜有报道。因此, 本试验将研究生物炭、秸秆、化肥的配施对黄褐土团聚体组成及有机碳含量的影响, 以期阐明有机物料配施的最佳施用方式, 达到对黄褐土改良的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地状况与供试土壤

试验在河南省南阳市方城县赵河镇的农业示范园区(33°08' N, 112°58' E)进行, 该地为亚热带

收稿日期: 2017-12-12; 最后修订日期: 2018-01-28

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(17A210021); 河南省科技攻关计划项目(172102110057); 河南农业大学科研启动经费(30500593)。

作者简介: 乔丹丹(1991-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 研究方向为土壤培肥改良。E-mail: 15938773229@139.com。

通讯作者: 李慧, E-mail: lihui4007@163.com。

大陆性气候,年平均降水量在 800 ~ 1 200 mm,年平均温度 15 ℃。供试土壤属于黄褐土,质地较粘重。

表 1 供试土壤基本理化性质

碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	pH 值	容重 (g/cm ³)
137.86	41.68	87.3	18.32	5.82	1.34

本试验施用的生物炭以作物秸秆为原材料,有机碳为 558.16 g/kg,氮含量忽略不计,磷含量 157 g/kg,钾含量 928 g/kg,比表面积为 11.08 m²/kg,CEC 为 9.54 cmol/kg,pH 值是 9.16。玉米秸秆为本试验田正常施肥处理的秸秆,有机碳含量为 432 g/kg,氮含量为 7.0 g/kg。

1.2 试验设计

本试验设 5 个处理,分别为:空白对照 (CK),施用化肥 (NPK: N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 75 kg/hm²),生物炭配施化肥 (NPKB: N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 75 kg/hm², 生物炭 4 500 kg/hm²),秸秆配施化肥 (NPKS: N 117 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 75 kg/hm², 秸秆 9 000 kg/hm²),生物炭和秸秆配施化肥 (NPKSB: N 117 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 75 kg/hm², 秸秆 9 000 kg/hm², 生物炭 4 500 kg/hm²),确保各施肥处理间总施氮量相同,作物收获后其秸秆全部移出小区。试验采取随机区组排列,每个处理重复 3 次,小区面积为 40 m²。

供试肥料:尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%)、氯化钾 (K₂O 50%)。当季所用的磷肥、钾肥、生物炭和玉米秸秆 (切碎成 3 ~ 5 cm 的小段),在耕作前一次性基施,氮肥基追比为 1:1,拔节期开沟施肥。

试验周期是 2014 年 6 月 ~ 2016 年 6 月。供试小麦品种为郑麦 9023。

1.3 样品采集与测定方法

采集小区内 0 ~ 20 cm 的土样,每个小区均随机选取 5 个样点取样,然后混合均匀,自然风干后测定土壤团聚体和有机碳。

土壤有机碳的测定按常规方法进行。土壤团聚体的测定为湿筛法。具体操作如下:首先把土样放于团聚体套筛顶部 (其套筛孔径的大小为 0.053、0.25、0.5 和 1.0 mm),将水缓慢的沿桶壁加入,润湿、浸泡 20 min,后竖直震荡 20 min。振荡完毕

后,收集每级筛层的土壤团聚体,每级团聚体分别转移至铝盒中,烘干后至恒重,最后,计算每级团聚体的质量分数 (进行均一化处理) 和测定每级筛层团聚体中有机碳含量。

1.4 有关指标的计算

团聚体的稳定性采用平均重量直径 (*MWD*)、几何平均直径 (*GMD*) 和大于 0.25 mm 团聚体含量 (*R*_{0.25}) 来描述,各粒级团聚体有机碳含量及有机碳贡献率按以下公式计算。

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i) \quad (1)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

$$\text{各粒级团聚体有机碳贡献率} = \frac{\text{各粒级团聚体有机碳含量} \times 100}{\text{耕层土壤总有机碳}} \quad (4)$$

其中 $\bar{x}_i$ 为 *i* 粒级团聚体的平均直径, w_i 为 *i* 粒级团聚体重量所占的比例, m_i 是土壤不同粒级团聚体的重量, M_T 是团聚体总重量。

1.5 数据处理与分析

分别采用 SPSS 19.0 和 Origin 2015 进行数据处理与作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭、秸秆与化肥配施对黄褐土团聚体分布的影响

