

长期有机无机配施对土壤团聚体及有机碳的影响

罗贞宝¹, 李志宏², 朱经伟³, 李彩斌¹, 张恒³, 赵二卫¹, 戴杰¹, 范龙¹, 王新修^{2*}

(1. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节 551700; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 贵州省烟草科学研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 为探究长期有机无机配施对土壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响。以连续 14 年定位施肥田间试验为依托, 设置不施肥 (CK)、单施化肥 (CF)、化肥 + 厩肥 (OF) 和化肥 + 生物有机肥 (BF) 4 个处理, 研究不同施肥处理对土壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响。结果显示, ①施肥 (CF、OF、BF) 提升了 >2、1 ~ 2 和 <0.053 mm 粒级的占比, 有机无机配施 (OF 和 BF) 进一步提高了大粒级团聚体 (>0.25 mm) 的占比, 促进了微团聚体向大团聚体的转化; ②有机无机配施 (OF 和 BF) 改善了土壤团聚体的结构, 土壤水稳性团聚体大团聚体含量 (>0.25 mm)、平均重量直径和几何平均直径等稳定性指标, 生物有机肥 (BF) 处理最佳。③所有处理中大团聚体 (>0.25 mm) 的有机碳贡献率超过 62.0%, 其中有机无机配施处理有机碳的贡献率超过 65.9%, 大团聚体是有机碳主要储存粒级, 0.5 ~ 1 和 0.053 ~ 0.25 mm 为土壤有机碳重要的影响粒径; ④长期有机无机配施 (OF 和 BF) 可增加土壤总有机碳的含量, 生物有机肥更有利于提高土壤有机碳的含量。⑤厩肥 (OF) 和生物有机肥 (BF) 处理有机碳贡献率变异度与不施肥 (CK) 相比分别降低了 43.6% 和 45.7%, 有机碳在土壤各粒级中分布更协调, 增强了团聚体的稳定性。以上结果表明, 有机无机配施有利于微团聚体向大团聚体转化, 增加土壤大团聚体比例, 不同粒级团聚体有机碳养分贡献度相对均衡, 配施生物有机肥效果更为明显, 可为长期施肥管理提供依据。

关键词: 有机无机配施; 烤烟; 长期施肥; 有机碳; 团聚体

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是用来衡量土壤肥力水平的重要指标之一^[1], 土壤有机质作为土壤团聚体形成的重要胶结物质, 不仅影响大团聚体的数量, 也影响团聚体的稳定性^[2]; 有机肥含有较多的有机物, 能作为微生物获取能量的来源, 对增强土壤颗粒团聚性、促进团粒结构的形成, 改善土壤结构和提高土壤耕性具有重要作用^[3], 研究表明有机无机肥配施可显著提高土壤有机质含量和碳库管理指数^[4], 陈茜等^[5]研究长期施肥使黏粒团聚体向微团聚体和大团聚体转化, 能显著提高大团聚体 (>0.25 mm) 占比, 有利于团聚体内颗粒有机碳富集; 徐倩倩^[6]研究表明不同种植年限大团聚体数量随种植年限增加而增加, 而

微团聚体数量随种植年限增加而减少, 土壤团聚体稳定性呈逐年增加趋势; 李江涛等^[7]研究发现化肥和畜禽粪便配施有利于提高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。因此, 通过长期定位试验的方式, 探究不同施肥处理土壤团聚体变化对阐明有机碳周转机制及碳固定具有重要意义。

有机肥的施用能促进根系生长, 有利于烤烟干物质的积累, 对烟叶中叶绿素的降解和成熟期落黄有较好的作用^[8], 施用有机肥可将烤后烟叶的组织结构变得疏松, 施用有机肥同时有助于烟叶化学成分间的协调和糖分的积累, 有效提高烤烟叶片的烟碱、总氮和蛋白质含量, 烟叶油分充足^[9], 外观质量得到明显改善, 提升烟叶品质及产量^[10]。目前, 关于长期有机无机配施对土壤整体的影响研究较多, 而对团聚体水平下的有机碳稳定性及有机碳变化的研究鲜有报道, 本研究依托长期定位施肥田间试验, 研究长期有机无机配施对土壤团聚体组成与稳定性及团聚体不同粒级的有机碳含量变化, 揭示有机碳的物理保护机制, 为培育植烟土壤地力

投稿日期: 2023-11-30; 录用日期: 2024-01-29

基金项目: 企业项目 (毕节烟叶质量与生态监测体系构建); 中国烟草总公司科技项目 (110202102037); 中国烟草总公司贵州省公司科技项目 (2021XM17)。

作者简介: 罗贞宝 (1979-), 高级农艺师, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培研究与技术推广工作。E-mail: 30734200@qq.com。

