

有机肥增减施后红壤水稻土团聚体有机碳的变化特征^①

谢丽华, 廖超林*, 林清美, 唐 茹, 孙钰翔, 黎丽娜, 尹力初

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 利用一个长达 35 a 水稻土长期定位试验, 在保证原有定位试验继续正常开展的前提下, 将部分原化肥处理增施有机肥, 部分原有机肥处理改施化肥或者增施有机肥, 研究有机肥增减施后长期不同施肥红壤性水稻土团聚体有机碳变化特征及影响。结果显示: 红壤性水稻土以 >0.25 mm 团聚体为主; 长期不同施肥下土壤团聚体有机碳含量高低排序均表现为: >0.25 mm 团聚体 $>0.25 \sim 0.053$ mm 团聚体 $>(<0.053$ mm) 团聚体, 长期施用有机肥可提高红壤水稻土各粒级有机碳含量和 >2 mm 团聚体有机碳的贡献率。施肥对红壤性水稻土各粒径团聚体有机碳影响的大小排序为: <0.053 mm $<0.25 \sim 0.053$ mm $<(>2$ mm) $<2 \sim 0.25$ mm; 游离氧化铁和络合态铝对 $2 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体有机碳有着重要影响, 游离氧化铁在 >2 mm 团聚体的形成中发挥作用。增加有机肥施用量可提高 <2 mm 各粒级团聚体有机碳含量, 减施有机肥则显著降低各粒级团聚体有机碳含量。不管减施还是增施有机肥均导致 >2 mm 团聚体有机碳贡献率降低; 同时, 减施有机肥后 <2 mm 的各级团聚体有机碳贡献率提高, 而增施有机肥后 $2 \sim 0.25$ mm 团聚体有机碳贡献率提高。

关键词: 长期定位试验; 有机肥; 团聚体; 有机碳

中图分类号: S152.4+5 **文献标识码:** A

土壤团聚体是土壤最基本的结构单元和重要的土壤肥力指标^[1]。土壤团聚体的形成和稳定主要依靠有机、无机或有机无机复合等胶结物质的胶结作用, 增加土壤有机碳含量能有效地提高土壤的团聚能力。同时, 土壤团聚体是土壤有机碳形成和转化的重要载体并对有机碳的固定发挥着保护和稳定的作用^[2]。因此, 研究土壤团聚体有机碳的分布特征能够说明土壤有机碳固定效应及其保护机制^[3]。

农田表土中 90% 的土壤有机碳位于土壤团聚体内^[4]。多年来, 因水稻土类型、耕作及团聚体分组方法的不同, 学者们发现耕地土壤团聚体有机碳主要分布粒径出现差异。国外 Six 等^[5]和 Castro 等^[6]指出, 土壤中 >2 mm 团聚体中有机碳的含量最高。国内李恋卿等^[7]和 Huang 等^[8]最先发现团聚体有机碳存储于 $2 \sim 0.25$ mm 团聚体中; 张旭辉等^[9]发现淮北白浆土 $0.25 \sim 0.02$ mm 团聚体是土壤有机碳的主要载体; 谭文锋等^[1]发现江汉平原团聚体有机碳含量的峰值均出现在 $2 \sim 0.2$ mm 团聚体中, 且 >0.05 mm 粒径团聚体中有机碳的含量比 <0.05 mm 粒径的高; 徐文静

等^[10]研究黑土区水稻土表明, 土壤有机碳主要赋存在 >0.25 mm 团聚体, 尤其是 $2 \sim 0.25$ mm 团聚体中; 周萍等^[11]发现南方紫泥田、红黄泥和红壤性水稻土中均以 $2 \sim 0.2$ mm 和 <0.002 mm 颗粒中有机碳含量最高, 且两者有机碳占土壤总有机碳比例近似。施肥是决定土壤质量和农田生态系统可持续生产力和稳定性的基础^[12], 且施肥导致土壤团聚体组分及其有机碳含量发生变化。Lugato 等^[13]和毛霞丽等^[14]认为施肥能增加土壤各级团聚体中有机碳含量。然而, 各粒径团聚体有机碳含量对施肥的敏感程度有所不同^[15-16]。谭文锋等^[1]发现江汉平原粗粒径团聚体中的有机碳对土地利用方式的变化较为敏感; 李景等^[17]指出 >2 mm 团聚体有机碳较 $2 \sim 0.25$ mm、 $0.25 \sim 0.053$ mm 及 <0.053 mm 团聚体更易对耕作措施发生迅速反应; 徐文静等^[10]研究黑土区水稻土团聚体有机碳表明, >2 mm 团聚体中颗粒有机碳的敏感性更强, 且其敏感性随团聚体粒级的增大而增强。然而, 以上均是在长期施肥或不同土地利用方式下获得的研究成果; 同时在土壤团聚体有机碳影响方面,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571211)和湖南省高校科研重点项目(15A085)资助。

* 通讯作者(clliao@163.com)

作者简介: 谢丽华(1995—), 女, 湖南株洲人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量演变。E-mail: lhxie95@163.com

