

有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响

俞巧钢¹, 杨艳^{1,2}, 邹平¹, 叶静¹, 张康宁^{1,3}, 顾国平⁴, 马军伟¹, 符建荣¹

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 3. 浙江师范大学化学与生命学院, 浙江 金华 321000; 4. 浙江省绍兴市农业科学研究院, 浙江 绍兴 312003)

摘要: 通过连续5年定位试验,以紫云英、秸秆和商品有机肥等有机物料还田的稻田土壤为对象,研究有机物料还田后不同物理分组下土壤组成特点和有机碳变化特征。结果表明,稻田土壤团聚体主要分布在2~0.25 mm与0.25~0.053 mm粒级,团聚体颗粒有机碳含量随着粒径的减小而减少。有机物料还田可提高0.25~0.053 mm和<0.053 mm粒级团聚体有机碳的含量,紫云英、秸秆、商品有机肥等有机物料可通过提高土壤微团聚体有机碳含量而增加土壤碳库。有机物料施用增加土壤轻组组分颗粒含量,减少重组组分颗粒含量,有助于土壤轻组组分的形成。稻田土壤轻组颗粒有机碳含量与>0.25 mm和<0.053 mm团聚体颗粒有机碳含量呈显著相关,与2~0.25 mm团聚体颗粒有机碳含量呈极显著相关。稻田土壤施用紫云英、秸秆和商品有机肥等有机物料,可有效提高土壤微团聚体和轻组成分颗粒含量,增加土壤微团聚体和轻组有机碳含量,改变稻田土壤有机碳库组成特征。

关键词: 稻田土壤; 有机碳; 土壤团聚体; 水稻秸秆; 紫云英; 有机肥

中图分类号: S152.4; X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)06-0170-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.028

Effect of Organic Materials Application on Soil Aggregate and Soil Organic Carbon in Rice Fields

YU Qiaogang¹, YANG Yan^{1,2}, ZOU Ping¹, YE Jing¹,

ZHANG Kangning^{1,3}, GU Guoping⁴, MA Junwei¹, FU Jianrong¹

(1. Institute of Environment Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agriculture Science, Hangzhou 310021; 2. College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300; 3. College of Chemistry and Life, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321000; 4. Shaoxing Academy of Agricultural Sciences, Shaoxing, Zhejiang 312003)

Abstract: By using a combination of multiple soil fractionation methods which does not destroy the basic structure of organic carbon physics group, a five consecutive years experiment was conducted to evaluate the effects of various types of organic materials, such as milk vetch, rice straw and organic poultry manure on soil organic carbon and its physical componets in paddy fields. The results shows that, soil aggregate was mainly distribution in the grade 2~0.25 mm and 0.25~0.053 mm, and the aggregate particle organic carbon concentration decreased with the decrease of particle size. The organic carbon storage in the 0.25~0.053 mm and <0.053 mm particle size aggregates increased by using different organic materials, and the treatment with milk vetch, straw and organic fertilizer all increased the amount of soil organic carbon. The results indicate that the organic material returning to the paddy soil can greatly increase the carbon storage in the soil micro aggregates. Returning organic material to the paddy soil increased the concentration of light fraction particles and reduced the concentration of the heavy fraction particles in soil. Organic materials application in the paddy soil is helpful for the formation of light fraction particles in soil. Among the different physical fractions in soil used for rice cultivation, light fraction organic carbon correlated significantly with >0.25 mm aggregate organic carbon and <0.053 mm aggregate organic carbon and highly significantly with aggregate organic carbon in the 2~0.25 mm size fraction. Returning organic material in the paddy soil can promote the formation and development of soil aggregates and the fixation of organic carbon, effectively improve the soil micro

收稿日期: 2017-06-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800500); 浙江省重大科技专项重点农业项目(2015C02011; 2015C02013); 国家自然科学基金项目(31172030)

第一作者: 俞巧钢(1973—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事农田土壤碳氮循环研究。E-mail: yqganghzzj@sina.com

通信作者: 符建荣(1957—), 男, 研究员, 主要从事农田土壤生态的相关研究。E-mail: fujr@mail.zaas.ac.cn

马军伟(1972—), 男, 研究员, 主要从事农业有机废弃物资源化利用研究。E-mail: majw111@126.com

aggregates and light fraction content, and increase the soil carbon storage in micro aggregates and light fraction organic carbon reserves, change the composition characteristics of organic carbon in paddy soil.

