

长期施用不同有机物料对土壤团聚体特征的影响

刘 哲, 陈田庆, 孙增慧, 张瑞庆*, 庞 喆, 高慧洲

(陕西省土地工程建设集团有限责任公司/国土资源部退化及未利用土地
整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘 要: 农业有机物料是重要的资源, 为研究施用不同有机物料对土壤水稳性团聚体分布、稳定性及有机碳的影响, 采用对照 (CK)、玉米秸秆 (Str)、堆肥 (C)、牛粪 (PM)、沼渣 (BgR)、生物炭 (BC) 6 种处理, 通过田间 7 年定位试验, 利用湿筛法得到不同粒级的土壤水稳性团聚体, 测定土壤有机碳含量, 计算了水稳性团聚体平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 值、分形维数 (D) 和土壤不稳定团粒指数 (E_{lr})。结果表明: 与对照相比, 5 种不同有机物料处理下 0 ~ 15 cm 土层水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 含量、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、土壤有机碳含量显著增加 ($P < 0.05$), 分形维数 (D)、土壤不稳定团粒指数 (E_{lr}) 显著减小 ($P < 0.05$), 土壤团聚体结构稳定性明显得到增强。土壤有机碳与水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 含量间呈现出极显著正相关关系 ($P < 0.001$)。生物炭和秸秆处理的团聚体稳定性变化最为明显, 土壤结构改善效果最好, 生物炭、沼渣处理最有利于促进土壤有机碳的累积。各处理 15 ~ 30 cm 土层, 土壤团聚体及有机碳含量差异不显著 ($P > 0.05$)。采取施用不同有机物料的方式对耕地进行保育, 显著提高了耕作层水稳性大团聚体含量和有机碳含量, 增强了团聚体结构稳定性, 改善了土壤结构和肥力状况。

关键词: 有机物料; 土壤水稳性团聚体; 土壤有机碳; 团聚体稳定性

中图分类号: S152.4; S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2018) 03-0100-08

团聚体的数量和大小是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度的关键指标, 其稳定性也是反映土壤结构状况的重要指标之一, 它不仅在调节土壤肥力、维持土地生产力方面具有重要作用, 而且与土壤的抗蚀能力及环境质量有着密切关系^[1-2]。水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的作用, 土壤有机碳对土壤水稳性团聚体的数量和大小分布具有重要影响, 研究表明, 土壤有机碳与水稳性团聚体关系密切, 外源有机物料的施用是土壤有机碳的重要来源, 能增加团聚体的团聚性能, 促进水稳性团聚体的稳定性^[3-4]。在全球气候变暖的大背景下, 国内外学者把土壤团聚体作为土壤有机碳稳定性的主要影响因子, 认为土壤团聚体的形成、稳定性机制及其主要影响因素等方面的研

究越来越重要^[5-6]。张赛等研究了保护性耕作对旱地紫色土水稳性团聚体及团聚体有机碳的影响, 结果表明, 保护性耕作有利于改善土壤团聚体结构, 增加大团聚体含量, 促进土壤有机碳的固定^[7]。李江涛等研究了施用畜禽粪便和化肥对土壤团聚体稳定性和活性有机碳库的影响, 研究表明, 施用畜禽粪便有利于提高人为扰动土壤中总有机碳含量及土壤团聚体稳定性, 土壤活性有机碳是团聚体形成与稳定过程中重要影响因素^[8]。因此研究土壤团聚体及有机碳分布和稳定性的变化特征, 对改善土壤结构及提高土壤肥力具有重要意义。

施用有机物料不仅可以增加土壤有机碳的含量, 提高土壤的肥力水平, 增加水稳性团聚体的稳定性, 改善土壤的结构特性, 而且可以减少肥料的不合理使用所导致的环境污染, 对于提高土壤抗侵蚀性及缓解气候变化等具有重要的意义^[9-10]。关松等通过对黑土水稳性团聚体稳定性分析发现, 秸秆还田有利于增加黑土水稳性大团聚体含量和土壤稳定性, 提高了土壤有机碳含量^[11]。邸佳颖等研究了有机肥配施化肥对水稻土团聚体有机碳的影响, 结果表明, 有机肥配施化肥促进了红壤性水稻土大团

收稿日期: 2017-08-18; 最后修订日期: 2017-09-30

基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务专项资金项目 (300102278501); 陕西省重点科技创新团队计划项目 (2016KCT-23); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2016JQ4025)。

作者简介: 刘哲 (1987-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 初级工程师, 主要研究方向为土壤结构和土壤碳循环, E-mail: liuzhe168@126.com。