仅获得了土壤团聚体有机碳含量随着土壤总有机碳含量的升高而增加的结论^[16]。农业生产中施肥措施变化频繁,在施肥措施改变条件下土壤团聚体有机碳的变化效应如何?红壤性水稻土哪一粒级团聚体有机碳变化较敏感?铁铝氧化物与土壤团聚体有机碳呈何种关系?上述问题对于进一步解析稻田土壤固碳机理及探讨其对土壤未来固碳减排潜力的影响来说意义重大。本文以具有 35 a 历史的红壤性水稻土为研究材料,选择 3 个长期施肥处理(高量有机肥、常量有机肥、化肥)和 4 个施肥措施改变处理(高改化、常改高、常改化、化改常)的土壤,研究长期施肥后有机肥增减施对土壤团聚体有机碳变化特征及影响因素,以期对红壤性水稻土有机碳的管理及深入了解稻田生态系统碳循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试地概况

长期定位试验始于 1982 年,位于湖南农业大学逸苑小区(28°18'N, 113°08'E),年平均气温 17.2℃,年均降雨量 1 362 mm,供试土壤母土为长沙地区广泛分布的发育于第四纪红色黏土的耕型红壤,耕作制度为稻-稻-冬闲。试验设置 20 cm 与 80 cm 2 个不同地下水水位,每个地下水水位深度处理设高量有机肥、常量有机肥、全施化肥 3 个不同有机肥施用水平,共 6 个处理。每季水稻的施肥量为施氮 150 kg/hm², N:P₂O₅:K₂O = 1:0.5:1。化肥处理下 N、P、K 肥分别以尿素、氯化钾、过磷酸钙施入。高量、常量有机肥处理下分别以有机物料供应总 N 的 2/3、1/3;养分不足部分用化肥补足。2012 年早稻种植前,本研究利用 20 cm 地下水水位下 3 个不同施肥处理进行了施肥措施变更:从“常量有机肥”处理和“高量有机肥”处理中各随机选取 3 个小区,变更为化肥处理;同时从“常量有机肥”处理中另随机选取 3 个小区变更为高量有机肥处理;从“化肥”处理中随机选择 3 个小区变更为常量有机肥处理。由此,变更后的定位试验共包括 3 个原施肥处理:高量有机肥(HOM)、常量有机肥(NOM)、化肥(CF); 2 个减施有机肥处理:高改化(H-C)、常改化(N-C); 2 个增施有机肥处理:常改高(N-H)、化改常(C-N)共计 7 个处理。

1.2 土样采集与分析方法

1.2.1 样品采集与制备 定位试验施肥管理措施变更 4 a 后,于 2017 年 2 月早稻翻耕前,在每个处理中选取 3 个小区,每个小区随机选取 3 个采样点,用铁锹取下长宽高分别为 10、10、20 cm 的长方体原

状土柱组成混合土样,共计 21 个土样,轻放于硬质塑料盒,确保运输途中不受到挤压,以保持原状结构带回实验室。土样运回室内后,自然风干至土壤含水量到达土壤塑限(22%~25%)时,沿着自然缝隙将其掰成 10 mm 左右的土块,并挑出砾石、侵入体及植物残体等。

1.2.2 土壤基本理化性质测定 有关测定均按常规方法进行^[18],土壤有机碳:高温外热重铬酸钾氧化法;游离态氧化铁:柠檬酸钠-连二亚硫酸钠法提取,邻啡罗啉比色法测定;络合态氧化铝:焦磷酸钠提取剂提取,铝试剂比色法测定。

1.2.3 土壤团聚体分组 团聚体分离方法的选择可能影响团聚体的分布、微生物群落和有机碳的分布。本研究团聚体分离方法在 Six 等^[19]的基础上稍作修改,采用湿筛法进行土壤团聚体分组^[20]。掰碎的土壤样品自然完全风干后,采用四分法取 100 g 土样,蒸馏水浸没 4 h,赶出大团聚体中空气,以便于筛分;浸泡过的土样用 2 mm 不锈钢筛装取,并置于盛有蒸馏水的容器中,调整水面高度,使得筛子在筛分过程最高点时底部不脱离水面,最低点时筛口边缘超出水面。筛分仪器参数设定为:频率 25 次/min,振幅 3 cm,时长 5 min。筛分结束后,用蒸馏水将筛内残留部分冲洗至重量已知的烧杯内,并烘干、称重。通过 2 mm 筛子的部分按照相同操作步骤过 0.25 mm、0.053 mm 筛子,以此方法将土壤团聚体分成 >2 mm, 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 等 4 个粒级^[14,21]。

1.3 数据处理与统计分析

1.3.1 团聚体有机碳贡献率 某粒级团聚体有机碳贡献率计算如式(1)。

$$\text{Con}_i = w(\text{SAOC}_i) \times w(A_i) \times 100 / w(\text{SOC}_i)$$

式中: $w(\text{SAOC}_i)$ 为第 i 级土壤团聚体有机碳含量(g/kg); $w(A_i)$ 为第 i 级团聚体百分含量(%); $w(\text{SOC}_i)$ 为第 i 级团聚体所在土层土壤有机碳含量(g/kg)。