黄褐土团聚体分布的大至规律:含量最高的是粒级 < 0.053 mm 团聚体,含量第二的是粒级 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体,而粒级 > 1 mm 团聚体最低。

对 2014 和 2016 年数据分析得出,与 CK 相比,施肥显著提高了粒级 > 1 mm 的团聚体含量,降低了粒级 < 0.053 mm 团聚体含量;并且, NPKSB 处理在兼顾以上效果的同时,对粒级 1 ~ 0.5 mm 团聚体含量的提高效果较优。但是,2015 年添加有机物料的处理 (NPKB、NPKS、NPKSB) 对粒级 0.5 ~ 0.25 mm 团聚体含量的增加有显著影响,总体上, NPKB 和 NPKSB 处理对土壤团聚体组成的优化呈逐年提升趋势。

对 2016 年试验数据进行 *T* 检验分析发现,与 NPK 处理相比, NPKB 处理显著降低了粒级 1 ~ 0.5 和 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体含量,增加了粒级 0.5 ~

0.25 和 <0.053 mm 团聚体含量。此外, NPKS 处理较 NPK 处理在显著降低了粒级 <0.053 mm 团聚体比例的同时, 显著提高了粒级 >1 mm 团聚体的百分含量 ($P<0.05$)。与 NPKB 相比, 配施秸秆的处理 (NPKS 和 NPKSB) 显著增加了粒级 >1 mm 团

聚体的百分含量, 增幅分别达 32.19% 和 17.63%, 同时显著降低了粒级 <0.053 mm 团聚体比例。与 NPKS 相比, 增施生物炭处理 (NPKSB) 在粒级 0.5 ~ 0.25 mm 团聚体的百分含量显著增加了 9.08%。

表 2 各处理土壤水稳性团聚体分布 (%)

年份	处理	团聚体粒级				
		>1 mm	1 ~0.5 mm	0.5 ~0.25 mm	0.25 ~0.053 mm	<0.053 mm
2014	CK	5.99c	20.32c	18.61d	27.60a	27.47a
	NPK	7.78b	21.38bc	20.11c	25.79b	24.94b
	NPKB	7.67b	21.94b	21.56bc	24.60c	24.23b
	NPKS	10.28a	23.37a	22.35b	22.34d	21.66c
	NPKSB	9.77a	23.87a	23.84a	21.92d	20.60c
2015	CK	7.11a	22.01bc	17.47b	24.30a	29.10a
	NPK	6.89a	26.51a	18.05b	24.51a	24.04b
	NPKB	6.05a	20.45c	23.22a	26.83a	23.45b
	NPKS	7.38a	22.84bc	21.82a	23.01a	24.95b
	NPKSB	5.06a	24.61ab	21.57a	25.26a	23.50b
2016	CK	6.53d	24.50ab	17.16c	23.96ab	27.85a
	NPK	8.40c	26.17a	18.59bc	25.90a	20.94c
	NPKB	8.17c	22.70b	21.52a	24.06ab	23.56b
	NPKS	10.80a	23.61b	20.60ab	21.40b	23.59b
	NPKSB	9.61b	23.10b	22.47a	23.07ab	21.75c

注: 同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 生物炭秸秆与化肥配施对黄褐土团聚体稳定性的影响

处理时间不同土壤团聚体的 *MWD*、*GMD* 和 $R_{0.25}$ 值变化如表 3 所示。总的来说, 生物炭、秸秆分别配施化肥均能提高土壤团聚体的 *MWD*、*GMD* 和 $R_{0.25}$ 值, 而且其值均随处理时间的增加呈现先下降后增高的趋向, 大体为“V”型。

对 2014 和 2016 年试验数据分析得出, 与 CK 相比, 施肥处理的土壤团聚体的 *MWD*、*GMD* 和 $R_{0.25}$

值都显著增加, 其中 NPKSB 增加效果最优, 其次是 NPKS 和 NPKB 处理。除此之外, NPKB 处理对团聚体稳定性的提升呈逐年上升趋势, 而 NPKS 和 NPKSB 处理则相对稳定。