通讯作者: 张瑞庆, E-mail: zhangruiq2010000@163.com。

聚体的形成和团聚体稳定性,增加了土壤有机碳的固持^[12],不同有机物料对土壤结构稳定性的作用存在差异,容易分解的有机物料对团聚体的形成与稳定影响见效快,但影响效果比较短暂,而难分解的有机物料对团聚体的形成与稳定见效慢但是相对持久。但是目前关于有机物料循环利用对土壤团聚体及有机碳的影响的研究主要集中于秸秆还田,长期施用有机肥,有机肥配施化肥等方面^[13-15],对于沼渣、生物炭、堆肥等方面的研究不足,而同时综合对比分析相同有机碳用量下5种不同有机物料长期施用对土壤水稳性团聚体分布及稳定性的差异方面的报道较少,难以区分出不同有机物料对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响。为此,本研究以华北地区冬小麦-夏玉米为研究对象,施用5种不同来源的有机物料,在等碳量投入的条件下,对比研究施用5种不同有机物料对土壤水稳性团聚体组成及稳定性的影响,分析施用5种不同有机物料后土壤总有机碳变化及其与土壤团聚体之间的关系,以期为改善华北地区土壤结构,提高土壤肥力,防止水土流失和探索出合适的有机物料利用模式提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

农田土壤采样区位于河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站内(37°41'N, 116°37'E)。实验站所在地区的主要气候类型属于暖温带季风气候,年平均降水量562 mm,主要集中在6~8月,雨热同期。年均气温为12.9℃,全年积温($\geq 0^{\circ}\text{C}$)为4 826℃,无霜期201 d,年日照时数为2 724.8 h。土壤类型主要为盐碱地改良后的冲积型盐化潮土,肥力均匀。2008年试验开始前0~20 cm耕层土壤基础理化指标如下:pH值(1:2.5土水质量比)为8.68,黏粒($< 0.002\text{ mm}$)含量为20.4%,粉粒(0.02~0.002 mm)含量为69.2%,土壤质地为粉砂壤土,有机碳含量为 $7.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤全氮含量为 $0.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $4.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,该区域主要作物种植制度为冬小麦-夏玉米轮作的一年两熟制,玉米于6月中旬播种,10月中旬收割、测产、取样。

1.2 试验设计

试验于2008年10月开始进行,为长期定位有机物料处理试验,设置不添加任何物料的对照

(CK)、玉米秸秆(Str)、堆肥(C)、牛粪(PM)、沼渣(BgR)、生物炭(BC)6个处理,每个处理设置3个重复,试验小区面积为 50 m^2 ($12.5\text{ m}\times 4\text{ m}$),共设18个小区。试验所用有机物料均以本试验收获的玉米秸秆为初始原料加工而成,牛粪在当地饲养场购买(本试验收获玉米秸秆为主要饲料),沼渣和堆肥分别由玉米秸秆和牛粪在厌氧和好氧过程下制成,生物炭主要由玉米秸秆在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 热解而成,所有有机物料均在小麦季播种前以等碳量($3\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)施入土壤中,每季还碳量大约相当于上一季有机物料处理所收获的地上部分秸秆中所含的总碳量,等于所收获秸秆量 $\times$ 秸秆含碳量,各有机物料性质见表1。农作物种植模式采取当地普遍的冬小麦-夏玉米复种轮作模式。供试冬小麦在10月上旬播种,播种量为 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第二年6月上旬收获,品种为良星99。夏玉米6月中旬播种,播种密度为每公顷 7.5×10^4 株,10月上旬收获,品种为郑单958。小麦播种前浅旋,旋耕深度20 cm,玉米季免耕。本长期定位试验不施用氮肥,磷、钾肥施用量相同,小麦季各处理施用 P_2O_5 肥 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O 肥 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;玉米季各处理施用 P_2O_5 肥 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O 肥 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥和钾肥均在播种前作为基肥一次输入,磷肥和钾肥品种分别为磷酸二铵、硫酸钾。

表1 不同有机物料的pH值、有机质及养分含量

有机物料	pH值	C (%)	N (%)	P (%)	K (%)	C/N
堆肥(C)	7.85	25.4	1.79	0.35	2.00	14.82
牛粪(PM)	6.98	26.72	1.56	0.38	0.82	17.00
沼渣(BgR)	7.21	22.46	2.02	0.72	0.94	11.31
秸秆(Str)	—	40.73	0.73	0.18	1.27	56.88
生物炭(BC)	8.30	68.31	1.23	0.13	0.40	57.07