1.3.2 数据分析 试验所有数据采用 Excel 2010、SPSS 22.0 软件进行统计分析。数据统计进行方差和显著性检验(LSD),比较不同处理间在 $P < 0.05$ 的显著性水平。

2 结果

2.1 不同施肥处理下红壤性水稻土团聚体组成

由图 1 可知,不同施肥处理土壤团聚体的质量组成,均以 >2 mm 团聚体含量最高,为 465.01~697.61 g/kg,其次是 2~0.25 mm 团聚体含量(201.50~

316.43 g/kg), 0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 团聚体含量均较低, 变化范围分别为 67.65 ~ 127.19 g/kg 和 27.59 ~ 151.27 g/kg。各处理土壤中所有 >0.25 mm 粒径团聚体占团聚体总量的 72.20% ~ 89.71%, 是 <0.25 mm 粒径团聚体的 2.60 倍 ~ 8.72 倍。说明长期施肥及增减施有机肥后, 红壤性水稻土团聚体组成分布均以 >0.25 mm 团聚体为主。

2.2 不同施肥处理下红壤性水稻土各粒级团聚体有机碳分布

长期不同施肥土壤团聚体有机碳含量高低排序均表现为: >0.25 mm 团聚体>0.25 ~ 0.053 mm 团聚体>(<0.053 mm)团聚体。比较不同施肥处理相同粒级团聚体有机碳含量(表 1), 高量有机肥处理各粒级团聚体有机碳含量均高于常量有机肥处理, 但差异不显著; 而相较于化肥处理, 高量有机肥和常量有机肥处理不同粒级团聚体中有机碳含量显著($P<0.05$)提高: >2 mm 团聚体有机碳含量分别提高 35.23% 和

35.03%, 按粒径大小, 其他 3 个粒级团聚体的提高量分别为 43.54% 和 38.93%, 42.37% 和 34.92%, 35.52% 和 25.62%。表明较大粒径的团聚体具有较高的有机碳含量, 同时施用有机肥可提高红壤水稻土各粒级有机碳含量。

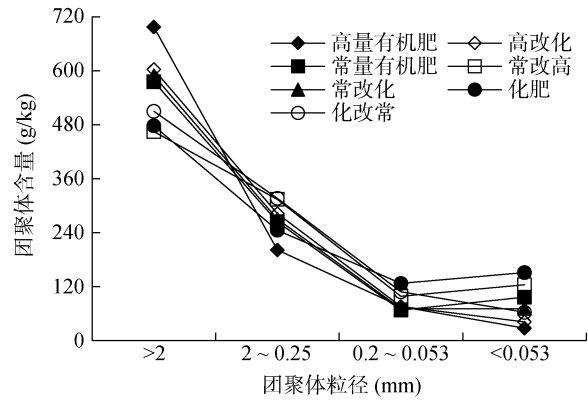


图 1 土壤团聚体组成分布
Fig.1 Distribution of soil aggregates composition

表 1 不同施肥处理下各粒级团聚体有机碳分布(g/kg)
Table1 Distribution of soil aggregate organic carbon (SAOC)under different fertilization treatments

施肥处理	>2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	27.29 ± 2.41 a	28.32 ± 3.77 a	24.46 ± 2.28 a	14.23 ± 2.79 a
高改化	21.53 ± 2.41 b	22.26 ± 1.72 b	18.02 ± 0.32 c	11.74 ± 0.69 bc
常量有机肥	27.25 ± 0.93 a	27.41 ± 3.44 a	23.18 ± 0.18 ab	13.19 ± 0.79 ab
常改化	23.19 ± 2.16 b	23.01 ± 1.76 b	21.24 ± 1.56 b	12.29 ± 1.40 abc
常改高	27.10 ± 1.48 a	28.27 ± 3.27 a	23.68 ± 1.43 ab	13.57 ± 0.63 ab
化肥	20.18 ± 0.16 b	19.73 ± 0.81 b	17.18 ± 1.18 c	10.50 ± 0.28 c
化改常	20.23 ± 1.83 b	21.48 ± 0.43 b	18.20 ± 1.84 c	10.74 ± 0.35 c

注: 表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平, 下表同。

有机肥增减施后, 各粒级团聚体有机碳含量发生明显变化(表 1)。相较于常量有机肥和化肥处理, 增施有机肥处理(常改高和化改常)中, 各粒级团聚体有机碳含量整体呈小幅度上升趋势: >2 mm 团聚体有机碳含量基本不变, 2 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳含量分别升高 3.14% 和 8.87%, 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体有机碳含量分别升高 2.16% 和 5.94%, <0.053 mm 团聚体有机碳含量分别升高 2.88% 和 2.29%, 差异并不显著。相较于原处理(高量有机肥和常量有机肥), 减施有机肥处理(高改化和常改化)中各粒级团聚体有机碳含量明显下降, 具体表现为: 高改化和常改化处理中 >2 mm 团聚体有机碳含量分别下降 21.11% ($P<0.05$)和 14.90%, 2 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳含量分别下降 21.40% ($P<0.05$)和 16.05% ($P<0.05$), 0.25 ~ 0.053 mm 及 <0.053 mm 团聚体有机碳含量分别下降 26.33% ($P<0.05$)和 8.37%、17.50% ($P<0.05$)