将 2016 年试验数据经 *T* 检验发现, 与 NPK 相比, NPKB 处理则显著降低了团聚体的 *GMD*, 降幅是 8.00%。同时, NPKSB 处理较 NPKB 处理显著增长了团聚体的 *MWD*、*GMD* 和 $R_{0.25}$ 值, 增幅分别达到 7.14%、8.00%、5.35%。

表 3 不同处理土壤团聚体稳定性

处理	<i>MWD</i> (mm)			<i>GMD</i> (mm)			$R_{0.25}$ (%)		
	2014 年	2015 年	2016 年	2014 年	2015 年	2016 年	2014 年	2015 年	2016 年
CK	0.37c	0.39a	0.40c	0.21c	0.22b	0.23c	44.93e	46.59b	48.19b
NPK	0.40b	0.42a	0.44a	0.24b	0.25a	0.27a	49.27d	51.45a	53.17a
NPKB	0.41b	0.38a	0.42b	0.24b	0.23ab	0.25b	51.17c	49.72ab	52.38a
NPKS	0.46a	0.41a	0.46a	0.27a	0.24a	0.27a	56.00b	52.03a	55.01a
NPKSB	0.46a	0.39a	0.45a	0.28a	0.23ab	0.27a	57.48a	51.24a	55.18a

2.3 生物炭、秸秆与化肥配施对黄褐土总有机碳含量的影响及大团聚体与土壤有机碳的相关性分析

本研究土壤总有机碳的含量在 10.13 ~ 15.45 g/kg 之间,且随处理时间的增长,NPKB 和 NPKSB 处理有机碳含量持续增加,而 NPK 和 NPKS 处理则大体呈倒“V”型增长趋势。与 CK 对比,各施肥处理有机碳含量在这 3 年中都显著增长,增长幅度为 6.51% ~ 24.50%,其中以 NPKSB 处理在 2016 年提高增幅最大。

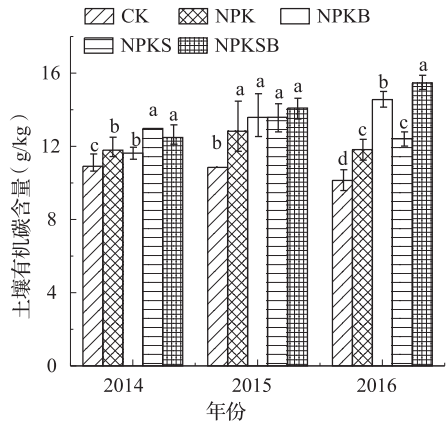


图1 2014~2016年不同处理对土壤有机碳的影响

对 2016 年试验数据进行 *T* 检验得出,NPKB 比 NPK 处理的有机碳含量显著增长了 23.20%; 与 NPKS 相比,NPKB 处理显著增长了土壤总有机碳含量。但是,与 NPKSB 相比,NPKB 处理的总有机碳含量显著降低,降幅达 6.18%。此外,与 NPKS 相比,NPKSB

处理显著增加了总有机碳含量,增幅达到 24.50%。而且,土壤大团聚体 (>0.25 mm) 含量的百分比与土壤有机碳的含量呈显著正相关 ($P<0.05$)。

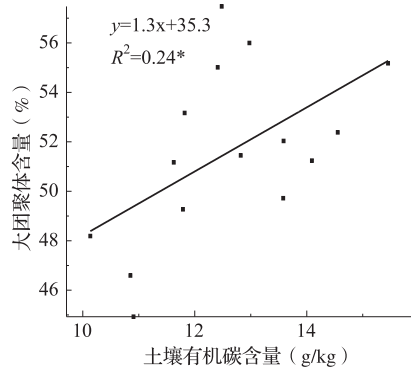


图2 大团聚体的百分比与有机碳含量的相关性分析

2.4 生物炭、秸秆与化肥配施对黄褐土团聚体有机碳含量及分配的影响

黄褐土土壤团聚体中的有机碳浓度变化如表 4 所示。团聚体有机碳浓度变化在 C 9.80 ~ 17.31 g/kg 之间,且同一处理土壤有机碳随土壤团聚体粒级的增大呈增加趋势。分析试验数据得出,与 CK 比较,2015 和 2016 年增施有机物料的处理(NPKB、NPKS、NPKSB)对粒级 >0.25 mm 团聚体各粒级有机碳浓度的增加效果显著。同时,NPKB 处理各粒级团聚体有机碳的含量随处理时间的增加而呈现稳定的升高。

