

生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响^①孟祥天^{1,2}, 蒋瑀霁¹, 王晓玥¹, 孙波^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 生物质炭和秸秆还田是提高土壤有机碳含量和改良土壤团聚体结构的有效方法,但在长期尺度上生物质炭与秸秆还田改良土壤的效率仍不清楚。本研究针对中亚热带第四纪红黏土发育的红壤,基于等碳量不同碳源投入的5 a田间定位试验,包括对照、单施化肥、秸秆还田、秸秆-猪粪配施和生物质炭还田5个处理,采用干筛和湿筛法分析了不同施肥处理对土壤团聚体组成、稳定性和有机碳分布的影响。研究表明:施用等碳量的不同有机碳源5 a后显著增加了土壤有机碳含量,其增幅顺序为:生物质炭还田>秸秆-猪粪配施>秸秆还田。干筛法分析结果表明:与单施化肥处理相比,秸秆-猪粪配施和生物质炭还田处理显著增加>0.25 mm机械稳定性团聚体含量($R_{0.25}$)和平均重量直径(mean weight diameter, MWD);秸秆还田和生物质炭还田处理显著增加了0.25~2 mm团聚体对土壤有机碳的贡献率。湿筛法分析结果表明:与单施化肥处理相比,秸秆还田和秸秆-猪粪配施处理显著增加 $R_{0.25}$ 和MWD,但生物质炭还田处理和单施化肥处理相比差异不显著;秸秆还田和秸秆-猪粪配施处理显著降低团聚体破坏率(PAD),生物质炭还田处理显著增加了PAD;秸秆配施猪粪处理和秸秆还田处理显著增加了>2 mm团聚体对土壤有机碳的贡献率。总体上,秸秆配施猪粪协同提高团聚体有机碳含量和团聚体稳定性的作用比秸秆还田和生物质炭还田要强。

关键词: 秸秆还田; 生物质炭; 猪粪; 红壤团聚体; 有机碳

中图分类号: S156.6, S158.5 文献标识码: A

土壤团聚体是土壤结构的基本组成单元和土壤肥力的基础,也是评价土壤质量的重要指标^[1]。土壤团聚体的数量是反映土壤供储养分、持水性、通透性的重要指标,不同粒级的团聚体数量、分布及其性质是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理退化过程的重要指标之一^[2-3]。土壤有机碳是土壤团聚体形成的重要胶结物,土壤团聚体形成与土壤有机碳含量存在正相关关系^[4]。秸秆还田是提高我国农田表土有机碳含量的主要措施之一^[5],秸秆还田不仅能够改善土壤的养分状况,增加土壤有机碳含量,促进团聚体形成,同时也对土壤理化性质和肥力有着重要影响^[6]。王海霞等^[7]和崔荣美等^[8]研究秸秆还田对旱作土壤团聚体影响的结果表明,秸秆还田可以增加表层土壤>0.25 mm团聚体的含量,提高土壤有机质含量。孙汉印等^[9]对不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布研究表明,秸秆还田显著增加>2 mm和0.053~0.25 mm团聚体含量,而<0.053 mm微团聚体含量则明显降低,并且秸秆还田促进了大团聚体中有机碳的增加。

相比于秸秆还田,猪粪和秸秆配施还田不仅能调节秸秆碳氮比,还能对秸秆分解起正激发作用促进有机碳的积累。将秸秆在厌氧条件下低温热解成生物质炭(biochar)还田被认为是未来有效的秸秆处理方式之一。秸秆烧制成生物质炭的过程中,化学活性较高的含氧官能团大量减少,疏水性增强,碳化产生了更多的芳香结构,增加了生物质炭的稳定性^[10]。Lu等^[11]研究稻壳生物质炭对土壤团聚体形成的结果表明,生物质炭还田显著提高变性黏土2~5 mm和0.25~0.5 mm大团聚体含量。而Busscher等^[12]设置添加不同梯度生物质炭(5、10、20 g/kg)室内培养试验研究表明,添加生物质炭对土壤团聚体影响不显著。米会珍等^[13]进行旱作农田生物质炭添加的试验研究结果表明,使用生物质炭2 a后,表层土>0.25 mm水稳性大团聚体的含量呈增加趋势,且显著增加了不同粒级团聚体有机碳含量。目前,由于秸秆、猪粪和生物质炭等外源有机物种类繁多,其组成成分、碳源结构以及矿化分解的过程复杂,制约了对土壤中有机碳和团