1.3 测定指标与方法

供试土壤于2015年10月在实验站中取样,试验已进行7年,在每个试验小区采用棋盘法选择5~6个采样点,使用直径为5 cm的土钻,分层采

集 0 ~ 15 和 15 ~ 30 cm 深度的土样, 土样充分混匀后去除粗的植物残体和大的砂砾等杂质, 并按照不同的试验小区进行分装, 取出部分土样置于干冰中运回实验室放于 4°C 冰箱中储存, 剩余部分于牛皮纸上风干后保存。采集的土壤沿自然脆弱带轻轻掰开, 使其能通过 8 mm 筛, 过筛时尽量减少对团聚体结构的破坏, 其中一部分土样于阴凉通风处自然风干, 另一部分冷冻备用。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法, 全氮采用凯氏消煮法, 有效磷采用 Bray 法, 土壤黏粒和粉粒含量采用吸管法测定^[16-17]; 土壤团聚体的分布状况和稳定性采用湿筛法测定^[18]。取过 8 mm 筛的风干土 50 g, 采用 2、0.25 和 0.053 mm 的分样筛获得 >2、0.25 ~ 2、0.053 ~ 0.25 和 <0.053 mm 的土壤团聚体。具体操作方法为: 在室温下将土样放在 2 mm 的套筛上, 使桶内的去离子水量刚好淹没土样, 保持浸泡 5 min; 然后采用自动筛分仪上下振动筛分, 每次振动幅度为 3 cm, 频率 30 次 · min⁻¹, 上下振荡 5 min; 分别将 2、0.25、0.053 mm 筛子上的部分用去离子水冲洗到已烘干称重的铝盒中, 筛分 >2、0.25 ~ 2 和 0.053 ~ 0.25 mm 土壤团聚体时, 去掉水表面漂浮的植物残体等, 于 60°C 下烘干至恒重; <0.053 mm 部分则在 4 000 r · min⁻¹ 下使用离心机离心 5 min 后收集, 将样品烘干后称重, 各粒级团聚体重量记为 W_{wi} , 再分别计算各粒级土壤团聚体质量所占比例, 测定各粒级团聚体的有机碳含量。

1.4 计算方法

各粒级团聚体质量所占的比例 W_i 由公式 (1) 计算获得:

$$w_i = \frac{W_{wi}}{50} \times 100\% \quad (1)$$

描述土壤团聚体结构稳定性可采用平均重量直径 (mean weight diameter, MWD)、几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD)、大于 0.25 mm 团聚体含量 ($R_{0.25}$)、土壤不稳定团粒指数 (E_{LT})^[19-21], 计算公式如下:

$$R_{0.25} = \frac{M(r > 0.25)}{M_T} = 1 - \frac{M(r \leq 0.25)}{M_T} \quad (2)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (4)$$

$$E_{LT} = \frac{M_T - R_{0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (5)$$

分形维数 D 的计算公式为^[22]

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

利用公式 (6), 通过数据拟合可求得 D 。其中, $\bar{x}_i$ 为某级团聚体平均直径, $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 $\bar{x}_i$ 的团聚体的质量, M_T 为团聚体总质量, $x_{\max}$ 为团聚体的最大粒径。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据分析处理, SigmaPlot 10.0 软件进行作图, SPSS 22.0 软件对试验数据进行单因素方差分析和回归分析, 采用最小显著极差法 (LSD 法) 进行多重比较, 显著性水平 $P < 0.05$, 极显著性水平 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 施用不同有机物料对土壤各粒级水稳性团聚体分布的影响

水稳性团聚体相比于非水稳性团聚体对于保持土壤稳定状态具有更重要的价值, 其数量和分布状况反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀的能力, 是评价土壤肥力和土壤质量变化的重要指标^[23-24]。与对照处理相比, 施用不同有机物料后 0 ~ 15 cm 土层水稳性团聚体含量发生了显著变化 ($P < 0.05$) (图 1), 15 ~ 30 cm 土层团聚体含量整体相对变化不显著 (图 2), 其中不同土层 >2 mm 水稳性团聚体含量都很少, <0.053 mm 水稳性团聚体含量比较多。在 0 ~ 15 cm 耕作层土壤中, 施用不同有机物料后水稳性大团聚体 (>0.25 mm) 含量整体显著增加 ($P < 0.05$), 尤其是 0.25 ~ 2 mm 粒级团聚体含量明显增加, 堆肥 (C)、牛粪 (PM)、沼渣 (BgR)、玉米秸秆 (Str)、生物炭 (BC) 处理后 0.25 ~ 2 mm 粒级团聚体含量分别比对照 (CK) 处理增加了 65.5%、64.9%、61.9%、97.9%、137.5%, 水稳性大团聚体含量整体呈现出 BC 处理 (35.4%) > Str 处理 (30.5%) > PM 处理 (26.8%) > C 处理 (25.6%) > BgR 处理 (24.2%) > CK (16.9%) 的趋势, 其中 BC 处理和 Str 处理增加水稳性大团聚