通讯作者: 王新修, E-mail: ungilx@126.com。

和释放土壤固碳潜能提供理论依据,从而为合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

定位试验始于2008年,位于贵州省开阳县龙岗镇(26° 52' 24.8" N, 107° 06' 40.8" E),属北亚热带季风性湿润气候,烤烟生长季4—9月的多年均温为19.5℃,多年平均降水量为818.2 mm(数据来源:中国天气网)。土壤为黄壤黄泥土,定位试验开始时土壤基本性质:有机质55.40 g/kg、全氮2.43 g/kg、碱解氮146.1 mg/kg、有效磷20.9 mg/kg、速效钾185.5 mg/kg、pH值6.93。

1.2 试验设计

长期定位试验耕作制度为玉米—烤烟轮作。试验设置4个处理:不施肥(CK)、单施化肥(CF)、化肥+厩肥(OF)、化肥+生物有机肥(BF)。小区面积为133 m²,供试烤烟品种为K326。

采用井窖式移栽烟苗,烟株距60 cm、行距100 cm,灌溉、虫害防治和其他管理措施依据当地优质烟叶生成规程进行。有机肥和生物有机肥与基肥在起垄时一并施入,追肥时在距离根茎5 cm处打孔,将肥料施入后覆土,各处理肥料类型及总养分投入量如表1。4月13日施入基肥,4月16日移栽,5月27日追肥,6月5日揭膜覆土,7月10日进行第一次烟叶采收,8月20日烟叶采收结束,当季收获后,所有植物残体全部移出。

试验肥料分别为过磷酸钙(P₂O₅ 14%)、硫酸钾(K₂O 51%)、烟草专用基肥(N:P₂O₅:K₂O配方为10:10:25)、厩肥(腐熟牛粪,N、P₂O₅、K₂O含量分别为1.4%、0.4%、2.1%,有机碳含量为89.9 g/kg,含水量53.2%)、生物有机肥[南京农业大学资源与环境科学学院提供,N、P₂O₅、K₂O含量分别为2.6%、2.2%、2.1%,有机碳含量为262.2 g/kg,含水量16%,功能菌(芽孢杆菌)数量为2×10⁷ cfu/g以上]。

表1 不同处理施肥种类及养分投入 (kg/hm²)

处理	基肥						追肥			养分总投入			有机碳投入
	化肥			有机肥料			化肥						
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	45	75	90	0	0	0	30	0	60	75	75	150	0
OF	45	75	90	49.1	14.0	73.7	30	0	60	124.1	89.0	223.7	315.5
BF	45	75	90	16.4	13.9	13.2	30	0	60	91.4	88.9	163.2	165.2

1.3 样品的采集及分析

采用多点取样法,选取10~15个小样点各取0~20 cm土层的土壤并制成1个混合样,各处理采土部位、深度、数量保持一致。样品在田间沿自然裂隙掰成1 cm左右土块,剔除石块、根系等杂物后保留1.5 kg,放入自封袋密封和标记。

样品制备:用四分法取约500 g土样,用孔径分别为5、3、2、1、0.5、0.25 mm筛子进行筛分,筛分后将各粒级团聚体按质量比配成50 g样品。

水稳性团聚体测定:依次将2、1、0.5、0.25和0.053 mm的套筛放置土壤团聚体分析仪桶内(型号XY-100型,北京祥宇仪器设备有限公司),将配好的样品放入套筛最上层,加水至筛组最上面一个筛子的边缘部分,每分钟上下振动30次,振幅3 cm,振荡30 min后轻轻将套筛取出,

收集各层筛中的残留团聚体,风干后称量不同粒级的重量^[11],然后将分级的各粒级磨细过0.053 mm筛,测定有机碳含量^[12]。相关计算公式^[13-14]如下:

- (1) 某粒径团聚体占比(%) = $\frac{m_i}{M_0} \times 100$
- (2) 水稳性大团聚体数量(%) = $(\sum_{i=0.25} m_i) / M_0 \times 100$
- (3) 平均质量直径(MWD) = $\sum_{i=1}^n \bar{R}_i \times m_i$
- (4) 几何平均直径(GMD) = $\exp(\sum_{i=1}^n \bar{R}_i \times m_i)$
- (5) 有机碳富集系数 = $\sum_{i=1}^n \bar{R}_i$
- (6) 有机碳贡献率(%) = $\frac{T_i \times m_i}{T_0 \times M_0} \times 100$
- (7) 有机碳储量 = $m_i \times T_i$

式中,m_i为该粒级团聚体质量,M₀为各粒级团聚

体质量之和, $\bar{R}_i$ 为相邻团聚体组分的平均直径, T_i 为该粒级有机碳含量, T_0 为全土有机碳含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理, SPSS 20.0 进行单因素方差分析和 Duncan 法显著性分析 ($P < 0.05$), 数据经整理分析后用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 长期有机无机配施对土壤水稳性团聚体粒径分布特征的影响