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200300)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112)资助。

* 通讯作者(bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 孟祥天(1991—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。E-mail: 332725753@qq.com

聚体形成与转化的机理研究^[14]。

我国南方旱地红壤由于其特殊的成土过程,土壤黏粒含量和氧化铁、铝含量高,有机质含量较低,不利于土壤的团聚作用^[15-16],加之近年来人为影响,加速土壤退化,使红壤中土壤黏粒活性增强,无机胶结物减少和有机物质难于积累^[17],严重影响了土壤稳定性团聚体形成及其数量的积累。本研究选择第四纪红黏土发育的红壤,设置了等碳投入量的 3 种秸秆还田方式(秸秆还田、秸秆猪粪配施还田和秸秆生物质炭还田),综合研究土壤团聚体组成、稳定性以及有机碳含量和分布的变化特征,揭示不同外源碳投入对红壤团聚体形成与有机碳转化过程的影响,为红壤区

合理利用秸秆资源和提高红壤地力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验设置在江西省鹰潭市余江县中国科学院红壤生态实验站(116°55' E, 28°13' N),试验区属湿润的中亚热带季风气候,年均温 17.8℃,海拔 45.5 m,年均降水量 1 795 mm。田间试验从 2011 年开始,小区面积为 100 m²(20 m × 5 m)。供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤(黏化湿润富铁土),养分严重贫瘠,酸化严重^[18]。试验前表层土壤(0~20 cm)基本性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基础理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested soil

pH	质地	容重(g/cm ³)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	CEC(cmol/kg)
4.73	黏土	1.31	4.34	0.4	0.23	11.95	0.76	47.58	12.12

注: CEC 指土壤阳离子交换总量。

1.2 试验设计

试验供试玉米品种为苏玉 24 号。共设置 5 个施肥处理: 对照(CK): 不施肥; 单施化肥(N): 施氮磷钾化肥; 秸秆还田(NS): 施氮磷钾化肥, 玉米秸秆还田; 秸秆和猪粪配施(NSM): 施氮磷钾化肥, 玉米秸秆和猪粪按 9:1 的碳投入比配施; 生物质炭还田(NB): 施氮磷钾化肥, 玉米生物质炭还田。每个处理 3 次重复, 采用随机区组排列。

所有处理(除对照处理外)在播种前一次性施入尿素 N 150 kg/hm², 钙镁磷肥 P₂O₅ 75 kg/hm², 氯化钾 K₂O 60 kg/hm²。生物质炭利用风干的玉米秸秆在生物质炭炉中厌氧燃烧制备^[19], 秸秆还田(NS)、秸秆和猪粪配施(NSM)和生物质炭还田(NB)处理的碳输入量均为每年 1 000 kg/hm², 每年根据秸秆、猪粪和生物质炭的含碳量进行计算还田量, 种植前随化肥一起施入土壤并翻耕混匀。秸秆、猪粪和生物质炭养分含量如表 2 所示。

表 2 秸秆、猪粪和生物质炭的主要养分含量
Table 2 Main nutrient contents of straw, pig manure and biochar

材料	全碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)
秸秆	397.82	10.55	0.80	14.94
猪粪	325.09	52.72	8.94	5.38
生物质炭	413.19	17.45	1.83	14.46