含量效果最好, PM 处理、C 处理和 BgR 处理水稳性大团聚体含量增加效果相差不大, 5 种有机物料处理都显著增加了水稳性大团聚体的含量; 水稳性微团聚体 (<0.25 mm) 含量整体减少, <0.053 mm 粒级水稳性团聚体含量显著减少 ($P < 0.05$), 但是总体趋势还是水稳性微团聚体占主体, 含量值在 65.5% ~ 82.2% 之间。

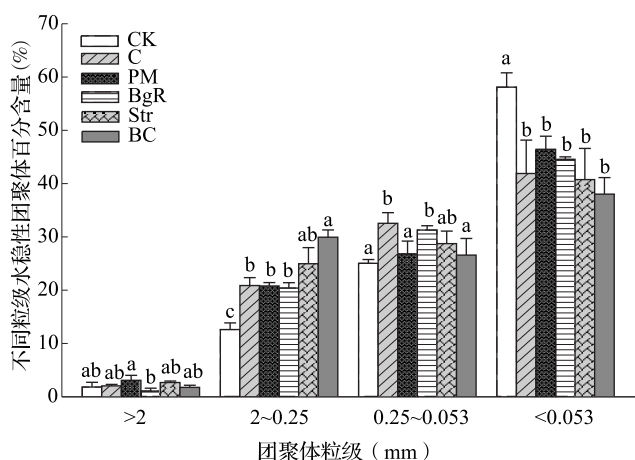


图1 不同有机物料处理下 0~15 cm 土层各粒级水稳性团聚体百分含量

注: 不同小写字母表示不同有机物料处理下差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

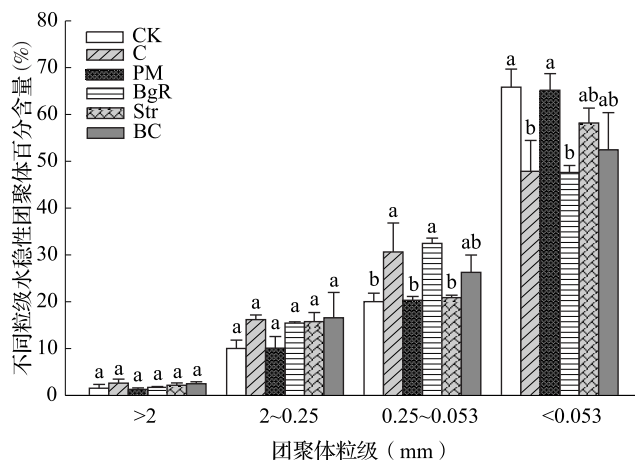


图2 不同有机物料处理下 15~30 cm 土层各粒级水稳性团聚体百分含量

在 15~30 cm 土层中, 相比于对照处理, 不同有机物料处理下 >2 、 $0.25 \sim 2$ mm 水稳性团聚体含量变化都不显著 ($P > 0.05$), 只有 C 处理和 BgR 处理使 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒级水稳性团聚体显著增加, <0.053 mm 粒级水稳性团聚体含量显著减少,

其他 3 种有机物料处理对 4 种不同粒级水稳性团聚体含量变化影响不显著, 导致下层土壤水稳性团聚体含量变化不明显的原因是由于耕作方式是小麦季浅旋和玉米季保护性耕作, 所以相比于 $0 \sim 15$ cm 耕作层土壤, 5 种有机物料处理对 $15 \sim 30$ cm 土层土壤水稳性大团聚含量整体影响比较小。