Keywords: paddy soil; organic carbon; soil aggregate; rice straw; milk vetch; organic poultry manure

土壤团聚体是维持土壤质量的重要物质基础之一,在调节土壤养分供应和保持抗蚀性方面具有重要作用。团聚体由不同粒径的土壤颗粒形成,对土壤的孔隙性、持水性和植物生长都有很好的调节作用,土壤有机碳固定也受不同粒级团聚体的影响^[1-2]。不同土壤密度土壤有机质,由于分解阶段不同、分解转化速率不同,腐殖质与土壤矿物呈现不同的化学结合,从而影响土壤有机碳的稳定性^[3]。稻田土壤团聚体稳定性很大程度上取决于有机、无机胶结物质对土粒胶结的能力,长期有机物料的施用还田可向土壤直接补充大量的活性有机物质,提升土壤微生物活性,改变稻田土壤团聚体的数量大小及其所含的有机碳分布^[3-6]。团聚体有机碳和轻组有机碳是土壤有机碳库中活性较大的部分,其性质不稳定,易被微生物利用和发生矿化分解,对评价土壤有机碳周转具有重要意义^[7-8]。团聚体分组按颗粒粒径大小分级,轻重组分组按颗粒密度分级,团聚体分组和轻重组分组同属于物理分组。土壤有机碳物理分组方法对有机碳结构破坏程度最小,分离的有机碳组分能够反映原状有机碳结构与功能,尤其反映有机碳周转特征^[9-10]。国内外对有机碳物理组分的研究主要针对不同施肥水平、施肥措施、不同耕作模式和不同耕作年限的土壤,分析其对团聚体有机碳的物理保护及稳定性的影响^[3-5,11-12]。由于有机物料施用的农田区域环境及还田施用年限的差异,施用有机物料对土壤物理组分有机碳的影响效果不一。传统方法对有机碳的研究一般采用单一的分组模式或纯化学模式,多种分组相结合的方法相对较少^[13-14]。本项研究以宁绍平原典型水稻种植区稻田土壤为对象,开展连续多年定位试验,通过团聚体粒径大小分级和团聚体密度分组方法,分析施用不同种类有机物料下土壤物理组分及其有机碳的变化特征,为农业生产中稻田有机物料的优化施用提供科学依据。

1.3 测定方法

土壤团聚体分级采用 Cambardella 等^[15]的湿筛法进行。利用自动振荡筛(套筛直径从上到下分别为 2,

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于浙江省宁绍平原绍兴越城区。试验区年降水量 1 500~1 600 mm,年蒸发量 1 000~1 100 mm,无霜期 240~250 d,年日照时数 1 900~2 000 h,年太阳辐射量 4 000~4 800 MJ/m²。试验土壤类型为宁绍平原典型青紫泥,耕层土壤容重 1.27 g/cm³,土壤有机质含量 31.5 g/kg,全氮含量 1.51 g/kg,碱解氮含量 98.32 mg/kg,有效磷含量 9.86 mg/kg,速效钾含量 101.2 mg/kg,pH 5.85。