1.3 土壤样品采集

本研究在连续施肥 5 a 后(2015 年)的玉米抽雄期采集土壤样品。各小区按 S 型采样法采集表层土 (0~

20 cm) 10 个样点, 分别采集原状土样和混合土样。原状土样风干后用于团聚体测定; 混合土样采用四分法取 800 g 土壤样品, 其中一部分风干, 用于测定土壤理化性质, 另一部分鲜样于-80℃冰箱中保存备用。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤机械稳定性团聚体测定 采用干筛法: 将 100 g 风干土样置于套筛(孔径依次为 2 mm 和 0.25 mm)顶部, 以 30 次/min 手工上下振荡 5 min。振动结束后, 留在 2 mm 筛子上的团聚体为>2 mm 的粒级, 将其收集; 通过 2 mm 筛子而留在 0.25 mm 筛子以上的为 0.25~2 mm 的团聚体, 通过 0.25 mm 筛子的为<0.25 mm 的团聚体。将每层土壤样品风干并称重, 记为 W_{di} 。

1.4.2 土壤水稳性团聚体的测定 采用湿筛法: 将 50 g 风干土壤样品在室温下放置于孔径 2 mm 的筛上, 在蒸馏水中浸泡 5 min, 筛子上下振荡幅度为 3 cm, 频率为 25 次/min, 振动 2 min。振动结束后, 仍然留在筛子上的团聚体为>2 mm 的粒级, 将其收集。将剩余的土壤样品溶液继续依次过 0.25、0.053 mm 的筛子, 振动方式相同, 同时得到 0.25~2、0.053~0.25 mm 的团聚体。同时收集滤出液于最后一级团聚体悬液中, 为<0.053 mm 团聚体。将每层土壤样品风干并称重, 记为 W_{wi} 。

1.4.3 土壤有机碳(SOC)含量测定 采用重铬酸钾氧化-外加热法: 将土壤样品风干过筛后, 准确称取 0.5 g 土壤样品, 用控温式铝体消煮炉测定土壤有机质含量, 将测定的土壤有机质含量(g/kg)乘以 0.58

的经验系数换算成土壤有机碳含量(g/kg)。

1.5 数据处理和分析

1.5.1 土壤团聚体稳定性评价指标的计算 干筛和湿筛法各粒级团聚体质量所占比例(ω)分别按式(1)和式(2)计算^[20]。

$$\omega_i = \frac{W_{di}}{\sum_{i=1}^n W_{di}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\omega_i = \frac{W_{wi}}{\sum_{i=1}^n W_{wi}} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: ω_i 表示各粒级团聚体所占比例, W_{di} 表示干筛法各粒级土壤质量, W_{wi} 表示湿筛法各粒级土壤烘干土质量。

利用各粒级团聚体数据,计算>0.25 mm 团聚体占比($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和团聚体破坏率(PAD),分别按式(3)、式(4)和式(5)计算。

$$R_{0.25} = \frac{M_{R>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i) \quad (4)$$

$$PAD = \frac{R_{0.25d} - R_{0.25w}}{R_{0.25d}} \quad (5)$$

式中: $M_{R>0.25}$ 为>0.25 mm 团聚体的质量, M_T 为土壤团聚体总质量, $\bar{x}_i$ 为某级团聚体平均直径, $R_{0.25d}$ 为干筛法测得的>0.25 mm 团聚体质量占比, $R_{0.25w}$ 为湿筛法测得的>0.25 mm 团聚体质量占比。

团聚体对土壤有机碳的贡献率按式(6)计算:

团聚体对土壤有机碳的贡献率=

$$\frac{SOC_i \times \omega_i}{\sum_{i=1}^n (SOC_i \times \omega_i)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: SOC_i 为各粒级有机碳含量。

1.5.2 数据分析 文中结果均以烘干土(105℃,24 h)来表达,利用 SPSS17.0 软件,数据差异显著性分析用方差分析法(ANOVA)的 Duncan 法($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 等碳量生物质炭和秸秆长期还田对土壤团聚体分布状况的影响