2.2 施用不同有机物料对水稳性团聚体平均质量直径、几何平均直径、土壤不稳定团粒指数、分形维数的影响

MWD 、 GMD 、 E_{LT} 、 D 是描述不同粒径土壤团聚体分布状况与团聚体结构几何形状的重要指标, 一般情况下认为 MWD 、 GMD 值越高, E_{LT} 、 D 值越小, 团聚体的平均粒径团聚度越高, 土壤稳定性越好, 土壤越具有良好的结构性^[25-26]。施用不同有机物料后 $0 \sim 15$ cm 土层水稳性团聚体的 MWD 、 GMD 显著增加, D 、 E_{LT} 值显著减小 ($P < 0.05$); $15 \sim 30$ cm 土层水稳性团聚体稳定性相关指标变化不显著 ($P > 0.05$) (表 2)。在 $0 \sim 15$ cm 土层, C 处理、PM 处理、BgR 处理、Str 处理、BC 处理的 MWD 分别比对照处理增加 35.5%、51.6%、19.4%、58.1%、61.3%, GMD 值比对照处理增加 41.7%、41.7%、33.3%、66.7%、83.3%, D 值分别比对照处理减小 1.7% ~ 4.1%, E_{LT} 值分别比对照处理减小 10.5% ~ 41.7%, 总体来看, 施用 5 种不同有机物料都起到改善土壤团聚结构的效果, 土壤的团聚程度和抗侵蚀能力都得到增加, 其中 Str 处理、BC 处理对土壤结构的改善效果最为显著。在 $15 \sim 30$ cm 土层, 通过方差分析得出, 相比于对照处理, 除 C 处理和 BC 处理对 MWD 有显著提高作用外, PM 处理、BgR 处理、Str 处理对 GMD 、 E_{LT} 、 D 影响都不显著, 对下层土壤团聚体结构的改善效果不明显。

2.3 施用不同有机物料对土壤总有机碳含量的影响

不同有机物料添加处理后 $0 \sim 15$ cm 土层土壤有机碳含量均显著增加 ($P < 0.05$), $15 \sim 30$ cm 土层土壤有机碳增加不显著 (图 3)。与对照处理相比, 在 $0 \sim 15$ cm 土层中, 土壤 C 处理、PM 处理、BgR 处理、Str 处理、BC 处理分别增加 64.6%、36.8%、65.2%、38.4%、205.8%, 说明施用不同有机物料对土壤有机碳含量的提高均具有重要的作用, 但是由于施用不同有机物料对改变土壤整体环境以及土壤微生物活性的过程不同, 从而影响土壤

表 2 施用不同有机物料对水稳性团聚体稳定性的影响

土层深度 (cm)	处理	MWD (mm)	GMD (mm)	E_{LT} (%)	D
0 ~ 15	对照 (CK)	0.31 ± 0.06c	0.12 ± 0.010c	83.15 ± 2.03a	2.91 ± 0.02a
	堆肥 (C)	0.42 ± 0.01b	0.17 ± 0.013b	74.45 ± 1.43bc	2.86 ± 0.01bc
	牛粪 (PM)	0.47 ± 0.04ab	0.17 ± 0.007b	73.20 ± 0.43bc	2.84 ± 0.01bc
	沼渣 (BgR)	0.37 ± 0.02bc	0.16 ± 0.003b	75.83 ± 0.85b	2.87 ± 0.01b
	秸秆 (Str)	0.49 ± 0.05a	0.20 ± 0.025a	69.50 ± 3.50cd	2.82 ± 0.02cd
	生物炭 (BC)	0.50 ± 0.01a	0.22 ± 0.007a	64.61 ± 0.10d	2.79 ± 0.01d
15 ~ 30	对照 (CK)	0.26 ± 0.02b	0.11 ± 0.011a	85.84 ± 2.59a	2.92 ± 0.02a
	堆肥 (C)	0.40 ± 0.03a	0.15 ± 0.011a	78.47 ± 0.42a	2.88 ± 0.01a
	牛粪 (PM)	0.25 ± 0.02b	0.11 ± 0.010a	85.49 ± 2.81a	2.92 ± 0.02a
	沼渣 (BgR)	0.34 ± 0.01ab	0.14 ± 0.004a	80.06 ± 0.57a	2.89 ± 0.01a
	秸秆 (Str)	0.36 ± 0.04ab	0.13 ± 0.014a	79.06 ± 3.27a	2.89 ± 0.02a
	生物炭 (BC)	0.39 ± 0.04a	0.15 ± 0.026a	78.71 ± 5.19a	2.88 ± 0.03a