不同施肥处理对土壤水稳性团聚体粒径的影响如图 1。团聚体从大小上分可分为大团聚体 (直径 >0.25 mm) 和微团聚体 (直径 <0.25 mm) [15], 从结果可知, 施肥对土壤水稳性团聚体粒级组成有一定的影响, 施肥处理中 >2 mm 粒级占比最低, 且 $CK < CF < OF < BF$; 与不施肥 (CK) 相比, 施肥处理 (CF、OF 与 BF) 在 >2 、 $1 \sim 2$ 和 <0.053 mm

的团聚体组分占比分别提升了 1.4% ~ 4.3%、2.1% ~ 7.1% 和 3.8% ~ 4.6%; 在 $0.5 \sim 1$ 、 $0.25 \sim 0.5$ 和 $0.053 \sim 0.25$ mm 的团聚体组分占比分别下降了 0.5% ~ 2.1%、1.0% ~ 2.7% 和 4.2% ~ 12.0%。有机无机配施 (OF 和 BF) 与单施化肥 (CF) 相比 >2 、 $1 \sim 2$ 和 $0.5 \sim 1$ mm 粒径的占比分别提高了 1.3% ~ 2.9%、2.2% ~ 5.0% 和 1.3% ~ 1.6%。不施肥 (CK) 和单施化肥 (CF) 的微团聚体占比差异不大, 占比分别为 41.9% 和 41.5%; 有机无机配施 (OF 和 BF) 与不施肥 (CK) 和单施化肥 (CF) 相比, 土壤微团聚体占比有所降低, 分别下降了 4.4% 和 7.8%; 生物有机肥 (BF) 与厩肥 (OF) 相比, 微团聚体占比降低了 3.4%。施肥提升了 >2 、 $1 \sim 2$ 和 <0.053 mm 粒级的占比, 有机无机配施 (OF 和 BF) 进一步提高了大粒级团聚体 (>0.25 mm) 的占比, 且生物有机肥处理 (BF) 的效果更好。

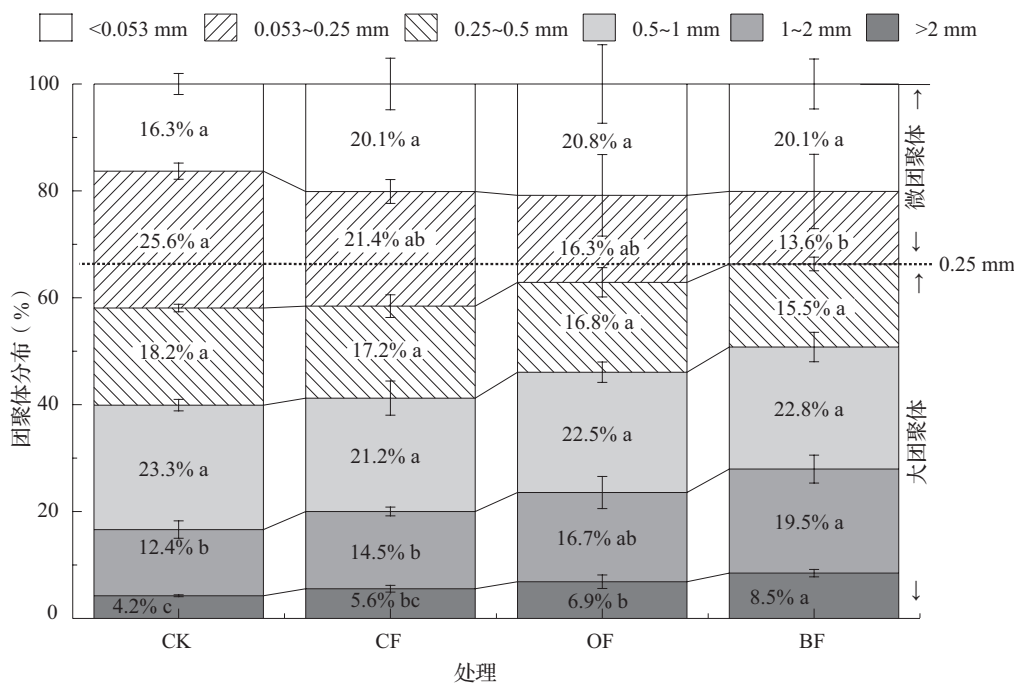


图 1 水稳性团聚体不同粒径的分布

注: 不同小写字母表示同粒径处理间差异达到 5% 显著水平。下同。

进一步计算各处理的土壤团聚体 MWD 与 GMD, 不同处理平均 MWD 值从小到大为 $CK < CF < OF < BF$, 施肥处理 (CF、OF 和 BF) 与不施肥 (CK) 相比, 土壤 MWD 值分别提高了 8.1%、21.0% 和 35.5%, 其中有机无机配施 (OF 和 BF) 与不施肥 (CK) 相比达到显著性差异; 有机无机配施 (OF 和 BF) 与单施