表4 土壤各级团聚体中的有机碳含量 (C g/kg)

年份	处理	团聚体粒级				
		> 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm
2014	CK	13.19c	12.72b	10.99c	10.13b	9.80c
	NPK	13.82c	12.48b	11.70bc	11.45a	10.89ab
	NPKB	15.31b	12.59b	11.86abc	10.84ab	10.18bc
	NPKS	16.73a	14.21a	12.63ab	11.60a	11.64a
	NPKSB	16.26ab	14.03a	12.93a	10.91ab	10.05bc
2015	CK	13.19d	12.42b	11.82b	11.10b	10.29b
	NPK	14.90c	13.56b	12.51b	12.12ab	11.10ab
	NPKB	16.00b	15.24a	13.95a	12.47a	11.99a
	NPKS	16.92ab	15.71a	14.67a	13.11a	11.31ab
	NPKSB	17.31a	15.89a	14.02a	13.11a	11.71ab
2016	CK	13.06c	11.72c	11.32b	10.71c	9.84c
	NPK	14.91b	13.40b	12.38b	12.28b	11.00b
	NPKB	16.48a	15.41a	14.46a	13.11a	12.12ab
	NPKS	16.45a	14.71a	14.29a	12.78ab	11.72ab
	NPKSB	17.03a	15.80a	14.27a	13.23a	12.63a

2016 年数据进行 *T* 检验得出, 与 NPK 相比, NPKB 显著提高了 >0.053 mm 各粒级团聚体有机碳含量; 但 NPKS 比 NPK 在粒级 >1 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 两个水平的土壤团聚体有机碳含量显著增加, 增幅分别为 10.33% 和 15.43%。

黄褐土土壤团聚体各粒级有机碳的贡献率变化如表 5 所示。有机碳的分布主要在 1 ~ 0.5 mm 粒级土壤团聚体上, 其次是 0.25 ~ 0.053 和 <0.053 mm。对 2014 和 2016 年数据分析得出, 与 CK 相比, 生

物炭、秸秆与化肥配施 (NPKS 和 NPKSB) 的处理显著提高了粒级 >1 mm 团聚体有机碳的贡献率, 同时显著降低了粒级 <0.053 mm 团聚体有机碳贡献率。对 2016 年试验数据进行 *T* 检验得出, 与 NPKB 相比, NPKS 和 NPKSB 处理在粒级 >1 mm 团聚体有机碳贡献率均显著增加; 而与 NPKS 相比, NPKB 和 NPKSB 处理在粒级 1 ~ 0.5 和 <0.053 mm 团聚体有机碳贡献率均显著降低, 降幅达 3.51% ~ 25.49%。

表 5 各粒级团聚体有机碳的相对贡献率 (%)

年份	处理	团聚体粒级				
		>1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
2014	CK	7.25c	23.68bc	18.76c	25.64a	24.67a
	NPK	9.15bc	22.68c	19.99bc	25.08a	23.09ab
	NPKB	10.10b	23.76bc	21.99b	22.94b	21.21bc
	NPKS	13.29a	25.57ab	21.73b	19.97c	19.44c
	NPKSB	12.73a	26.83a	24.69a	19.16c	16.59d
2015	CK	8.63ab	25.15ab	19.03b	24.85a	27.50a
	NPK	8.03ab	27.98a	17.70b	23.20a	20.79b
	NPKB	7.12ab	23.01b	23.86a	24.65a	20.71b
	NPKS	9.14a	26.38ab	23.62a	22.23a	20.78b
	NPKSB	6.22b	27.71a	21.42ab	23.47a	19.47b
2016	CK	8.41c	28.31a	19.18b	25.24a	27.08a
	NPK	10.58b	29.70a	19.43b	26.89a	19.47bc
	NPKB	9.25c	24.02b	21.38ab	21.68b	19.61bc
	NPKS	14.31a	28.00a	23.80ab	22.01b	22.30b
	NPKSB	10.60b	23.59b	20.74ab	19.75b	17.77c