1.2 试验设计

定位试验采用田间小区,每个小区有单独的排灌体系。试验小区小长 5 m,宽 4.5 m。采用当地典型的水稻—休闲轮作模式,通过施用不同有机物料开展研究。选用当地常规水稻绍梗—18,一般 6 月下旬至 7 月上旬移栽,11 月中旬收获。试验共设置 6 个处理:不施肥(CK)、常规施肥(CF)、秸秆还田(SR)、紫云英还田(MR)、商品有机肥(OM)和紫云英+商品有机肥(MOM)还田,每个处理重复 3 次。各试验小区施肥量见表 1。除不施肥处理外,各处理小区氮磷钾养分相等(有机物料所含氮磷钾按矿化率 50%计算其养分)。水稻秸秆在水稻收获后直接覆盖还田,紫云英在 4 月下旬覆压还田,商品猪粪有机肥在水稻移栽前 15 天施用。各处理所施的尿素分 3 次施用,基肥占 60%,第一次追肥(分蘖期)20%,第二次追肥(拔节期)20%。磷钾肥作为基肥施用。

在连续开展定位试验 5 年后采集各小区耕作层土壤,每小区采集代表性 5 点,充分混匀。新鲜土样经自然风干,其中一部分直接用于水稳定性团聚体分级,另一部分磨碎过 0.149 mm(100 目)筛,用于土壤轻重组分组。

表 1 试验处理有机物料和化肥用量					单位:kg/hm ²
处理	用量 (鲜重)	用量 (干重)	尿素 (N)	过磷酸钙 (P ₂ O ₅)	氯化钾 (K ₂ O)
不施肥(CK)	0	0	0	0	0
化肥(CF)	—	—	225	75.0	150.0
秸秆还田(SR)	9000	3150	165	18.0	111.0
紫云英还田(MR)	52500	7875	147	49.5	72.0
有机肥(OM)	—	6000	212	70.5	118.5
紫云英+有机肥(MOM)	26250(紫云英)	3000(有机肥)	156	33.8	91.5

0.25,0.053 mm)对土壤团聚体进行分级。分别称取原始风干土样 10 g,置于 2 mm 筛子上,在室温条件下用蒸馏水浸润 5 h,水面没过最上面的筛网,然后以 30

次/min 的速度在蒸馏水中上下振荡 3 min, 振幅为 3 cm, 振荡过程中保持最上层套筛的上边缘高于水面。将各筛上的团聚体分别冲洗到烧杯中, 获得 >2 , $2\sim0.25$, $0.25\sim0.053$ mm 的水稳性团聚体。筒内液体沉降 72 h 后弃去上清液, 将 <0.053 mm 水稳性团聚体转移至烧杯中。烧杯中的各级团聚体置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干, 称量, 计算各粒级水稳性团聚体颗粒的百分比组成。同时将烘干的团聚体磨细, 过 0.149 mm 筛, 采用 Elementar Vario ISOTOPE 元素分析仪 (德国 Elementar 公司) 测定不同粒级团聚体颗粒有机碳含量。将某一粒级团聚体颗粒含量与该粒级团聚体颗粒碳含量相乘求得对应粒级团聚体有机碳含量。

土壤轻重组有机碳分组^[16]。称取 5.00 g 过 2 mm 筛的风干土样置于 100 mL 离心管中, 使用密度为 1.8 g/cm^3 的 NaI 重液, 洗涤液使用的是 0.01 mol/L CaCl_2 溶液和蒸馏水。离心管内的土样加重液重复 2~3 次。得到轻组和重组组分分别在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下烘干至恒重, 称重后用研钵磨碎过 0.149 mm (100 目) 标准筛。采用 Elementar Vario ISOTOPE 元素分析仪测定轻重组组分有机碳含量。将轻(重)组颗粒含量与轻(重)组颗粒含碳量相乘求得轻(重)组有机碳含量。