通过干筛法可以获得原状土壤中机械稳定性团聚体,包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体,一般以 0.25 mm 为界限将团聚体分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)。>0.25 mm 团聚体是土壤中最 好的结构体,其数量与土壤的肥力状况呈正相关,用 $R_{0.25}$ 表示>0.25 mm 团聚体所占的比例。NB 和 NSM 处理 $R_{0.25}$ 值显著高于 N 处理,NS 和 N 处理 $R_{0.25}$ 差

异不显著(表 3)。其中 NB 处理 $R_{0.25}$ 值最大(88.14%)且显著大于 NSM 处理。不同处理机械稳定性团聚体分布以 0.25 ~ 2 mm 团聚体为主,占总团聚体的 45.72% ~ 51.11%,不同处理间 0.25 ~ 2 mm 团聚体含量差异不显著。和 CK 处理相比,N、NSM 和 NB 处理显著增加了>2 mm 团聚体的数量,而 NS 处理和 CK 差异不显著。

湿筛法获得的团聚体是土壤中的水稳性团聚体,水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要贡献。不同处理对水稳性团聚体影响差异显著(表 3),NSM 和 NS 处理下 $R_{0.25}$ 值显著高于 N 处理,其中 NSM 处理最大,为 35.65%。不同处理>0.25 mm 水稳性团聚体同样以 0.25 ~ 2 mm 团聚体为主,占总团聚体的 27.91% ~ 31.77%,其中 NS 处理显著高于 N 处理;>2 mm 团聚体仅占总团聚体的 1.71% ~ 4.38%,其中 NSM 和 NS 处理显著增加了>2 mm 团聚体所占比例,NSM 处理>2 mm 团聚体含量最大,平均值为 4.38%。

土壤团聚体的形成过程主要有两种不同的模式,一种认为土壤大团聚体是由小团聚体团聚后形成的^[21];一种则认为先形成大团聚体,由于大团聚体中有机碳分解而破碎形成小团聚体^[22]。Six 等^[23-24]提出的大团聚体周转模型认为:加入土壤的新鲜有机碳在微生物作用下,一部分与土壤矿物结合促进土壤团聚体形成,剩下的部分继续被微生物降解。秸秆等有机物料在红壤中的分解主要受物料的化学组成和土壤的质地、酸度以及利用方式等影响。有机物料的各种组分中,水溶性或苯醇溶性物质以及蛋白质等小分子物质分解最快,其次是纤维素和半纤维素,最难分解的是木质素。有研究表明,有机物料的分解速率随木质素含量升高而降低^[25],但有研究表明,物料分解和木质素含量并不直接相关,而是和有机物料碳氮比值直接相关^[26]。秸秆还田可以快速被微生物矿化,NS 和 NSM 处理下增加了土壤团聚体含量,而秸秆和猪粪的配施调节了秸秆的碳氮比,加速了秸秆的降解和团聚体的形成。生物质炭和秸秆不同,其碳源结构高度稳定,难以被微生物分解利用。然而生物质炭丰富的孔隙结构为微生物的生存和繁殖提供场所和能源物质,间接促进团聚体结构的形成^[27]。

2.2 等碳量生物质炭和秸秆长期还田对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体 MWD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,MWD 值越大,表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强。如表 4 所示,采用干筛法,不同处理对机械稳定性团聚体 MWD 值影响差