化肥 (CF) 相比, 土壤 MWD 值分别提高了 11.9% 和 25.4%; 生物有机肥 (BF) 比厩肥 (OF) 土壤 MWD 值提高了 12.0%。施肥提高了土壤 MWD 值, 有机无机配施进一步提升了土壤 MWD (表 2)。各处理土壤 GWD 值表现为 $CK \approx CF < OF < BF$, 与 WMD 趋势一致, 但各处理间差异未达到显著水平。有机肥

表 2 不同施肥处理对土壤团聚体平均质量直径与几何平均直径及大团聚体的影响

处理	平均质量直径 (mm)	几何平均直径 (mm)	>0.25 mm 团聚体占比 (%)
CK	0.62 ± 0.04c	0.30 ± 0.03a	58.09 ± 2.49b
CF	0.67 ± 0.05bc	0.29 ± 0.04a	58.43 ± 2.69b
OF	0.75 ± 0.07ab	0.32 ± 0.05a	62.89 ± 2.94ab
BF	0.84 ± 0.05a	0.36 ± 0.03a	66.33 ± 2.96a

注：同列不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

的施用显著提高了大团聚体的占比，各处理的顺序为 CK<CF<OF<BF，其中生物有机肥（BF）显著高

于不施肥（CK）和单施化肥（CF）。

土壤团聚体 MWD 和 GMD 与不同粒径间的相关关系如表 3 所示，土壤团聚体 MWD 与 >2 和 1 ~ 2 mm 粒级呈极显著正相关，与 0.25 ~ 0.5 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒级呈显著负相关；土壤团聚体 GWD 与 >2 和 1 ~ 2 mm 粒级呈极显著正相关；大团聚体（0.25 mm）与 >2 和 1 ~ 2 mm 呈极显著正相关，与 0.25 ~ 0.5 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒级呈显著和极显著负相关；有机无机配施促进了微团聚体向大团聚体的转化，进一步提升了土壤团聚体的稳定性。

表 3 土壤团聚体的平均质量直径、几何平均直径与团聚体组成的关系

指标	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
平均质量直径	0.966**	0.948**	0.208	-0.644*	-0.669*	0.073
几何平均直径	0.838**	0.719**	0.212	-0.401	-0.232	-0.433
>0.25 mm	0.877**	0.926**	0.412	-0.672*	-0.710**	0.096

注：** 表示在 0.01 水平上极显著相关，* 表示在 0.05 水平上显著相关。

2.2 土壤团聚体不同粒径有机碳含量及储量

土壤团聚体不同粒径内有机碳含量如图 2，不施肥（CK）与单施化肥（CF）在不同粒径中差异不大，厩肥（OF）处理在各粒径中有机碳含量均高于其他处理；有机无机配施（OF 和 BF）在 0.5 ~ 1、0.25 ~ 0.5、0.053 ~ 0.25 和 <0.053 mm 粒级较不施肥（CK）处理有机碳含量分别提升 7.1% ~ 14.4%、4.3% ~ 5.7%、35.4% ~ 36.2% 和 25.2% ~ 39.8%，其中 0.053 ~ 0.25 和 <0.053 mm 粒级达到显著水平；厩肥（OF）在 >0.25 mm 粒径的团聚体中有机碳含量均高于生物有机肥（BF）处

理，其中 >2 mm 粒径达到显著水平；有机无机配施提高了微团聚体内有机碳的含量。

进一步分析各处理全粒级有机碳含量，不施肥（CK）与单施化肥（CF）全粒级有机碳含量差异不大；有机无机配施（OF 和 BF）与单施化肥（CF）相比，有机碳含量分别提高了 3.95 和 2.26 g/kg，提升幅度为 16.0% 和 10.5%，使有机无机配施（OF 和 BF）与不施肥（CK）和单施化肥（CF）间有机碳含量差异达到显著；厩肥（OF）有机碳含量比生物有机肥（BF）处理高 1.35 g/kg，但两者间差异未达到显著水平。