和 6.82%, 且差异均显著。总的来说, 增加有机肥施用量的处理(常改高和化改常处理)可提高 <2 mm 各粒级团聚体有机碳含量, 而减施有机肥的处理(高改化和常改化处理)则会显著降低各粒级团聚体有机碳含量。

2.3 不同施肥处理下红壤性水稻土团聚体有机碳贡献率

长期不同施肥红壤水稻土团聚体有机碳贡献率(表 2), 从 >2 mm 到 <0.053 mm, 随着团聚体粒径的减小, 有机碳贡献率依次降低, 且不同施肥处理 >2 mm 团聚体有机碳贡献率变化范围在 54.72% ~ 64.81% 之间, 说明长期不同施肥及增减施有机肥后红壤性水稻土有机碳均以 >2 mm 团聚体有机碳为主, 且随着团聚体粒径的减小, 其有机碳含量在红壤性水稻土有机碳含量中占比降低。比较长期不同施肥处理相同粒级团聚体有机碳贡献率, >2 mm 团聚体

有机碳贡献率在常量有机肥处理中最高,其次是高量有机肥处理,而其他粒级团聚体有机碳贡献率均表现为:化肥处理>常量有机肥处理>高量有机肥处理,且差异随粒级减小逐渐明显。相较于化肥处理,高量有机肥和常量有机肥中 >2 mm 团聚体有机碳贡献率分别提高 9.46% 和 11.01%,而其他团聚体有机碳贡献率按团聚体粒径从大到小,有机碳贡献率分别降低 20.67% 和 0.69%, 45.86%($P<0.05$)和 39.11%($P<0.05$), 80.52%($P<0.05$)和 46.51%($P<0.05$)。表明施用有机肥能显著降低 <2mm 的各粒级团聚体有机碳贡献率,提高 >2 mm 团聚体有机碳的贡献率。

从施肥管理措施改变后的结果来看(表 2),相较于原处理(常量有机肥和化肥),增施有机肥处理中的常改高处理和化改常处理中 2~0.25 mm 团聚体有机碳贡献率提高,提高率分别为 14.01% 和 8.65%;其他 3 个粒径团聚体有机碳贡献率下降:>2 mm 团聚体总有机碳贡献率下降 15.57% 和 3.73%, 0.25~0.053 mm 团聚体有机碳贡献率分别降低 0.32% 和

9.92%, <0.053 mm 团聚体总有机碳贡献率降低 3.79% 和 61.82%($P<0.05$)。相较于原处理(高量有机肥和常量有机肥),高改化处理中各粒级团聚体有机碳贡献率提升-7.97%~77.46% 不等,其中 >2 mm 团聚体有机碳贡献率下降 7.97%, 2~0.25 mm 团聚体有机碳贡献率提高 25.69%, 0.25~0.053 mm 团聚体有机碳贡献率提高 30.43%, <0.053 mm 团聚体有机碳贡献率大幅提高 77.46%;常改化处理中,各粒级团聚体对总有机碳贡献率提升 -28.79%~53.05% >2 mm 团聚体总有机碳贡献率显著降低 28.79%($P<0.05$), 2~0.25 mm 团聚体和 0.25~0.053 mm 团聚体有机碳贡献率分别上升 22.79% 和 42.88%, <0.053 mm 团聚体总有机碳贡献率显著提高 53.05%($P<0.05$)。总的来说,不管减施还是增施有机肥均导致 >2 mm 团聚体有机碳贡献率降低;同时,减施有机肥导致较小粒径的各级团聚体有机碳贡献率提高,而增施有机肥导致 2~0.25 mm 团聚体有机碳贡献率提高,0.25~0.053 mm 的团聚体及<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率降低。

表 2 不同施肥处理下各级团聚体有机碳对全土有机碳的贡献率(%)
Table 2 Contribution rates of SAOC to total soil organic carbon under different fertilization treatments

施肥处理	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	63.90 ± 5.84 a	21.84 ± 1.79 b	5.62 ± 2.02 c	1.73 ± 0.47 c
高改化	58.81 ± 7.27 a	27.45 ± 4.15 ab	7.33 ± 2.18 abc	3.07 ± 1.67 bc
常量有机肥	64.81 ± 8.36 a	27.34 ± 2.13 ab	6.32 ± 1.10 bc	4.75 ± 0.46 b
常改化	46.15 ± 2.98 b	33.57 ± 5.35 a	9.03 ± 2.10 ab	7.27 ± 0.49 a
常改高	54.72 ± 3.14 ab	31.17 ± 1.82 a	6.30 ± 0.95 bc	4.57 ± 1.98 b
化肥	58.38 ± 7.49 ab	27.53 ± 8.99 ab	10.38 ± 2.74 a	8.88 ± 0.83 a
化改常	56.20 ± 9.09 ab	29.91 ± 7.25 ab	9.35 ± 1.39 ab	3.39 ± 0.37 bc