1.4 数据统计

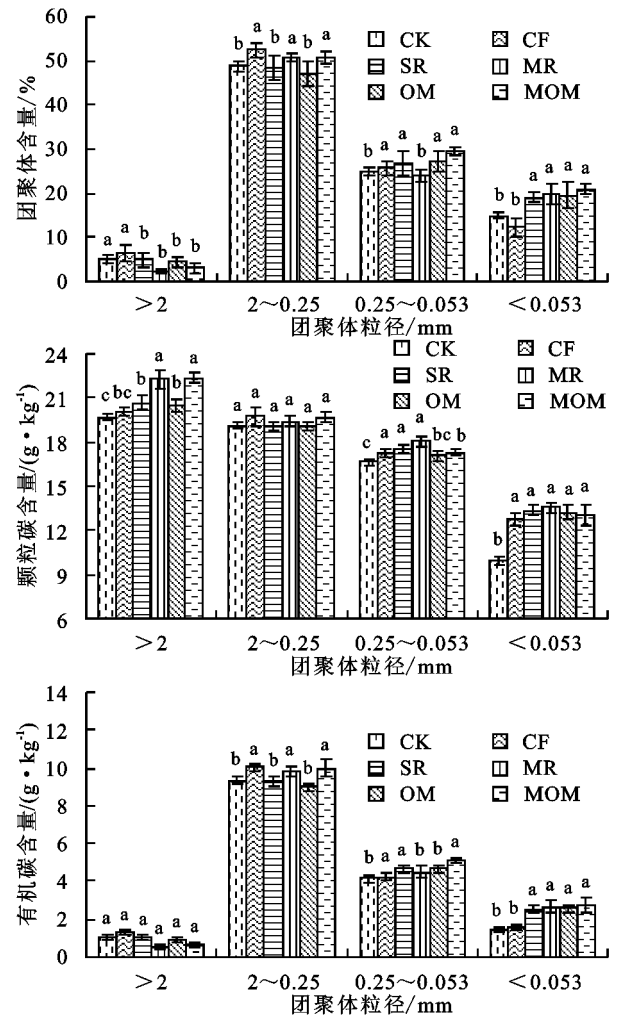
试验数据采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 新复极差法进行多重比较 (显著性水平 $P<0.05$); 用 Pearson 相关分析法分析轻组有机碳与不同粒径团聚体有机碳之间的相关关系。数据均用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料还田对水稻土壤团聚体各粒级有机碳含量的影响

从图 1 可见, 有机物料还田后, 土壤团聚体的分布仍以 $2\sim0.25$ mm 粒级最多, $0.25\sim0.053$ mm 和 <0.053 mm 粒级居中, >2 mm 粒级团聚体分布最少。CK、SR、MR、OM 和 MOM 处理不同粒级土壤颗粒含碳量均呈现从大粒级向小粒级递减的趋势。CF 处理中, $2\sim0.25$ mm 粒级的土壤颗粒含碳量为 20.43 g/kg , 比其最小粒级土壤颗粒含碳量高 35.8%。而 SR、MR、OM 和 MOM 处理中 >2 mm 团聚体颗粒碳含量比 <0.053 mm 团聚体颗粒碳含量分别高 35.3%, 39.4%, 35.5% 和 42.1%; >2 mm 粒级水稳性团聚体中, MR 和 MOM 处理的团聚体颗粒含碳量都比 CF 常规施肥处理高 10.3%; 在 $2\sim0.25$ mm 粒级中, CK、CF、SR、MR、OM 和 MOM 处理土壤颗粒含碳量差异不明显; $0.25\sim0.053$ mm 粒级中, SR、MR、

OM 和 MOM 处理的颗粒含碳量比 CK 处理分别提高 5.6%, 8.4%, 2.9% 和 4.3%。在 <0.053 mm 粒级的土壤中, SR、MR、OM 和 MOM 处理水稻土中颗粒碳含量比 CK 处理分别高 34.5%, 36.2%, 32.9% 和 30.7%。紫云英、秸秆、有机肥等有机物料连续还田施用后, 稻田土壤中微团聚体数量明显增加, 大团聚体中颗粒有机碳的浓度增加, 有机物料的还田施用促进了土壤团聚体的发育和有机碳的变化, 尤其是紫云英及紫云英和有机肥复合施用还田明显增加 >2 mm 粒级团聚体中颗粒有机碳的浓度。