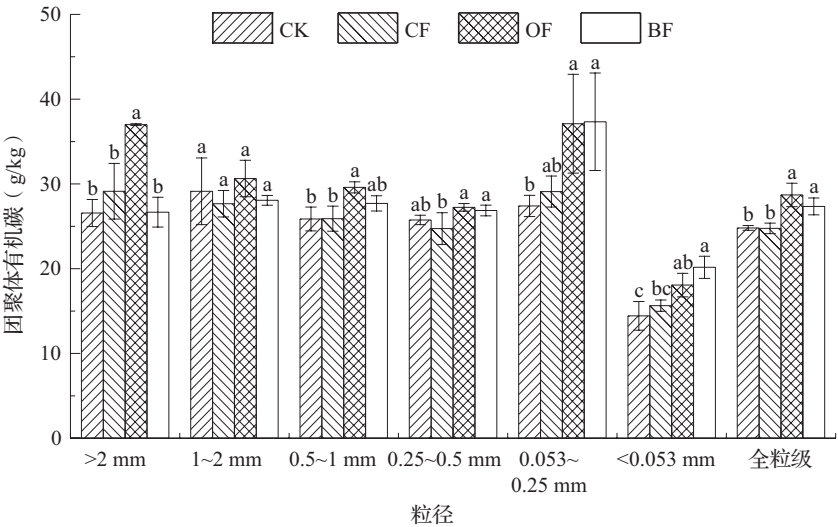


图 2 不同粒径内部有机碳含量分布

各施肥处理在不同粒径团聚体内的有机碳储量见表4,在所有粒径中不施肥(CK)与单施化肥(CF)差异不显著;在粒径范围>2 mm中,厩肥(OF)和生物有机肥(BF)的有机碳储量与不施肥(CK)相比提高了124.8%和100.0%,与单施化肥(CF)相比提高了56.8%和39.5%;在1~2、0.5~1及<0.053 mm

mm粒径范围内,有机无机配施(OF和BF)的有机碳储量高于不施肥(CK)和单施化肥(CF),其中在1~2 mm 粒级生物有机肥(BF)和不施肥(CK)、单施化肥(CF)间,厩肥(OF)和不施肥(CK)间达到显著水平;厩肥(OF)和生物有机肥(BF)各粒级的有机碳储量差异不显著。

表4 长期施肥对团聚体不同粒径内的有机碳储量的影响

处理	>2 mm		1 ~ 2 mm		0.5 ~ 1 mm		0.25 ~ 0.5 mm		0.053 ~ 0.25 mm		<0.053 mm	
	储量(g)	变化率(%)	储量(g)	变化率(%)	储量(g)	变化率(%)	储量(g)	变化率(%)	储量(g)	变化率(%)	储量(g)	变化率(%)
CK	1.13b	—	3.61c	—	6.02a	—	4.68a	—	7.01a	—	2.35a	—
CF	1.62b	43.4	4.00bc	10.8	5.49a	-8.8	4.26a	-9.0	6.24a	-11.0	3.15a	34.0
OF	2.54a	124.8	5.11ab	41.6	6.66a	10.6	4.58a	-2.1	6.04a	-13.8	3.76a	60.0
BF	2.26a	100.0	5.47a	51.5	6.33a	5.1	4.18a	-10.7	5.06a	-27.8	4.06a	72.8

2.3 土壤团聚体不同粒径的有机碳贡献率

不同粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率可以直观地反映有机碳在团聚体中的分布。从图3中可以看出,大团聚体(>0.25 mm)的有机碳贡献率为61.9%~66.8%,不施肥(CK)和单施化肥(CF)在各粒级中的贡献率基本一致,表明土壤中有机碳主要分布在大团聚体中,单施化肥未能显著改变土壤团聚体内有机碳的分布;有机无机配施(OF和BF)在>2、1~2和<0.053 mm粒级的贡献率超过不施肥(CK)和单施化肥(CF),厩肥(OF)和生物有机肥(BF)有机碳贡献率变异度与不施肥(CK)相比分别降低了43.6%和45.7%,有机无机配施模式则有利于有机碳向大团聚体及黏粒小团聚体中迁移,提高土壤有机碳含量的同时,也改善了有机碳在团聚体各粒级的分布情况,有机碳养分贡献率相对均衡,增强了在团聚体中的稳定性。

整体来看,不同施肥间存在不同的差异,对比不同处理的前3个有机碳贡献粒径,不施肥(CK)和单施化肥(CF)为0.053~0.25、0.5~1和0.25~0.5 mm,厩肥(OF)和生物有机肥(BF)为0.5~1、0.053~0.25和1~2 mm;由此可知0.5~1和0.053~0.25 mm为土壤有机碳重要影响粒径,有机无机配施提升了1~2 mm粒级的贡献程度,不同施肥对土壤有机碳影响的粒径有差异,趋势为施用有机肥促进了大团聚体的形成,对土壤有机碳贡献更大。

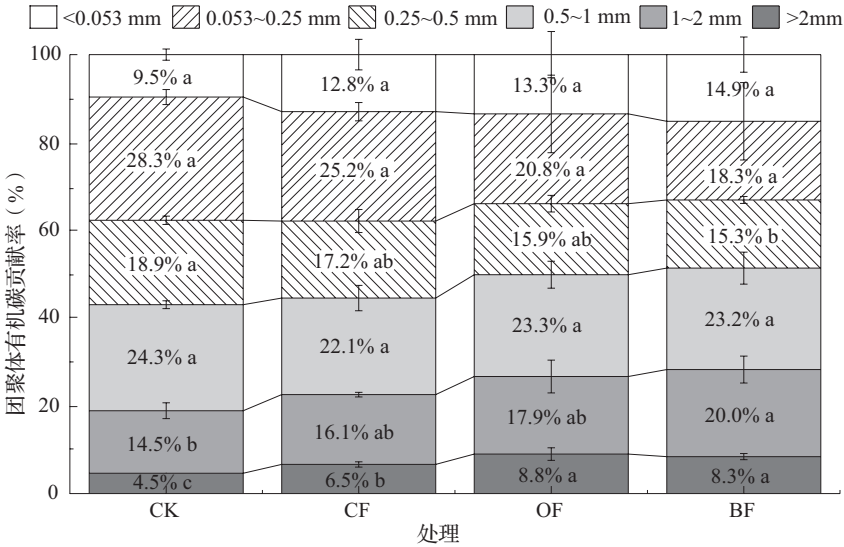
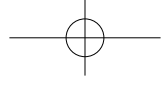