注：不同小写字母表示同一土层不同有机物料处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

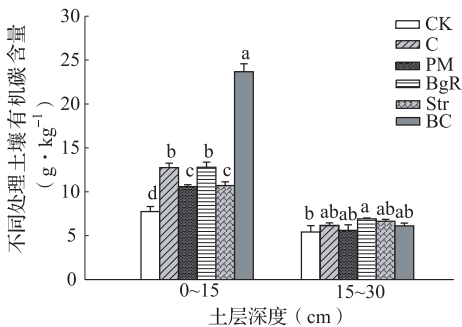
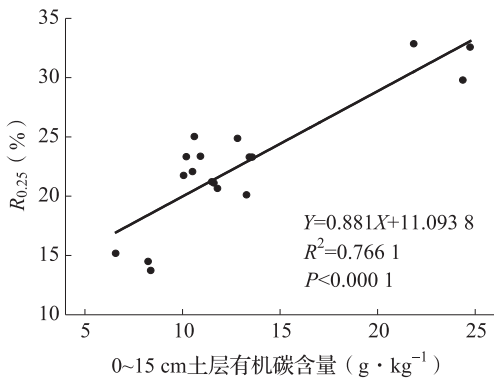


图 3 不同有机物料处理后土壤总有机碳含量

有机碳的分解过程及稳定性，进而土壤有机碳含量的提高程度有所不同^[27]。最终施用 5 种有机物料对土壤有机碳含量的提高效果整体趋势为 BC 处理 > BgR 处理、C 处理 > PM 处理、Str 处理 > CK，BC 处理、BgR 处理、C 处理土壤有机碳含量均显著高于 PM 处理、Str 处理，其中 BC 处理最有利于土壤有机碳含量的增加。在 15 ~ 30 cm 土层，通过方差分析，只有 BgR 处理增加效果明显，其他有机物料处理对土壤有机碳含量增加效果都不显著。



2.4 土壤有机碳含量与水稳性大团聚体含量的相关分析

>0.25 mm 粒级团聚体被认为是土壤中最好的结构体，称为土壤团粒结构体，是维持土壤结构稳定的基础，其含量越高，土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力越强^[28]。由图 4 可以看出，土壤有机碳含量与 >0.25 mm ($R_{0.25}$) 水稳性团聚体含量间呈现出极显著正相关关系 (0 ~ 15 cm 土层土壤， $R^2 = 0.766\ 1$ ， $P < 0.000\ 1$ ；15 ~ 30 cm 土层土壤， $R^2 = 0.712\ 2$ ， $P < 0.000\ 1$)。说明不管是 0 ~ 15 cm 土层还是 15 ~ 30 cm 土层土壤，土壤有机碳含量越高，>0.25 mm 水稳性团聚体的含量就越高，土壤团聚体水稳性越强，土壤结构越稳定。同时说明 C 处理、PM 处理、BgR 处理、Str 处理、BC 处理在补充土壤有机碳库和有效养分含量的同时，能够增加土壤中水稳性大团聚体含量及其稳定性，是改善华北平原农田土壤结构特性、培肥地力和提高土壤抗蚀性的有效途径。