注: 数据均以平均值表示, 同一列的不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

图 1 施用不同有机物料土壤团聚体有机碳含量分布

不同粒级团聚体中有机碳水平高低是稻田土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征, 对土壤肥力和土壤碳汇具有十分重要的意义^[4,6,11]。对不同粒级有机碳含量进行分析可知, 不同有机物料还田处理均在 $2\sim0.25$ mm 粒级中有机碳含量最高, 其次是 $0.25\sim0.053$ mm 粒级。 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量又高于 >2 mm 粒级团聚体有机碳含量, SR 和 MR 处理各粒级团聚体有机碳含量变化较为相近。与常

规施肥处理相比,采用有机物料还田处理均不同程度提高了 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级有机碳的含量,表明采用紫云英、秸秆、有机肥等有机物料还田,可通过提高土壤微团聚体有机碳含量而增加土壤碳库水平。

有机物料施入后,土壤 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体颗粒含量增加,并且这一粒级的团聚体有机碳含量增加。紫云英和秸秆还田,有助于根系的生长和真菌菌丝的物理延伸,将大团聚体崩裂,微团聚体受根系和真菌的作用也会形成粘合。紫云英还田、秸秆还田和有机肥的施入可使土壤有机碳的含量提高,大量有机质的输入作为胶结剂将微团聚体胶结成较大团聚体^[17]。并且,有机物料的输入改变了土壤基本 C/N,土壤中有大量植物残体的积累作为微生物碳源,改变微生物生命活动,进而产生引起土壤团聚体形成的黏合剂与载体,使稳定性团聚体数量发生改变,从而造成土壤团聚体分布向中间粒级过度的特征^[18]。

2.2 不同有机物料还田对土壤轻组有机碳影响

施用不同有机物料水稻土土壤轻组成分(Light Fraction, LF)和轻组有机碳的关系见图 2。SR、MR、OM、MOM 处理土壤轻组成分颗粒含量均大于 CF 和 CK 处理。与常规施肥处理 CF 相比,MR、SR、OM 和 MOM 处理土壤轻组成分颗粒含量分别增加 60.8%,43.7%,65.9%和 15.8%,MR 和 OM 处理轻组成分颗粒含量增加大于其他有机物料还田处理,表明采用有机物料还田可提高土壤轻组成分含量,其中尤以紫云英和有机肥还田提高土壤轻组成分颗粒含量最为明显。与 CF 和 CK 相比,不同有机物料施用后的土壤轻组颗粒含碳量发生了明显变化。MOM 处理土壤轻组颗粒含碳量比 CF 处理增加 10.5%;而 MR、SR、OM 处理土壤轻组颗粒含碳量则比 CF 处理分别降低 33.6%,13.4%和 27.8%,这说明采用紫云英和秸秆复合还田有助于提高土壤轻组颗粒含碳量。

从图 2 还可看出,不同有机物料还田均明显提高了土壤轻组有机碳的含量。与常规施肥 CF 处理相比,MR、SR、OM 和 MOM 处理土壤轻组有机碳含量分别提高 68.5%,51.8%,98.7%和 30.7%,以紫云英还田和施用有机肥处理最为明显,这说明有机物料的施用,可以明显增加土壤碳库中轻组有机碳的含量。

土壤轻组主要包括处于不同分解阶段的植物残体和微生物,轻组有机碳属于土壤中重要的活性碳组分,具有较高的 C/N 比和分解速率^[4,12,19]。土壤轻组有机碳的含量差异与加入有机物料碳源的生物有