图3 团聚体内不同粒径有机碳贡献率



3 讨论

3.1 对土壤团聚体组成与稳定性的影响

团聚体是土壤中相互黏结紧密的颗粒集合体,土壤团聚体对土壤的透气性、排水性、保水性和植物根系生长有着重要影响^[16-17],土壤有机碳是影响土壤团聚体形成的胶结物质之一^[18]。有机肥的施用可促进土壤矿物质颗粒的团聚作用,提高土壤团聚体的水稳性,促进土壤中大颗粒团聚体(>0.25 mm)的形成,尤其以1~2 mm粒级增加的比例最大^[19]。陈昊等^[20]研究发现长期配施牛粪或秸秆还田有利于促进大团聚体的形成,提高团聚体的稳定性。本研究表明,施肥显著提高了>2、1~2和<0.053 mm的土壤团聚体粒径占比,对0.5~1、0.25~0.5、0.053~0.25和<0.053 mm的土壤团聚体影响较小;有机无机配施(OF和BF)与单施化肥(CK)相比,不同程度地降低了<0.25 mm的微团聚体的比例,提高了大团聚体的比例,其中0.053~0.25和>2 mm粒径的团聚体差异达到显著水平,外源有机物料可促进微团聚体形成更大的团聚体,配施生物有机肥(BF)处理的大团聚体提升比例更高,大团聚体的比例提升有利于提升土壤的养分供应能力,促进作物的生长发育^[21]。这与姜灿烂等^[22]研究发现的施用有机肥可提高>0.25 mm粒径占比的结果相似。

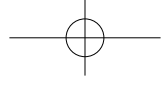
土壤团聚体MWD反映了团聚体的平均大小和分布情况,较大的MWD表明土壤中较大团聚体较多,土壤结构较好,稳定性较高^[23],土壤团聚结构受耕作模式、施肥种类及耕作年限等影响,施用有机肥可提高土壤团聚体的水稳性^[24-25]。本研究中,各处理的土壤MWD值为不施肥(CK)<单施化肥(CF)<化肥+厩肥(OF)<化肥+生物有机肥(BF),施肥提升了土壤大团聚体的占比,提升了土壤稳定性。各处理土壤GWD值表现与WMD趋势一致,但各处理间未达到显著水平。土壤团聚体MWD与GWD值与大粒级团聚体呈正相关,与小粒级呈负相关或不相关,长期有机无机配施(OF和BF)可促进微团聚体向大团聚体的转化,有助于形成大粒级团聚体,土壤粒径分布比较均匀;施用有机肥可有效增加土壤大团聚体的含量,改善土壤团聚体结构及其稳定性。

3.2 对土壤团聚体有机碳含量的影响

有机碳含量影响着土壤理化性质和作物生长,

表土中近90%的土壤有机碳位于团聚体内^[26],土壤团聚体是土壤有机碳的主要储存场所,土壤团聚体能维持土壤有机碳储量,保护有机碳免受微生物矿化分解^[27],不同的粒径团聚体对有机碳的固持能力存在一定的差异^[21, 28],本研究中,有机无机配施(OF和BF)处理的有机碳含量整体都高于不施肥(CK)和单施化肥(CF)处理,尤其是粒径在>2、1~2和0.5~1 mm的粒级中;施用有机肥有助于提升大团聚体中的有机碳的含量,化肥+厩肥(OF)处理的有机碳含量最高,这与王飞等^[29]、尚应妮等^[30]研究结果一致。在团聚体各粒级中,除0.25~0.5和0.053~0.25 mm粒径外,其他粒级中有机无机配施(OF和BF)处理的有机碳储量高于不施肥(CK)和单施化肥(CF)处理;化肥+厩肥(OF)处理在大多数粒径范围中的有机碳储量也明显高于化肥+生物有机肥(BF)处理,OF和BF处理有机碳投入量分别为315.5和165.2 kg/hm²,OF有机碳投入为BF的1.9倍,OF和BF处理有机碳增加量与常规施肥(CF)相比分别增加3.95和2.60 g/kg,有机碳增加比例为1.5倍,这表明长期有机无机配施有助于提高土壤团聚体中的有机碳储量,施用生物有机肥更有利于提高土壤团聚体内有机碳的含量。在所有处理中,大团聚体(>0.25 mm)的有机碳贡献率超过62.0%,表明大团聚体是有机碳主要储存粒级;单施化肥(CF)和不施肥(CK)的团聚体各粒级贡献率基本一致,单施化肥未能显著改变土壤团聚体内有机碳的分布;化肥+厩肥(OF)和化肥+生物有机肥(BF)处理各粒级有机碳贡献率变异度相比不施肥处理分别降低了43.6%和45.7%,有机无机配施模式有利于有机碳向大团聚体及黏粒小团聚体中迁移,提高土壤有机碳含量的同时,也改善了有机碳在团聚体各粒级的分布情况,增强了在团聚体中的稳定性,有机碳养分贡献度相对均衡。0.5~1和0.053~0.25 mm是土壤储存有机碳的主要粒级,也是土壤有机碳、全氮含量提升的关键,有机无机配施(OF和BF)进一步促进了微团聚体向大团聚体的转移,提升了大团聚体对土壤有机碳的贡献。张瑞等^[14]研究结果表明0.25~2和0.053~0.25 mm为主要粒级,本结果与其结果基本一致。