2.4 不同施肥处理下红壤性水稻土铁铝氧化物与团聚体有机碳相关关系

不同施肥处理下红壤性水稻土游离氧化铁及络合态铝含量如表 3。游离氧化铁含量在长期不同施肥处理中的高低排序为:化肥>高量有机肥>常量有机肥;增施有机肥处理的常改高和化改常分别较原处理升高和降低 10.93%、5.58%;减施处理的高改化与原处理持平,常改化则显著增加 12.52%。络合态铝含量在长期不同施肥处理中的高低排序为:高量有机肥>常量有机肥>化肥;增施有机肥处理中,常改高和

化改常分别较原处理降低和升高 8.10%、7.76%;减施处理的高改化和常改化则分别下降 5.49% 和 11.46%。总体上,化肥处理中增施有机肥游离氧化铁含量降低,有机肥减施为化肥则增加,络合态铝则表现为相反的变化特征。

铁铝氧化物与土壤有机碳相关关系分别如图 2、图 3。>2 mm 及 2~0.25 mm 团聚体有机碳含量分别与游离态氧化铁含量呈极显著和显著负相关关系,说明 >2 mm 及 2~0.25 mm 团聚体有机碳含量受土壤游离态氧化铁的影响,且随着土壤游离氧化铁含量的

表 3 不同施肥处理下全土游离氧化铁及络合态铝含量
Table 3 Contents of free iron oxide and chelated aluminum in soil under different fertilization treatments

项目	高量有机肥	高改化	常量有机肥	常改高	常改化	化肥	化改常
游离氧化铁(mg/kg)	28.27 ± 1.03 bc	28.17 ± 0.64 bc	25.95 ± 3.42 c	28.79 ± 1.10 b	29.20 ± 1.07 ab	31.76 ± 1.35 a	29.99 ± 0.55 ab
络合态铝(mg/kg)	0.82 ± 0.06 a	0.78 ± 0.02 a	0.81 ± 0.04 a	0.75 ± 0.10 a	0.72 ± 0.03 a	0.73 ± 0.11 a	0.78 ± 0.04 a

注:表中同行数据小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平。

降低而升高；此外，2 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳含量还受土壤络合态铝的影响，且随着络合态铝含量的增加而显著升高。

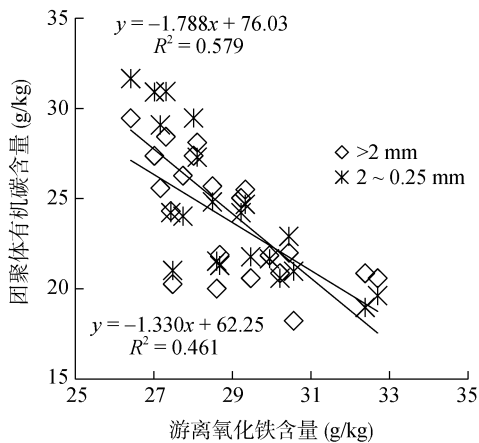


图 2 土壤团聚体有机碳与游离氧化铁相关关系
Fig. 2 Correlation between SAOC and free iron oxide

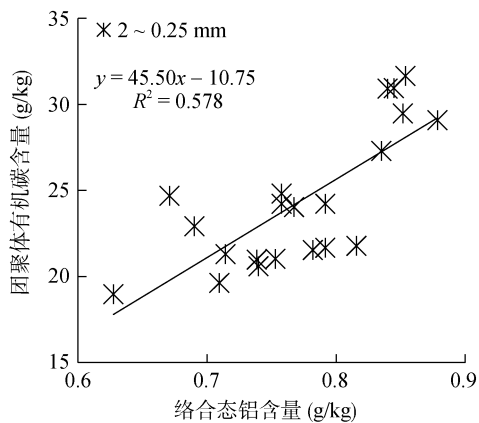


图 3 土壤团聚体有机碳与络合态铝相关关系
Fig. 3 Correlation between SAOC and chelated aluminum

3 讨论

3.1 长期不同施肥红壤性水稻土团聚体及其有机碳分布

施肥特别是施用有机肥在增加土壤总有机碳的同时，可促进水稻土大团聚体含量增加，减少微团聚体含量^[22]，提升不同粒径团聚体有机碳含量，且对 >0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量的提升幅度要高于 <0.25 mm 粒径^[16]；同时，毛霞丽等^[17]指出大团聚体因具有较强的碳固定能力，从而导致大团聚体有机碳含量较高和所占土壤总有机碳比例较大。本试验表明，长期施肥及增减施有机肥后的红壤性水稻土 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 粒径团聚体含量分别占 46.50% ~ 69.76% 和 20.15% ~ 31.64%，是团聚体组成的主要粒级；施用有机肥在提高红壤性水稻土各粒级有机碳含