效性有关,有机物料的施用增加了土壤中新鲜有机质,含有较高的生物活性物质,因此有机物料处理的土壤中轻组有机碳含量明显增加。长期定位试验采用单季水稻种植模式,在连续 5 年施用不同有机物料后,轻组成分颗粒含量增加十分显著。紫云英还田和商品有机肥的施用对土壤轻组颗粒含量增加最明显,而秸秆还田对土壤轻组成分颗粒含量增加低于紫云英。紫云英还田,秸秆还田和施加有机肥之后,在有机物料未分解前可对土壤耕层形成一层物理保护,有助于减少土壤轻组有机碳的分解^[20]。有机物料分解产生的化学粘合剂会促进有机碳的凝聚,促进团聚体的形成发育和有机碳的捕获固定,保护土壤轻组有机碳^[12]。紫云英、秸秆和商品有机肥等有机物料的施入,增加了土壤轻组成分颗粒的含量;同时由于有机物料的覆盖和腐化作用,形成更多的表面活性基团,使其更好的与土壤黏粒胶体结合,形成有机无机复合体结构,促进土壤团聚体的发育,土壤轻组有机碳含量明显增加,改变稻田土壤有机碳的组成特征。

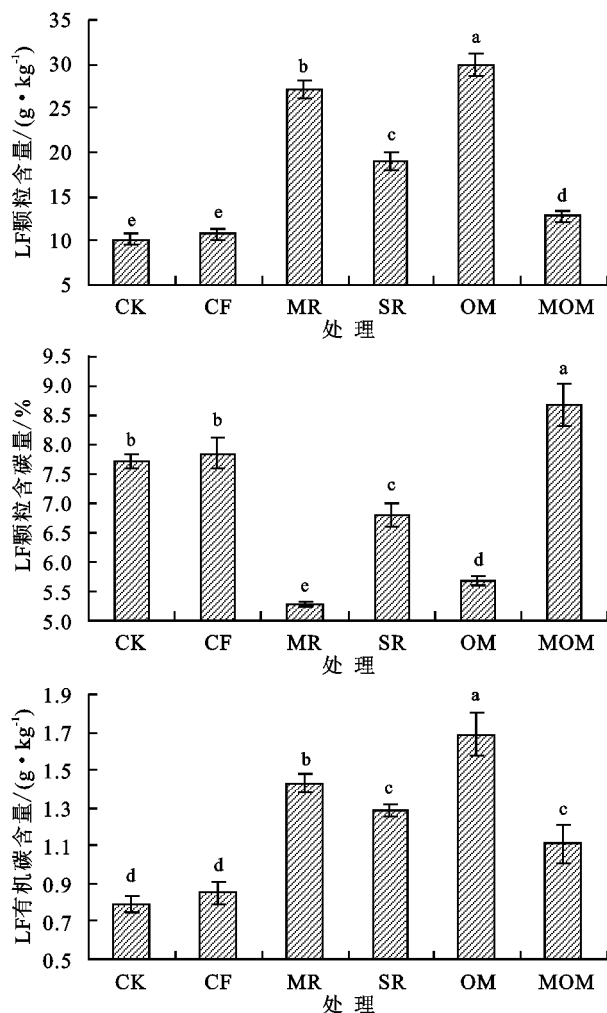


图2 施用不同有机物料水稻土轻组成分及其有机碳含量

2.3 不同有机物料还田对土壤重组有机碳含量的影响

土壤重组有机碳主要吸附在矿物表面或隐蔽在土壤微团聚体内部,其受耕作方式的影响较小^[4,12]。从图

3 可以看出,不同有机物料还田处理土壤重组组分(Heavy Fraction, HF)与土壤重组颗粒含碳量有所差异。SR、MR、OM、MOM 处理土壤重组成分颗粒含量均低于 CK 和 CF 处理,其中尤以 MR 和 OM 处理的重组成分颗粒含量最低。SR 处理土壤的重组颗粒含碳量为 1.91%,OM 处理土壤重组颗粒含碳量是 1.81%,MR 和 MOM 处理土壤重组颗粒含碳量为 1.72%和 1.73%。与常规施肥处理相比,紫云英有机物料的施用降低了土壤重组颗粒含碳量,秸秆还田提高了土壤重组颗粒含碳量。秸秆的施用,土壤中重组颗粒含碳量增加,使土壤重组有机碳含量得到积累。