表 3 不同施肥处理团聚体组成(%)
Table 3 Aggregate composition under different treatments

处理	机械稳定性团聚体			水稳性团聚体		
	> 2 mm	0.25 ~ 2 mm	R _{0.25}	> 2 mm	0.25 ~ 2 mm	R _{0.25}
CK	26.17 ± 1.52 b	46.42 ± 0.95 a	72.59 ± 0.58 d	1.71 ± 0.36 c	27.91 ± 1.53 ab	29.62 ± 1.17 c
N	34.45 ± 1.36 a	44.45 ± 1.87 a	78.90 ± 0.53 c	2.19 ± 0.36 c	28.81 ± 3.42 b	31.00 ± 3.08 c
NS	28.62 ± 6.39 ab	49.54 ± 8.89 a	78.15 ± 3.85 c	3.12 ± 0.40 b	31.77 ± 1.46 a	34.90 ± 1.74 ab
NSM	36.37 ± 4.27 a	45.72 ± 3.41 a	82.09 ± 1.30 b	4.38 ± 0.23 a	31.28 ± 0.68 ab	35.65 ± 0.48 a
NB	37.03 ± 4.51 a	51.11 ± 3.30 a	88.14 ± 1.30 a	2.08 ± 0.21 c	29.92 ± 0.60 ab	32.00 ± 0.44 bc

注：表中数据为平均值 ± 标准差(n = 3)，表中同列小写字母不同表示不同施肥处理间的差异达 $P < 0.05$ 显著水平，下同。

异显著，为 $NB > NSM = N = NS > CK$ 。采用湿筛法，不同处理的水稳性团聚体 MWD 值存在显著差异，为 $NS = NSM > NB = N = CK$ 。团聚体破坏率(PAD)是描述团聚体稳定性的指标，PAD 越大，土壤结构越容易崩解破碎，土壤越容易被侵蚀，其值越小，团聚体稳定性越高。如表 4 所示，不同处理 PAD 存在显著差异，NB 的 PAD 值最大，平均值为 63.69%，显著高于 N 和 CK 处理的 60.73% 和 59.18%；NS 和 NSM 处理 PAD 值显著低于 CK 和 N 处理，平均值分别为 55.36% 和 56.57%。综合 MWD 和 PAD 值分析，和 N 处理相比，NSM 处理显著增加机械稳定性团聚体和水稳性团聚体 MWD，NS 处理显著增加水稳性团聚体 MWD，NS 和 NSM 处理 PAD 值显著降低，秸秆还田和秸秆猪粪配施还田不仅增加土壤团聚体含量，也增加了土壤团聚体的稳定性，对土壤结构起很好的改良作用，其中秸秆猪粪配施还田的效果最好。郝翔翔等^[6]研究连续秸秆还田对黑土团聚体影响结果表明，连续秸秆还田显著增加黑土大团聚体含量和 MWD 值。和 NS、NSM 处理不同的是，NB 处理机械性稳定团聚体的 MWD 值和 PAD 值显著高于 N 处理，湿筛会破坏土壤中某些瞬变性、临时性的有机胶结物质，这一部分物质与水稳性差的大团聚体呈正相关^[28]，生物质炭还田显著增加的团聚体多为非水稳性团聚体，可能与我国南部旱地红壤退化严重、黏粒含量多有关，土壤本身的粘结力差也放大了秸秆和生物质炭对水稳性团聚体含量和稳定性的差距^[15]。此外，黄超等^[29]和 Busscher 等^[12]研究表明，土壤团聚体含量和生物质炭的投入量表现为显著正相关关系，本研究生物质炭的投入量较低(每年投入约 2 400 kg/hm² 生物质炭)，也可能是影响水稳性团聚体含量和稳定性的原因之一。湿筛法得到的水稳性团聚体更能反映土壤团聚体的结构特征^[30]，秸秆猪粪配施和秸秆还田增加土壤团聚体含量和稳定性比生物质炭还田效果更好。

表 4 不同处理团聚体稳定性
Table 4 Soil aggregate stabilities under different treatments

处理	机械稳定性团聚体 MWD(mm)	水稳性团聚体 MWD(mm)	PAD (%)
CK	1.08 ± 0.02 d	0.44 ± 0.01 b	59.18 ± 1.35 b
N	1.22 ± 0.01 bc	0.45 ± 0.03 b	60.73 ± 1.64 b
NS	1.16 ± 0.05 c	0.50 ± 0.02 a	55.36 ± 0.14 c
NSM	1.26 ± 0.05 ab	0.52 ± 0.01 a	56.57 ± 0.24 c
NB	1.33 ± 0.05 a	0.46 ± 0.01 b	63.69 ± 0.13 a