3 讨论

3.1 生物炭、秸秆与化肥配施对黄褐土团聚体分布及稳定性的影响

土壤大团聚体对土壤肥力提高有积极影响, 在前人研究中发现生物炭还田和秸秆还田均能促进土壤大团聚体形成^[18-19]。本研究发现, 生物炭与化肥配施能显著增加大团聚体 (>0.25 mm) 含量, 与水稻土条件下结果一致^[20]。原因有两方面, 一方面生物炭具有大比表面且空隙内含有大量有机分子, 施入土壤后有利于大团聚体形成^[21], 另一方面可能与生物炭中所含的芳香碳可以结合土壤中的黏土矿物有关^[22]。在本研究条件下, 秸秆配施化肥可以显著增加大粒级团聚体 (>1 mm) 含量,

这与秸秆还田后的转化特性有关。秸秆还田后在腐熟过程中产生如多糖、蛋白质等碳水化合物, 从而加强土壤微生物活性, 促进植物根系的活力和腐殖质形成, 高的根系活力^[23]及新产生的腐殖质对大团聚体形成有明显的正向作用^[24-27]。而在瘠土条件下的试验^[28]结果表明, 长期秸秆化肥配施对土壤团聚体组成没有积极的影响, 但有提高土壤大团聚体含量趋势。与本研究结果相比, 此差异与黄褐土的性质及两个试验秸秆还田量不同有关。生物炭、秸秆与化肥配施, 能够增加土壤大团聚体含量和其稳定性, 主要与生物炭和秸秆的直接作用及间接作用有关。直接作用主要表现为生物炭的多孔性有利于吸附秸秆分解过程中产生的有机小分子物质, 而这些有机小分子物质又是大团聚体形成必需

胶结物质的物质基础；同时生物炭相对稳定不易分解的特性，可使形成的团聚体相对稳定。间接作用主要表现为生物炭还田为植物根系生长提供良好的生长环境^[11]，秸秆还田为根系的生长提供丰富的养分，从而促进根系的生长与活力，而植物根系的连接与纠缠对大团聚体的形成有关键作用^[29]；此外，生物炭还田和秸秆还田为土壤中细菌和真菌提供营养物质，使其生长速率显著增加^[30]，从而使植物根系分泌物增加，以及土壤中有机胶结物质含量的增加，最终促进大团聚体的形成。也有研究发现，真菌菌丝则可直接将微团聚体胶结形成大团聚体^[27]。在本试验研究的施肥处理中，生物炭和秸秆配施化肥对促进形成粒级 $>0.25\text{ mm}$ 土壤团聚体的效果最优，与砂姜黑土条件下试验结果一致^[14]。

土壤团聚体的 MWD 、 GMD 和 $R_{0.25}$ 均是评价土壤质地结构的重要指标，也是评价团聚体稳定性的重要指标。外源新碳进入土壤后能增加土壤团聚体的稳定性，进而增加土壤肥力。在本研究试验条件下，施肥处理提升土壤团聚体的稳定性有如下顺序：秸秆与化肥配施（NPKS） $>$ 生物炭和秸秆与化肥配施（NPKSB） $>$ 生物炭与化肥配施（NPKB），其中 NPKB 的影响不显著。这是秸秆还田后通过微生物对其进行分解使土壤腐殖物质（土壤团聚体的胶结物质）含量增加，从而促进团聚体的稳定性提升，而生物炭含有大量芳香族物质，能抵抗微生物的分解，土壤团聚体缺少胶结物质使其稳定性降低。这与红壤条件下的试验结果相一致^[31]。在本研究中，秸秆配施化肥处理和秸秆生物炭配施化肥处理能加强土壤团聚体的稳定性，这与前述的还田秸秆的微生物降解产物增加导致土壤团聚体胶结物质增多，从而使土壤团聚体稳定性提升有关。

3.2 生物炭、秸秆与化肥配施对黄褐土及各粒级团聚体有机碳含量的影响

生物炭主要是由单环及多环芳香族化合物组成的，含碳量高，稳定性好，可以显著提高土壤有机碳的含量^[32]；秸秆还田后秸秆中的有机物质分解、释放，使土壤有机质含量显著提高^[33]。在本研究中与对照相比，化肥配施有机物料（NPKB、NPKS 和 NPKSB）均使土壤有机质含量提升。添加生物炭处理（NPKB 和 NPKSB）均能逐年提升土壤有机碳含量，且生物炭和秸秆与化肥配施处理提升幅度要稍大于生物炭配施化肥处理。这与生物炭