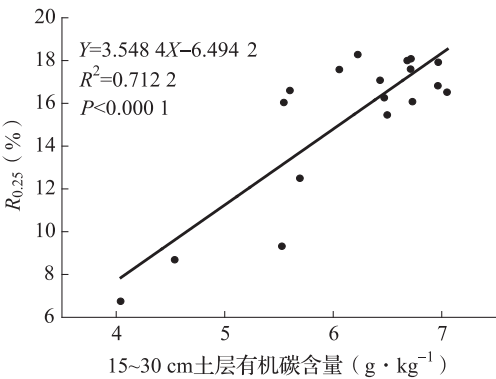


图 4 >0.25 mm 水稳性团聚体所占比例与土壤有机碳之间的相关关系

3 讨论

土壤结构的形成不仅是自然的过程,而且受到人类活动的严重影响,不同的有机物料具有不同的养分含量和结构特性,含有被微生物利用的有效成分不同,进而不同的有机物料还田处理对土壤团聚体数量和稳定性的影响程度有所不同^[29]。在0~15 cm耕作层土壤中,堆肥(C)、牛粪(PM)、沼渣(BgR)、玉米秸秆(Str)、生物炭(BC)处理后水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量分别比对照(CK)处理增加了51.6%、59.0%、43.4%、80.1%、109.9%,施用5种有机物料均显著增加了水稳性大团聚体的含量,水稳性微团聚体(<0.25 mm)含量整体减少,其中BC处理和Str处理水稳性大团聚体含量增加最为明显,PM处理、C处理和BgR处理水稳性大团聚体含量增加效果差异不明显。由于本试验属于长期定位试验,在等碳量投入的条件下,5种有机物料通过土壤微生物和酶对其进行腐解,产生了如多糖、蛋白质、纤维素等不同种类的有机质,这些土壤重要的胶结物质对水稳性大团聚体的形成及稳定产生了重要影响,促使潮土水稳性微团聚体向大团聚体团聚。尽管C处理、PM处理、BgR处理的C/N较低,成分易于分解,但从长期定位试验的角度来看,C/N高的Str处理、BC处理下的有机物料一旦降解形成大团聚体会更稳定,不易分解转移。这与姜灿烂等的研究结果相似,姜灿烂等研究了4种不同有机物料添加对红壤水稳性团聚体的影响,结果表明4种有机物料均减少了水稳性微团聚体含量,促进了水稳性微团聚体向水稳性大团聚体(>250 μm)的团聚^[30]。有机物料由于具有不同的品质,对团聚体稳定性的提高幅度不尽一致。前人研究认为C/N低的有机物料分解较快,而C/N较高的物料更能提高大团聚体的稳定性^[31-32]。这与本研究的团聚体稳定性研究结果相似,5种不同有机物料处理的水稳性指标MWD、GMD值都显著大于对照,分形维数(D)、土壤不稳定团粒指数(E_{LT})显著小于对照($P<0.05$),并且5种有机物料中C/N高的BC处理和Str处理比C/N低的PM处理、BgR处理、BC处理的团聚体稳定性要高一些,对土壤结构的改善和抗侵蚀能力的提高效果更佳,有机物料还田增加了土壤水稳性大团聚体含量,提高了土壤团聚体的稳定性。在15~30 cm层土壤中,5种不同有机物料处理下的水稳性团聚

体的分布和稳定性差异相比于0~15 cm耕作层土壤不明显,同一土层各处理间差异不显著,可能是由于耕作方式是小麦季浅旋耕和玉米季保护性耕作,15~30 cm土层土壤微生物和生物活性比较弱,根系少量分布在15~30 cm土层中,通过土壤微生物和酶对有机物料腐解产生的有机胶结物质较少,进而影响团聚体的形成与稳定。

施用有机物料是土壤有机碳的重要来源,沼渣、牛粪、堆肥、生物炭等外源有机物料的施入能有效地提高土壤微生物活性,加快有机碳矿化分解,同时也促进作物的生长,使土壤根系分泌物及作物残留物增加,从而增加土壤有机碳的含量^[33]。在0~15 cm土层中,相比于CK处理,有机物料C处理、PM处理、BgR处理、Str处理、BC处理都显著增加了土壤有机碳含量($P<0.05$),由于玉米秸秆经过高温裂解碳化后成为惰性碳,具有高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构,高温制备下的生物炭表现出高度的化学和生物稳定性,不易矿化降解^[34],导致BC处理有机碳含量显著高于其他处理。相比秸秆、牛粪,沼渣、堆肥等具有较高的腐殖化系数,有机物料的相对粒级较小,更易与土壤物理混合,连续施用使残留在土壤中的有机碳较多,从而使土壤有机碳含量得以累积,因此导致5种有机物料还田处理对土壤有机碳的提高效果整体呈现出BC处理>BgR处理、C处理>PM处理、Str处理>CK的趋势。在15~30 cm土层中,5种有机物料还田对土壤有机碳的影响不明显,分析其主要原因是保护性耕作方式与生物活性较弱导致。土壤有机碳是影响土壤团聚结构的最重要因素之一,研究表明,土壤有机碳与水稳性团聚体关系密切,外源有机物料的加入,是土壤有机碳的重要来源,促进了团聚体的团聚与水稳性团聚体的稳定^[3]。本文相关的分析结果证实,外源有机物料施入土壤,促进土壤有机碳含量提高的同时,不仅可增加土壤中>0.25 mm团聚体含量,还可增加大团聚体的水稳性,土壤有机碳含量与>0.25 mm水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)间呈现出极显著正相关关系。

4 结论

通过综合对比分析,施用5种不同有机物料均显著促进了0~15 cm耕作层土壤水稳性微团聚体向大团聚体(>0.25 mm)的团聚,提高了水稳性

团聚体的 MWD 、 GMD , 降低了 D 、 E_{LT} 值, 增强了水稳性团聚体的团聚程度, 土壤结构和稳定性明显得到改善; 对 15 ~ 30 cm 土层水稳性团聚体分布及有机碳含量的影响不明显。5 种有机物料处理中, 生物炭、秸秆最有利于促进水稳性大团聚体的形成和增加团聚体的稳定性; 生物炭、沼渣最有利于促进土壤有机碳的累积; 土壤有机碳与 $R_{0.25}$ 之间呈极显著的正相关关系 ($P < 0.001$)。

参考文献:

- [1] 李阳兵, 谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响 [J]. 水土保持学报, 2001, 15 (4): 122 - 125.
- [2] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (1): 159 - 165.
- [3] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review [J]. Geoderma, 2005, 124 (1/2): 3 - 22.
- [4] 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.
- [5] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO_2 in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132: 243 - 251.
- [6] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响 [J]. 环境科学学报, 2017, (6): 2351 - 2359.
- [7] 张赛, 王龙昌. 保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, (4): 263 - 267, 272.
- [8] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响 [J]. 水土保持学报, 2010, (1): 233 - 238.
- [9] 陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, (S2): 94 - 102.
- [10] 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 [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103: 412 - 418.
- [11] 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.
- [12] 邸佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22 (10): 1129 - 1138.
- [13] 顾鑫, 安婷婷, 李双异, 等. $\delta^{13}C$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (2): 243 - 247, 312.
- [14] 申思雨, 刘哲, 吕贻忠. 不同种植方式对温室土壤微形态的影响 [J]. 土壤, 2016, 48 (2): 355 - 360.
- [15] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92 (1): 21 - 33.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [18] Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S. Soil structure and the effect of management practices [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79: 131 - 143.
- [19] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20 (2): 151 - 153.
- [20] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1995, 36 (1/2): 1 - 20.
- [21] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (7): 1969 - 1976.
- [22] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896 - 1899.
- [23] Verchot L V, Dutoit L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011, 161 (3/4): 182 - 193.
- [24] 刘哲, 孙增慧, 吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (8): 1119 - 1128.
- [25] 周虎, 吕贻忠, 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.
- [26] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 等. $\delta^{13}C$ 法研究砂姜黑土添加秸秆后团聚体有机碳变化规律 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (14): 179 - 187.
- [27] Zhou G, Guan L, Wei X, et al. Factors influencing leaf litter decomposition: An intersite decomposition experiment across China [J]. Plant and Soil, 2008, 311 (1): 61 - 72.
- [28] 梁爱珍, 张晓平, 申艳, 等. 东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (5): 1052 - 1057.
- [29] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29 (11/12): 1647 - 1653.
- [30] 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.
- [31] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43: 657 - 666.
- [32] Six J, Carpentier A, Kessel C, et al. Impact of elevated CO_2

- on soil organic matter dynamics as related to changes in aggregate turnover and residue quality [J]. Plant and Soil, 2001, 234 : 27 – 36.
- [33] 龙攀, 高旺盛, 隋鹏, 等. 农业废弃物还田对土壤团聚体及土壤 C 和 N 的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2014, 19 (6) : 107 – 118.
- [34] Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound – specific ^{14}C analysis [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 70 : 229 – 236.

Effects of long-term various organic materials turnover on characteristics of soil aggregates

LIU Zhe, CHEN Tian-qing, SUN Zeng-hui, ZHANG Rui-qing*, PANG Zhe, GAO Hui-zhou (Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group/Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources of China, Shaanxi Xi'an 710075)

Abstract: Agricultural organic materials are important resources. In order to study the effects of different organic materials on distribution and stability of soil water-stable aggregates, a seven-years field experiment was conducted in North China Plain. The experiment included six treatments: no organic materials (CK), crop straw (Str), compost (C), manure (PM), biogas residue (BgR), biochar (BC). All soil samples were separated into four aggregate-size classes (>2 mm, $2 \sim 0.25$ mm, $0.25 \sim 0.053$ mm, <0.053 mm) by wet sieving, meanwhile the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D) and unstable aggregate index (E_{LT}) of water-table aggregates were calculated. Compared with the control, the application of organic materials in $0 \sim 15$ cm soil layer not only significantly promoted the formation of >0.25 mm soil water-stable macroaggregates ($P < 0.05$), but also increased MWD, GMD of water-table aggregates. Also, the value of (D) and (E_{LT}) were lower than the control, therefore, the stability of soil structure was significantly enhanced. The macroaggregates (>0.25 mm) and soil organic carbon in bulk soil showed a significant positive correlation ($P < 0.001$). The improvement effects of aggregate stability index and soil structure of BC and Str treatments were the best, while BC and BgR treatments were better to increase soil organic carbon content in bulk soil. The content of soil aggregates and organic carbon was not significant among different organic material treatments in $15 \sim 30$ cm soil layer ($P > 0.05$). The addition of organic materials could increase the content of macroaggregates (>0.25 mm) and soil organic carbon, enhance the aggregate stabilization of fluvo-aquic soil, while improve soil structure and fertility status.

Key words: organic material; soil water-stability aggregate; soil organic carbon; aggregate stability