2.3 等碳量生物质炭和秸秆长期还田对团聚体有机碳含量的影响

如图 1A 所示，不同处理 SOC 含量存在显著差异，和 N 处理相比，NB 和 NSM 处理显著增加了 SOC 的含量，其中 NB 处理最多，平均值为 4.92 g/kg，比 N 处理增加 71.05%，其次为 NSM 处理，平均值为 4.21 g/kg，比 N 处理增加 46.14%。NS 处理与 N 处理相比差异不显著，但显著高于 CK，平均值为 3.45 g/kg，比 CK 增加 32.65%。不同粒级团聚体 SOC 含量也存在显著差异，如图 1B 所示，采用干筛法时，和 N 处理相比，NB 和 NSM 处理显著增加不同粒级团聚体 SOC 含量，NS 处理显著增加了 <0.25 mm 机械稳定性团聚体 SOC 含量；采用湿筛法时(图 1C)，和 N 处理相比，NB 处理显著增加了各粒级团聚体 SOC 含量，其中 >2 mm 水稳性团聚体 SOC 含量增加最明显，NSM 处理显著增加了 >2 mm 水稳性团聚体 SOC 含量，其他粒级 SOC 含量变化差异不显著。生物质炭作为一种含碳量很高且结构稳定的碳源，还田直接增加 SOC 含量，而秸秆还田和秸秆猪粪配施还田增加 SOC 的机制和生物质炭不同。秸秆等有机物料进入土壤后，首先在细菌作用下使易分解有机物质快速矿化分解，促进养分释放；然后在缓慢的矿化阶段中，残留在土壤中的氮素及难分解物质在真菌作用下进行缓慢且复杂的变化过程，形成难分解的腐殖物质，从而提高土壤有机质含量且更新有机质组成^[31]，此外，Six 等^[24]提出的大团聚体周转模型认为添加新鲜

有机碳能促进大团聚体形成,其内部的有机碳受到物理保护作用而不断累积。

团聚体对土壤有机碳的贡献率是描述不同粒级团聚体有机碳含量占土壤有机碳总量的比例,是描述土壤有机碳分布的分析方法。采用干筛法时(表 5),NB、NSM 和 N 处理>2 mm 团聚体对 SOC 的贡献率显著高于 CK 和 NS 处理,NS 和 NB 处理 0.25~2 mm 团聚体对 SOC 的贡献率显著高于 N 和 NSM 处理;采用湿筛法时(表 5),NSM 和 NS 处理比 CK 和 N 处理显著增加了>2 mm 团聚体对 SOC 的贡献率,其他处

理不同粒级团聚体对 SOC 的贡献率差异不显著。郝翔翔等^[6]研究表明,秸秆还田和对照相比增加了>2 mm 和 0.053~0.25 mm 团聚体中 SOC 的贡献率,但 0.25~2 mm 和<0.053 mm 团聚体中 SOC 的贡献率显著低于对照处理,可能有两个原因:一是秸秆还田提高了土壤团聚体的碳含量,且大团聚体提高的幅度高于小团聚体;二是秸秆还田促进小团聚体向大团聚体转化,增加大团聚体含量且降低了小团聚体含量。孙汉印等^[9]也得到相似的结论:玉米秸秆粉碎旋耕还田显著增加了>0.25 mm 团聚体的含量和有机碳氧化稳定性。