本身碳的稳定特性并叠加秸秆还田后易分解特性相关。但秸秆配施化肥处理（NPKS）的有机碳含量呈现不规律变化，与试验时段（2014 ~ 2016 年）内气候急剧变化相关，2015 年夏出现干旱高温，导致旱灾现象。

土壤有机碳是形成土壤团聚体重要的有机胶结物质，而土壤团聚体的形成过程也是有机碳重要的固定过程^[34]。本研究也发现，土壤有机碳与大团聚体的含量呈显著正相关。一般认为，有机碳浓度随团聚体粒级的增大而增加，有以下两种情形，一是微团聚体在有机胶结物质作用下形成大团聚体，从而使后者有机碳浓度升高，二是新加入的土壤有机物质先进入大粒级团聚体，从而使其有机碳含量增加。本研究中，大粒级团聚体中的有机碳含量均高于小粒级，与红壤条件下的研究结果一致^[35]；同时，施用有机物料后（NPKB、NPKS 和 NPKSB）大粒级团聚体中有机碳含量均高于 CK 和单施化肥（NPK）处理，这是因为新进入的外源碳主要集中在大团聚体上，这与黑土^[36]、紫色土^[15]和塍土^[37]试验条件下结果一致。同时，本试验研究还发现，3 年时间不同处理间土壤有机碳含量与土壤团聚体分布及稳定性的变化规律有一定相似性，说明土壤团聚体的分布及稳定性与团聚体有机碳的含量有一定的相关性^[9]。土壤团聚体有机碳的贡献率由团聚体组成和团聚体各粒级有机碳的含量共同决定。在本研究中，施肥处理（NPK、NPKB、NPKS 和 NPKSB）大粒级团聚体有机碳贡献率略高于微团聚体类，与紫色土试验条件下结果一致，但与旱地红壤试验条件下结果不一致。在施用有机物料处理中，秸秆与化肥配施提升大粒级团聚体有机碳贡献率的效果最好，与紫色土^[15]试验条件下结果一致。这可能是秸秆经微生物分解产生有机物质，而这些有机物质直接先进入大团聚体中^[38]。

4 结论

化肥配施有机物料处理（NPKB、NPKS 和 NPKSB）能提升土壤中大粒级团聚体含量，但各处理所对应的优势粒级不尽相同：生物炭化肥配施能显著增加粒级 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的百分含量，而秸秆化肥配施可以显著提高粒级 $>1\text{ mm}$ 团聚体的百分含量，生物炭和秸秆配施化肥能显著促进粒级 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的形成。

生物炭秸秆配施化肥处理对提升土壤团聚体的

稳定性有如下顺序: 秸秆与化肥配施 (NPKS) > 生物炭和秸秆与化肥配施 (NPKSB) > 生物炭与化肥配施 (NPKB), 但是, NPKB 对团聚体稳定性的影响不显著。

化肥配施有机物料处理 (NPKB、NPKS 和 NPKSB) 均能提升土壤有机碳含量。添加生物炭处理 (NPKB 和 NPKSB) 的土壤有机碳含量呈现逐年递增趋势, 且 NPKSB 提升幅度稍大于 NPKB。

施肥处理 (NPK、NPKB、NPKS 和 NPKSB) 大粒级团聚体 (>0.25 mm) 中的有机碳含量和有机碳贡献率高于小粒级团聚体, 且 NPKS 对增加大粒级团聚体有机碳贡献率效果最优。

参考文献:

- [1] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (15): 2995-3004.
- [2] 史振鑫, 吴景贵. 不同处理牛粪对黑土团聚体组成与稳定性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2013, (4): 10-15.
- [3] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (3): 415-421.
- [4] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil [J]. Geoderma, 2004, 120 (3-4): 273-282.
- [5] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (3): 809-816.
- [6] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 土壤团聚体对有机碳物理保护机制研究 [J]. 土壤与作物, 2015, 4 (2): 85-90.
- [7] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. 土壤学报, 2011, 48 (2): 412-418.
- [8] 郭正磊. 基于土壤发生分类的河南省农用地自然等别分析 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [9] 朱刘兵. 有机物料与化肥配施对黄褐土理化性状和小麦/玉米产量的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [10] Hansen V, Müllerstöver D, Munkholm L J, et al. The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: an incubation study [J]. Geoderma, 2016, 269: 99-107.
- [11] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30 (8): 1411-1421.
- [12] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (16): 3324-3333.
- [13] 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 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (6): 2114-2120.
- [14] 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 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (4): 705-712.
- [15] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 [J]. 环境科学, 2018, (1): 1-11.
- [16] Zhang M, Cheng G, Feng H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24 (11): 1-13.
- [17] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (12): 2333-2342.
- [18] Lenka N K, Lal R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system [J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 78-89.
- [19] Liu Z, Chen X, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil [J]. Catena, 2014, 123: 45-51.
- [20] 付琳琳. 生物炭施用下稻田土壤有机碳组分、腐殖质组分及团聚体特征研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [21] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (12): 2459-2463.
- [22] Abiven S, Hund A, Martinsen V, et al. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia [J]. Plant & Soil, 2015, 395 (1): 1-11.
- [23] 李海波, 韩晓增, 尤孟阳. 不同土地利用与施肥管理下黑土团聚体颗粒有机碳分配变化 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (1): 184-189.
- [24] Xu J M, Tang C, Chen Z L. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38 (3): 544-552.
- [25] Lynch J M, Bragg E. Microorganisms and soil aggregate stability [M]. // Advances in soil science. New York: Springer, 1985. 133-171.
- [26] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31 (2): 204-208.
- [27] 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 [J]. 水土保持学报, 2010, 24 (4): 187-191.
- [28] 李婕, 杨学云, 孙本华, 等. 不同土壤管理措施下土壤团聚体的大小分布及其稳定性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (2): 346-354.
- [29] 纪海石. 稻油轮作土壤中根系生物标志物的定量测定及其随品种及团聚体粒径的变化 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [30] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 45: 113-124.
- [31] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物黑炭对红壤结构稳定性的影响 [J]. 土壤, 2012, 44 (1): 62-66.
- [32] Zwieter L V, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar

- from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant & Soil*, 2010, 327 (1 - 2): 235 - 246.
- [33] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (5): 526 - 535.
- [34] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (2): 447 - 455.
- [35] 杨莹莹, 魏兆猛, 黄丽, 等. 不同修复措施下红壤水稳性团聚体中有机质分布特征 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26 (3): 154 - 158.
- [36] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (35): 263 - 269.
- [37] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (7): 1365 - 1373.
- [38] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律 [J]. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 534 - 539.

Effect of biochar and straw with chemical fertilizers on soil aggregate distribution and organic carbon content in yellow cinnamon soil

QIAO Dan-dan¹, WU Ming-yu¹, ZHANG Qian¹, HAN Yan-lai^{1,2}, ZHANG Yi-bo¹, LI Pei-pei¹, LI Hui^{1*} (1. College of Resource and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450002; 2. Collaborative Innovation Center of Food Crops in Henan, Zhengzhou Henan 450002)

Abstract: For increasing soil productivity and establishing the reasonable fertilization system on yellow-cinnamon soil at Huang huaihai Plain, five treatments with biochar, straw and chemical fertilizers on 3-year (2014 ~ 2016) field experiment were conducted to detect characteristics of the wet sieving soil aggregates, including no fertilizer control (CK), chemical fertilizers as N, P, K (NPK), biochar adding and the chemical fertilizers (NPKB), straw returning and the chemical fertilizers (NPKS), biochar adding and straw returning with the chemical fertilizers (NPKSB). The results indicated that the fertilization treatments with organic materials (including biochar adding and straw returning) improved content of the soil aggregate in classification of bigger one (> 0.25 mm), and the stability ratio, and content of soil organic matter. Promotion of the stability ratio was ordered in extent as NPKS $>$ NPKSB $>$ NPKB. In the period of experiment, adding biochar gradually enhanced the content of soil organic matter annually with the order: NPKSB $>$ NPKB, as well as NPKSB mostly advanced the contribution rate of organic matter in the soil organic matter with the classification of big one (> 0.25 mm). Therefore, in present study, the treatment of NPKSB performed the best on improving fundamental characteristic of the soil aggregates.

Key words: biochar; straw; yellow-cinnamon soil; soil aggregate; soil organic matter