氮素的施用量对土壤有机碳和全氮含量的影响并不显著,这说明有机肥施用是土壤有机碳累积的重要措施,这主要是由于连续多年有机肥施用不仅



向土壤直接输入了有机碳源,而且也提高了微团聚体和大团聚体赋存有机碳的能力,同时也增强了土壤酶的活性和生物多样性,进而极大地提升了土壤有机碳的水平^[31]。有机无机配施(OF和BF)对比单一施肥处理(CF)提高了大团聚体有机碳组分的贡献率,因此,长期实施有机无机配施可发挥化肥和有机粪肥的双重作用,不仅可以促进土壤团聚体的形成和稳定,也可以增强土壤和团聚体的固碳、供碳能力。

4 结论

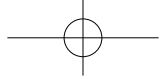
长期使用化肥和不施肥相比,团聚体粒级分布及内部有机碳分布差异不大;配施厩肥或生物有机肥比单施化肥促进了微团聚体向大团聚体的转化,提高了水稳性大团聚体(>0.25 mm)的占比,其中1~2 mm粒级的占比提升最多,明显降低了0.053~0.25 mm粒级的土壤水稳性团聚体含量;配施厩肥或生物有机肥改善了土壤团聚体的结构,土壤水稳性团聚体大团聚体含量(>0.25 mm)、MWD和GMD等稳定性,生物有机肥(BF)处理最佳。

长期有机无机配施提升土壤总有机碳含量10.5%~16.0%,其中生物有机肥的土壤固碳效果最好。所有处理中大团聚体(>0.25 mm)的有机碳贡献率超过62.0%,有机无机配施进一步提高了大团聚体内有机碳的贡献率,达到了65.9%,大团聚体是有机碳主要储存粒级。厩肥(OF)和生物有机肥(BF)处理有机碳贡献率变异度与不施肥(CK)相比分别降低了43.6%和45.7%,各粒级有机碳养分贡献率相对均衡,1~0.5和0.25~0.053 mm为土壤有机碳重要的影响粒径;化肥+厩肥(OF)有机碳投入量为化肥+生物有机肥(BF)的1.9倍,而土壤有机碳增加比例为1.5倍,长期有机无机配施有助于提高土壤团聚体中的有机碳储量,施用生物有机肥更有利于提高土壤团聚体内有机碳的含量。

结果表明,有机无机配施有助于提升土壤的养分供应能力和作物生长发育,是提升土壤团聚体稳定性的关键因素,有机无机配施提高了土壤有机碳的含量,改善了有机碳在团聚体各粒级的分布情况,使其在团聚体各粒级中的分布更为均衡,增强了其在团聚体中的稳定性,有机无机配施有利于有机碳向大团聚体及黏粒小团聚体中迁移,土壤各粒级组成更协调,提高土壤团聚体的水稳性,生物有机肥效果更好。

参考文献:

- [1] Simonetti G, et al. Characterization of humic carbon in soil aggregates in a long-term experiment with manure and mineral fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76 (3): 880-890.
- [2] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (3): 159-165.
- [3] 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, 39 (1): 355-362.
- [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 [J]. 土壤学报, 2006, 43 (5): 723-729.
- [5] 陈茜, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同施肥处理对设施土壤团聚体内颗粒有机碳含量的影响 [J]. 土壤, 2009, 41 (2): 258-263.
- [6] 徐倩倩. 不同种植年限设施土壤团聚体的变化特征及其影响因素研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- [7] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (10): 2837-2845.
- [8] 韩锦峰, 王凌, 张秀英, 等. 生物有机肥对烤烟生长发育及其产量和品质的影响 [J]. 河南农业科学, 1999 (6): 12-15.
- [9] 马爱国, 左伟标, 闫鼎, 等. 有机肥与复合肥配施对楚雄烤烟产量和质量的影响 [J]. 寒旱农业科学, 2023, 2 (4): 350-355.
- [10] 彭智良, 黄元炯, 刘国顺, 等. 不同有机肥对烟田土壤微生物以及烟叶品质和产量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2009, 15 (2): 41-45.
- [11] Carter M R, Gregorich E G. 土壤采样与分析方法 [M]. 北京: 工业电子出版社, 2022.
- [12] 鲍士旦, 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 白璐, 蒋福祯, 曹卫东, 等. 麦后复种绿肥对土壤有机碳及其固持特征的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39 (4): 148-154.
- [14] 张瑞, 王鸿飞, 吴怡慧, 等. 化肥与有机肥配施对设施土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (2): 1-9.
- [15] 易秀, 杨胜科, 胡安焱. 土壤化学与环境 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [16] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution, in methods of soil analysis [M] // Klute A. Method of soil analysis, part 1—physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, 1986: 425-442.
- [17] 聂文婷, 胡波. 土壤团聚体稳定性及其影响因素研究进展 [C] // 海峡两岸水土保持学术研讨会. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2014.



- [18] Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148: 22–28.
- [19] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 等. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (7): 1084–1096.
- [20] 陈昊, 马帅, 王小治. 土壤团聚体形成和稳定机理研究进展 [J]. *现代农业科技*, 2023 (2): 150–155.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2002 (1): 81–85.
- [24] Lvaro-Fuentes J, Avvue J L, Gracia R, et al. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions [J]. *Geoderma*, 2008, 145 (3): 390–396.
- [25] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响 [J]. *土壤*, 2011, 43 (2): 306–311.
- [26] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28 (4): 665–676.
- [27] Tang J, Davy A J, Wang W, et al. Effects of biogas slurry on crop yield, physicochemical properties and aggregation characteristics of lime concretion soil in wheat-maize rotation in the North China Plain [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22 (2): 2406–2417.
- [28] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I. 团聚体物理保护作用 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1063–1071.
- [29] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 不同施肥处理对黄泥田团聚体有机碳固持及其组分的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2023, 31 (2): 315–324.
- [30] 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, 239.
- [31] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (10): 2183–2193.

Effects of long-term combined organic-inorganic fertilizer application on soil aggregates and organic carbon

LUO Zhen-bao¹, LI Zhi-hong², ZHU Jing-wei³, LI Cai-bin¹, ZHANG Heng³, ZHAO Er-wei¹, DAI Jie¹, FAN Long¹, WANG Xin-xiu^{1*} (1. Guizhou Tobacco Company Bijie Company, Bijie Guizhou 551700; 2. Institute of Agricultural Resources and Agricultural Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Guizhou Tobacco Research Institute, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: To investigate the impact of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil aggregate stability and organic carbon content, a 14-year field experiment was conducted with four treatments: no fertilizer (CK), chemical fertilizer only (CF), chemical fertilizer plus farmyard manure (OF), and chemical fertilizer plus bio-organic fertilizer (BF). The study examined the effects of different fertilization practices on soil aggregate stability and organic carbon content. The results showed that: ① Fertilization (CF & OF & BF) increased the proportion of >2, 1–2, and <0.053 mm size fractions, and the combined organic-inorganic fertilization (OF & BF) further enhanced the proportion of larger aggregates (>0.25 mm), promoted the transformation of micro-aggregates into macro-aggregates. ② Combined organic-inorganic fertilization (OF & BF) improved the structure of soil aggregates, stability indexes of water-stable macro-aggregates such as large aggregate content (>0.25 mm) and stability indicators such as mean weight diameter and geometric mean diameter, with the best performance observed in the bio-organic fertilizer (BF) treatment. ③ Among all treatments, the contribution rate of organic carbon from macro-aggregates (>0.25 mm) exceeded 62.0%, with the combined organic-inorganic fertilization showing a contribution rate of over 65.9%. Macro-aggregates were the primary storage size class for organic carbon, with 0.5–1 and 0.053–0.25 mm being important size ranges affecting soil organic carbon. ④ Long-term combined organic-inorganic fertilization (OF and BF) increased the total soil organic carbon content, with bio-organic fertilizer being more beneficial for enhancing soil organic carbon levels. ⑤ Compared to no fertilizer (CK), the variability in the contribution rate of organic carbon from farmyard manure (OF) and bio-organic fertilizer (BF) decreased by 43.6% and 45.7%, respectively. The distribution of organic carbon in each particle size fraction of the soil was more coordinated, and the stability of aggregate was enhanced. The above results indicated that combined organic-inorganic fertilization was beneficial to the transformation of micro-aggregates into macro-aggregates, increased the proportion of soil macro-aggregates, and balanced the contribution of organic carbon nutrients among different aggregate size classes. The effect was more pronounced with the addition of bio-organic fertilizer, which could provide a basis for long-term fertilization management.

Key words: organic-inorganic application; flue-cured tobacco; long-term fertilization; organic carbon; aggregate