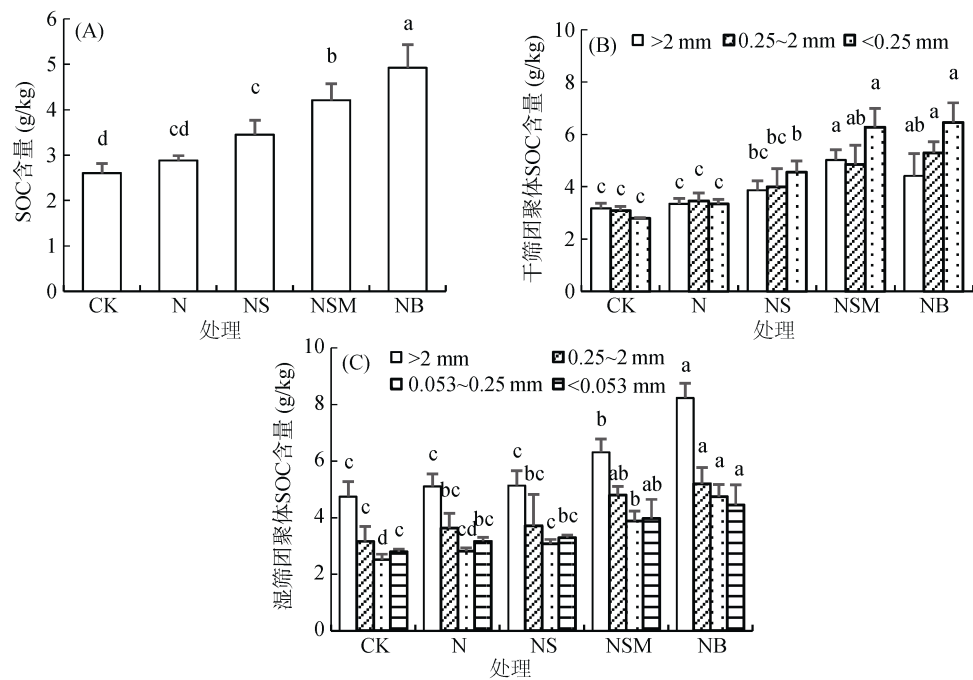


图 1 不同处理土壤及团聚体中 SOC 含量

Fig. 1 Soil organic carbon contents of different aggregate fractions under different treatments

表 5 不同施肥处理土壤各粒级团聚体对 SOC 含量的贡献率

Table 5 Contribution rates of different aggregate fractions to soil organic carbon concentrations under different treatments

处理	干筛团聚体对 SOC 的贡献率(%)			湿筛团聚体对 SOC 的贡献率(%)		
	>2 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm	>2 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm
CK	27.46 ± 2.91 b	47.27 ± 2.65 bc	25.27 ± 0.68 a	2.94 ± 0.26 b	32.12 ± 1.00 a	64.94 ± 1.25 a
N	33.99 ± 3.09 a	45.21 ± 3.34 c	20.80 ± 1.38 b	3.65 ± 0.82 b	33.61 ± 4.84 a	62.75 ± 4.11 a
NS	23.97 ± 1.00 b	53.83 ± 3.12 a	22.20 ± 2.86 ab	5.56 ± 0.48 a	34.77 ± 5.92 a	59.68 ± 5.57 a
NSM	35.34 ± 1.26 a	42.85 ± 1.70 c	21.81 ± 2.06 ab	6.49 ± 0.64 a	35.12 ± 1.75 a	58.39 ± 2.35 a
NB	33.09 ± 3.79 a	51.96 ± 2.45 ab	15.00 ± 1.40 c	3.47 ± 0.51 b	31.51 ± 4.70 a	65.02 ± 4.77 a

3 结论

在中亚热带第四纪红黏土发育的红壤旱地上,连续 5 a 秸秆还田、秸秆配施猪粪还田和生物质炭还田均能显著提高红壤机械稳定性团聚体数量、稳定性和土壤有机碳含量,其中秸秆还田和秸秆配施猪粪还田显