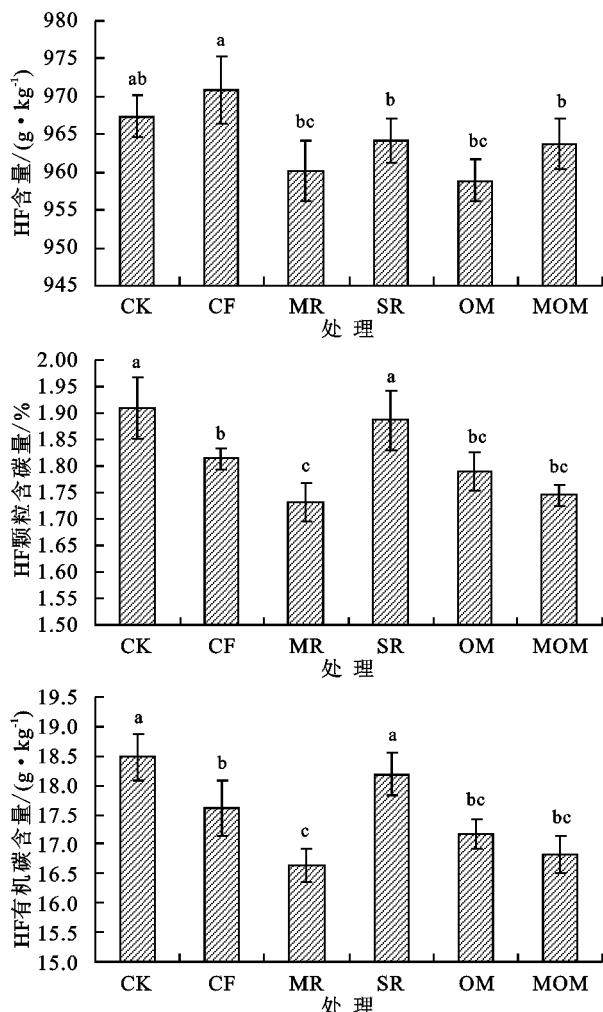


图 3 施用不同有机物料水稻土重组成分及其有机碳含量

2.4 不同有机物料还田土壤轻组颗粒有机碳与团聚体颗粒有机碳的相关分析

土壤轻组颗粒有机碳与不同粒径团聚体颗粒有机碳关系的分析有助于明确土壤结构型有机碳的分布。大团聚体为直径 >0.25 mm 的团聚状结构单位,而微团聚体为直径 <0.25 mm 的团聚状结构单位。相关分析发现,土壤轻组颗粒有机碳与大团聚体和微团聚体颗粒有机碳的相关系数为 0.662 和 0.228;土壤轻组颗粒有机碳与 >2 , $2\sim0.25$, $0.25\sim0.053$, <0.053 mm 团聚体颗粒有机碳的相关系数

分别为 0.472, 0.823, -0.359 , 0.636。不同有机物料还田土壤轻组颗粒有机碳和不同粒径团聚体颗粒有机碳相关性分析表明,土壤轻组颗粒有机碳与大团聚体颗粒有机碳含量 (>0.25 mm) 和 <0.053 mm 粒径团聚体颗粒有机碳含量间呈显著相关性 ($P<0.05$),与团聚体中 $2\sim0.25$ mm 粒径的团聚体颗粒有机碳含量间呈极显著相关性 ($P<0.01$),与 $0.25\sim0.053$ mm 粒径团聚体颗粒有机碳没有相关关系。这表明,稻田土壤施用紫云英、秸秆和商品有机肥等不同有机物料后,土壤轻组有机碳的增加主要分布在 $2\sim0.25$ mm 粒径,其次是 >2 mm 和 <0.053 mm 粒径;土壤轻组有机碳的增加在大团聚体中分布较多,而在微团聚体中分布相对较少。