量的同时，表现出 >0.25 mm 团聚体有机碳的含量较高，而 <0.053 mm 团聚体有机碳含量最低的特征，其结果导致 >2 mm 团聚体有机碳含量占土壤总有机碳含量比例较高，成为红壤性水稻土有机碳主要存储粒级，其结果与前人研究一致^[5-6]。其原因是：施用化肥主要通过增加作物产量和作物残茬量，以及促进根系分泌及根的周转来提高土壤有机碳的输入量；而施用有机肥一方面可直接向土壤输入有机碳，另一方面又能提升土壤酶活性和土壤生物多样性，从而极大地促进土壤有机碳含量的提升^[23-24]；土壤总有机碳增加在提高各粒径团聚体有机碳含量的同时，由于各粒径团聚体的固碳能力存在差异，>0.25 mm 团聚体，尤其是 2 ~ 0.25 mm 团聚体对有机碳的固定能力强，从而促进了 >0.25 mm 团聚体的形成和其有机碳含量的增加；而 <0.25 mm 团聚体在参加形成大团聚体的同时，由于 <0.25 mm 的微团聚体尤其是 <0.053 mm 团聚体仅是黏粒对有机碳的物理保护作用，固碳能力弱^[25]，其结果导致 <0.25 mm 粒径团聚体及其有机碳含量减少，进而导致水稻土 >0.25 mm 团聚体有机碳贡献率增大，而 <0.25 mm 团聚体相反。

3.2 有机碳及铁铝氧化物对红壤性水稻土团聚体有机碳分布的影响

土壤总有机碳含量与各粒径团聚体有机碳含量呈正相关关系^[26-28]，施肥导致土壤有机碳增加，但对各粒径团聚体有机碳含量的影响存在显著差异，施肥对 >0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量的提升幅度要高于 <0.25 mm 粒径^[16]。本研究表明土壤总有机碳含量与土壤各粒径团聚体含量均呈显著正相关关系（图 4），红壤性水稻土各级团聚体有机碳含量随着土壤总有机碳含量的增加而升高，其与 >2 mm、2 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.053 mm 及 <0.053 mm 团聚体有机碳含量的相关关系斜率分别为 0.731 4、0.931、0.619 2 和 0.314；相关系数 R^2 分别为 0.786 6 ($P < 0.01$)、0.885 8 ($P < 0.01$)、0.640 4 ($P < 0.01$) 和 0.541 9 ($P < 0.05$)，表明施肥对红壤性水稻土的团聚体有机碳影响最大的是 2 ~ 0.25 mm 粒径团聚体，依据其影响的高低排序分别是 >2 mm、0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体；从而 2 ~ 0.25 mm 粒径团聚体对施肥影响最敏感，而 <0.053 mm 粒径团聚体的敏感性最弱，该结果与周萍和潘根兴^[22]及毛霞丽等^[14]结果一致。

此外，Pan 等^[29]和 Zhou 等^[30]分别指出铁铝氧化物对水稻土中有机碳的固定和化学稳定有重要的贡献，本研究证实了这一说法，红壤性水稻土 2 ~ 0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量与土壤游离氧化铁

和络合态铝含量分别呈显著($P<0.01$)负、正相关关系,说明红壤性水稻土游离氧化铁和络合态铝对 2~0.25 mm 粒径团聚体有机碳有着重要影响,红壤性水稻土铁铝氧化物及土壤有机质共同参与土壤团聚体的团聚过程^[31],本研究相关分析表明土壤总有机碳含量分别与土壤游离氧化铁及络合态铝含量呈显著($P<0.01$)负、正相关关系(图 5),可能是由于施肥后土壤有机碳的增加导致土壤铁铝氧化物形态转化,其中游离氧化铁含量降低而络合态铝含量升高,促进了 2~0.25 mm 粒径团聚体的形成。此外,>2 mm 团聚体有机碳含量与游离氧化铁含量呈显著负相关关系,

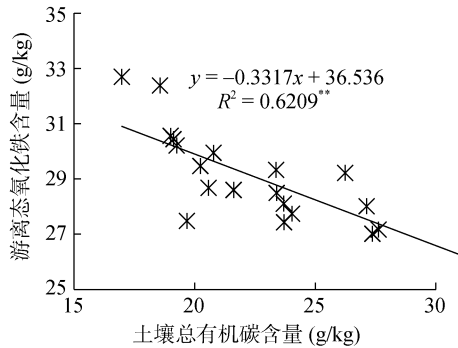


图 5 土壤总有机碳与游离氧化铁及络合态铝相关关系
Fig. 5 Correlation between TOC with free iron oxide and chelated aluminum