著增加红壤水稳性团聚体含量和稳定性,以及>2 mm 水稳性团聚体土壤有机碳的贡献率。生物质炭还田增加水稳性团聚体的含量和稳定性与对照差异不显著,生物质炭还田增加的团聚体多为非水稳性团聚体。总体上,秸秆配施猪粪协同提高团聚体有机质含量和团聚体稳定性的作用比秸秆还田和生物质炭还田要强。

参考文献：

- [1] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 434-438
- [2] Rattan L. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000, 165:191-207
- [3] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768
- [4] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47: 133-149
- [5] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108
- [6] 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
- [7] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025-1030
- [8] 崔荣美, 李儒, 韩清芳, 等. 不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011(1): 124-132
- [9] 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[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376
- [10] 陈静文, 张迪, 吴敏, 等. 两类生物炭的元素组分分析及其热稳定性[J]. 环境化学, 2014, 33(3): 417-422
- [11] Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (vertisol)[J]. Catena, 2014, 114(2): 37-44
- [12] Busscher W, Novak J, Evans D, et al. Influence of peacan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14
- [13] 米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 等. 生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1550-1556
- [14] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 152-157
- [15] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715-722
- [16] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-466
- [17] 刘京, 常庆瑞, 李岗, 等. 连续不同施肥对土壤团聚体影响的研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 24-26
- [18] 陈利军, 孙波, 金辰, 等. 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[J]. 土壤, 2015, 47(2): 340-348
- [19] 徐仁扣, 袁金华, 王艳平. 一种对农作物秸秆及其他有机物料进行炭化处理的装置: 中国, ZL201020683459.3.[P]. 2011-09-07
- [20] 周虎, 吕貽忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979
- [21] 王哲峰. 干旱农牧交错带耕种和围栏放牧对草地土壤有机碳库和土壤结构稳定性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006: 1-11
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemical, 2000, 32(14): 2099-2103
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1998, 62: 1367-1377
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176
- [25] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1224-1230
- [26] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 220-228
- [27] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 许玉芝. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1625-1632
- [28] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85
- [29] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(4): 439-445
- [30] 张磊, 王嘉学, 刘宝强, 等. 喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 8-15
- [31] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 长期施肥对黄泥田土壤微生物群落结构及团聚体组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1599-1606

Effects of Long-term Application of Biochar and Straws on Red Soil Aggregate Composition and Organic Carbon Distribution

MENG Xiangtian^{1,2}, JIANG Yuji¹, WANG Xiaoyue¹, SUN Bo^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The applications of biochar and straws are effective methods to improve soil organic carbon and soil aggregate composition. However, their effectiveness in improving soil quality is unclear at the long-term scale. In this study, a 5-year field experiment was conducted to study the impact of organic manure and biochar with equal amount of carbon input on soil aggregate composition, stability and organic carbon contents in an upland red soil in middle subtropical region. The study included five treatments: blank treatment (CK), fertilizer (N), straw (NS), the mixed application of pig manure and straw (NSM) and the biochar (NB). Soil aggregate size fraction was examined by dry and wet sieving methods, respectively. The results showed that soil organic carbon contents increased significantly after 5-year application of different types of organic carbon sources, and the order was as follows: NB> NSM> NS. For dry sieving, the results revealed that macro-aggregate contents ($R_{0.25}$) and mean weight diameters (MWD) were significantly higher under NSM and NB treatments than the N treatment. In general, the contributing rates of macro-aggregates to SOC in 0.25–2 mm fraction increased under NS and NB treatments. For wet sieving, the results revealed that $R_{0.25}$ and mean weight diameters MWD were significantly higher under NSM and NS treatments than the N treatment. The percentage of aggregate destruction (PAD) significantly reduced under NS and NSM treatments, but increased under NB treatment. The contributing rates of macro-aggregates to SOC in >2 mm fraction increased under NSM and NS treatments. In general, the mixed application of pig manure and straws had a stronger capacity to improve synergically soil aggregate stability and organic carbon content in comparison with the straw or biochar returning.

Key words: Straw returning; Biochar; Pig manure; Red soil aggregate; Organic carbon