3 结论

稻田施用不同有机物料后,土壤团聚体主要分布在 $2\sim0.25$ mm 与 $0.25\sim0.053$ mm 两个粒径,团聚体颗粒含碳量随着粒径的减小而减少。与常规施肥相比,采用紫云英、秸秆、有机肥等有机物料还田可提高 $0.25\sim0.053$ mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体有机碳的含量。稻田土壤施用有机物料,可明显提高土壤碳库中轻组有机碳的含量,有助于水稻土壤碳库中轻组有机碳的积累,其中秸秆的施用可使土壤重组颗粒有机碳得到积累。稻田土壤轻组颗粒有机碳与大团聚体颗粒有机碳 (>0.25 mm) 和 <0.053 mm 粒径团聚体颗粒有机碳含量呈显著相关性,与 $2\sim0.25$ mm 粒径团聚体颗粒有机碳含量呈极显著相关性,与 $0.25\sim0.053$ mm 粒径团聚体颗粒有机碳含量无相关性。紫云英、秸秆和商品有机肥等有机物料的施用,促进稻田土壤团聚体的形成发育,提高土壤微团聚体和轻组成分颗粒含量及其有机碳含量,改变水稻土土壤有机碳库的组成特征。

参考文献:

- [1] 何玉亭,王昌全,沈杰,等. 两种生物质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.
- [2] 周萍,宋国菡,潘根兴,等. 南方 3 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.
- [3] Das D, Dwivedi B S, Singh V K, et al. Long-term effects of fertilisers and organic sources on soil organic carbon fractions under a rice - wheat system in the Indo-gangetic plains of north-west India [J]. Soil Research, 2016, 55(3): 296-308.
- [4] 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[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828-838.
- [5] 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.
- [6] Chen Z, Wang H, Liu X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system [J]. *Soil Tillage Research*, 2017, 165(1):121-127.
- [7] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1):174-178.
- [8] Yin Y, Wang L, Liang C H, et al. Soil aggregate stability and iron and aluminium oxide contents under different fertiliser treatments in a long-term solar greenhouse experiment[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5):760-767.
- [9] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3):345-353.
- [10] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. *林业科学*, 2002, 38(4):19-29.
- [11] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20):4007-4015.
- [12] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18):5838-5846.
- [13] Holeplass H, Singh B R, Lal R. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70(2):167-177.
- [14] Fansler S J, Smith J L, Jr H B, et al. Distribution of two C cycle enzymes in soil aggregates of a prairie chronosequence [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42(1):17-23.
- [15] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3):777-783.
- [16] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6):1799-1806.
- [17] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳氮及溶解性有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1):240-246.
- [18] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):702-709.
- [19] 颜安, 李周晶, 武红旗, 等. 不同耕作年限对耕地土壤质地和有机碳垂直分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):291-295.
- [20] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):307-314.
- (上接第78页)
- [17] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4):64-67.
- [18] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. *土壤学报*, 2007, 4(1):7-13.
- [19] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. *Fuel & Energy Abstracts*, 2011, 84(1):70-78.
- [20] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6):40-45.
- [21] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5):65-68.
- [22] Flerchinger G N, Lehrsch G A, Mccool D K. Freezing and thawing processes[J]. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2005:104-110.
- [23] 王全九, 张江辉, 丁新利, 等. 黄土区土壤溶质径流迁移过程影响因素浅析[J]. *西北水资源与水工程*, 1999, 10(1):9-13.
- [24] 田坤, Huang C H, 王光谦, 等. 降雨一径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4):81-87.
- [25] Hairsine P B, Rose C W. Rainfall detachment and deposition: Sediment transport in the absence of flow-driven processes[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1991, 55(2):320-324.
- [26] Chou Y L, He B B. Effect of freezing and thawing on shear behavior and structural strength of artificially structural loess[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 19(1):6201-6212.
- [27] 夏艳华. 黄土抗侵蚀能力与抗剪强度关系研究[J]. *水利水电技术*, 2012, 43(9):119-122.