3.3 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体有机碳变化的影响

长期施用有机肥可以显著提高稻田土壤各粒级团聚体中有机碳的含量^[32],其原因在于有机肥的使用增加了土壤有机碳的输入,从而改变了土壤团聚体有机碳含量和分配比例^[25]。有机肥的增减施导致土壤总有机碳的变化,张蕾等^[33]指出增施有机肥后红壤性水稻土有机碳含量显著升高,而减施有机肥后土壤有机碳含量显著降低,其原因在于有机物料投入的增减,从而改变土壤团聚体有机碳的含量。本研究表明各粒径团聚体有机碳变化存在差异,增施有机肥(常改高和化改常)后 >2 mm 团聚体有机碳含量维持不变,2~0.25 mm 团聚体有机碳含量上升幅度最大,分别是 3.14% 和 8.87%,0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 团聚体有机碳含量上升幅度较小,分别是 2.16% 和 5.94%,2.88% 和 2.29%;众多学者研究发现,新积累的碳多储存于 >0.25 mm 的大团聚体中,且活性颗粒有机碳优先被较大粒径的团聚体包裹^[34-35],增施有机肥输入的新碳首先被 >0.25 mm 的大团聚体截获,且 2~0.25 mm 团聚体有机碳稳定性高于 >2 mm 团聚体^[36],同时,配施化肥会导致土壤酸化,加速土壤团聚体的周转速率,引起土壤有

表明游离氧化铁自该粒径团聚体的形成中发挥作用。

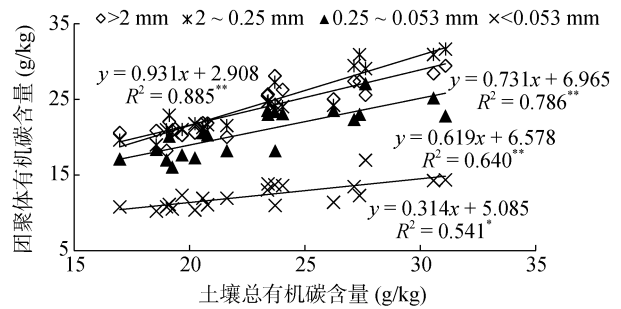
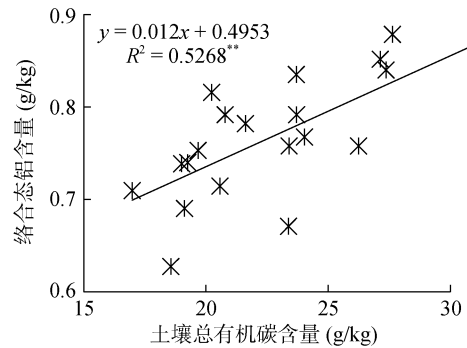


图 4 土壤团聚体有机碳含量与总有机碳含量相关关系
Fig. 4 Correlation between SAOC and total organic carbon



机碳的矿化分解和损失^[37],从而导致增施有机肥后 2~0.25 mm 团聚体有机碳含量升降幅度高于 >2 mm 团聚体;>2 mm 团聚体有机碳含量不变,可能与团聚体有机碳含量已达到其饱和储碳量有关。减施有机肥(高改化和常改化)后土壤有机质含量降低,相应的化肥施用量升高,>0.25 mm 团聚体内颗粒态有机碳矿化分解速度和损失量大,导致 >2 mm 和 2~0.25 mm 团聚体有机碳含量差异减小,从而减施有机肥后两者有机碳含量降幅持平;0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 团聚体有机碳含量随着有机肥的增减施而升降,且升降幅度小于 >0.25 mm 的大团聚体,可能与其受土壤有机碳输入量影响的敏感性弱、黏粒物理保护及铁铝氧化作用较大有关。土壤有机碳含量随着有机肥的增减施而升降,其结果导致土壤团聚体的团聚和破坏。本研究表明不管减施还是增施有机肥后,红壤性水稻土 >2 mm 团聚体有机碳贡献率均降低;就增施有机肥而言,可能是红壤性水稻土有机碳伴随团聚体的团聚作用而进入团聚体内,新输入的有机碳短时间内以促进 2~0.25 mm 团聚体形成为主,从而 >2 mm 团聚体的质量分数减小;减施则导致红壤性水稻土部分 >2 mm 团聚体因有机碳含量降低而破坏分散;两种施肥措施的结果均导致红壤性水稻土 >2 mm 团

聚体的质量分数降低,有机碳贡献率降低。同理,增施有机肥导致 >0.25 mm 团聚体形成,其质量分数增大,有机碳贡献率升高,而 <0.25 mm 团聚体质量分数相应减少,有机碳贡献率降低;减施有机肥则导致 >0.25 mm 团聚体破坏分散,较小粒径团聚体的质量分数相应增大,有机碳贡献率升高。因此,增施有机肥导致 $2 \sim 0.25$ mm 团聚体有机碳贡献率升高, <0.25 mm 团聚体有机碳贡献率降低,而减施有机肥导致 <2 mm 的各粒级团聚体有机碳贡献率升高。

4 结论

1)红壤性水稻土以 >0.25 mm 团聚体为主。较大粒径的团聚体具有较高的有机碳含量,土壤有机碳则以 >2 mm 团聚体有机碳为主;长期施用有机肥可提高红壤水稻土各粒级有机碳含量及 >2 mm 团聚体有机碳的贡献率,降低 <2 mm 的各粒级团聚体有机碳贡献率。

2)施肥对红壤性水稻土 $2 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体有机碳影响最大,依据其影响的高低排序分别是 >2 mm、 $0.25 \sim 0.053$ mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体;游离氧化铁和络合态铝对 $2 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体有机碳有着重要影响,游离氧化铁在 >2 mm 团聚体的形成中发挥作用。

3)增加有机肥施用量可提高 <2 mm 各粒级团聚体有机碳含量,减施有机肥则显著降低各粒级团聚体有机碳含量。不管减施还是增施有机肥均导致 >2 mm 团聚体有机碳贡献率降低;同时,减施有机肥后 <2 mm 的各级团聚体有机碳贡献率升高,而增施有机肥后 $2 \sim 0.25$ mm 团聚体有机碳贡献率升高。

参考文献:

[1] 谭文峰,朱志锋,刘凡,等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973-980

[2] 王峻,薛永,潘剑君,等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121-127

[3] 潘根兴,李恋卿,张旭辉,等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-618

[4] Karami A, Homaee 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(4): 22-28

[5] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant & Soil, 2002, 241(2): 155-176

[6] Castro Filho C, Louren O A, Guimares M F, et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 65(1): 45-51

[7] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报, 2000, 31(5): 193-195

[8] Huang S, Rui W Y, Peng X X, et al. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil[J]. Nutrient Cycling of Agroecosystems, 2010, 86(1): 153-160

[9] 张旭辉,李恋卿,潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-19

[10] 徐文静,丛耀辉,张玉玲,等. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 210-216

[11] 周萍,宋国菡,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. 团聚体物理保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1063-1071

[12] 戚瑞敏,赵秉强,李娟,等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 118-127

[13] Lugato E, Simonetti G, Morari F, et al. Distribution organic and humic carbon in wet sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment[J]. Geoderma, 2010, 157(3): 80-85

[14] 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

[15] 魏宇轩,蔡红光,张秀芝,等. 不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 257-263

[16] 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

[17] 李景,吴会军,武雪萍,等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 378-386

[18] 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

[19] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in a forested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 1981-1987

[20] Elliott T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(7): 627-633

[21] 苑亚茹. 不同土地利用与施肥管理对黑土团聚体中有机碳的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013

[22] 周萍,潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 256-261

- [23] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1431-1438
- [24] Jiang M B, Wang X H, Liusui Y H, et al. Diversity and abundance of soil animals as influenced by long-term fertilization in grey desert soil, China[J]. Sustainability, 2015, 7: 10837-10853
- [25] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841-1848
- [26] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1473-1480
- [27] 戴珏, 胡君利, 林先贵, 等. 免耕对潮土不同粒级团聚体有机碳含量及微生物碳代谢活性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 923-930
- [28] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2019(3): 1-14
- [29] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2003, 10: 79-92
- [30] Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. Role of chemical protection by binding to oxyhydrates in SOC sequestration in three typical paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China[J]. Geoderma, 2009, 153(1): 52-60
- [31] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2588-2596
- [32] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041
- [33] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1399-1406
- [34] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-427
- [35] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 353-360
- [36] 周萍, Alessandro Piccolo, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究——两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 398-405
- [37] 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 & Biochemistry, 2011, 43: 657-666

Characteristics of Soil Aggregate Organic Carbon (SAOC) in Paddy Soil After Increasing or Reducing Input of Organic Fertilizer

XIE Lihua, LIAO Chaolin*, LIN Qingmei, TANG Ru, SUN Yuxiang, LI Lina, YIN Lichu

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: A long-term location experiment of 35 a paddy soil was utilized, with part of fertilization treatments changed to study the characteristics and influences of soil aggregate organic carbon(SAOC) under different fertilization treatments after increasing or reducing the input of organic fertilizer. The results showed that: red paddy soil was dominated by >0.25 mm aggregates; the contents of SAOC under different long-term fertilization treatments was characterized by: >0.25 mm macro-aggregates>0.25-0.053 mm microaggregates(<0.053 mm)silty clay, meanwhile, the application of organic fertilizer increased organic carbon contents of different sizes of aggregates and the contribution rate of >2 mm aggregate organic carbon. The influence of fertilization on organic carbon of different sizes aggregates was ranked as follows: <0.05 mm <0.25-0.05 mm<(>2 mm)<2-0.25 mm; free iron oxide and chelated aluminum had important effects on organic carbon of 2-0.25 mm aggregates, and free iron oxide played a role in the formation of >2 mm aggregates. Increasing the input of organic fertilizer can increase the organic carbon content of <2 mm aggregates at each grain level, reducing the input of organic fertilizer significantly reduced organic carbon content of aggregates. Regardless of reducing or increasing the input of organic fertilizer, the contribution rate of organic carbon in >2 mm macro-aggregates decreased; at the same time, the contribution rate of organic carbon in <2 mm aggregates after organic fertilizer reduction was increased, and the contribution rate of organic carbon in aggregates of 2-0.25 mm was increased after organic fertilizer application.

Key words: Long-term location experiment; Organic fertilizer; Aggregates; Organic carbon