

后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响^①

张 艺, 戴 齐, 尹力初*, 谷忠元

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要: 利用一个长达 30 a 且已进行适当变更的长期定位施肥试验, 改施 C₄ 玉米秸秆以替代 C₃ 水稻秸秆, 运用 $\delta^{13}\text{C}$ 自然丰度方法, 研究长期施用高量有机肥、常量有机肥、化肥及当其施肥措施改变(化肥改为常量有机肥、常量有机肥改为高量有机肥、高量有机肥改为化肥、常量有机肥改为化肥)3 a 后对红壤性水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响。结果表明: 在所有施肥处理条件下红壤性水稻土团聚体分布以大团聚体(>0.25 mm)为主, 占 72.48% ~ 86.33%。与施用化肥 30 a 相比, 长期施用常量有机肥、高量有机肥有利于促进红壤性水稻土粗大团聚体(>2 mm)的形成, 并提高团聚体平均重量直径(MWD)。团聚体中有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增大, 大团聚体更有利于有机碳富集。长期常量有机肥、高量有机肥处理下红壤性水稻土中有机碳主要贮存在粗大团聚体(>2 mm)中, 而长期化肥处理下以细大团聚体(2 ~ 0.25 mm)对土壤有机碳贡献率最高。外源新碳施入量越多, 全土和各粒径团聚体新碳含量越高, 且外源新碳主要分布在大团聚中。在后续施肥措施改变 3 年后, 增加有机肥施入量(化改常、常改高)>2 mm 粗大团聚体、MWD、全土及各粒径团聚体中有机碳含量将分别显著提高 7.08% ~ 73.13%、5.38% ~ 44.22%、14.53% ~ 38.50%、0.70% ~ 35.86%; 而减少有机肥施入量(高改化、常改化)则与之相反, 分别降低 28.17% ~ 43.20%、21.17% ~ 31.54%、17.54% ~ 27.30%、11.49% ~ 29.77%。因此, 在我国南方红壤性稻作区的农业生产过程中应继续或加大施用有机肥, 从而进一步维持或改善土壤结构, 提高土壤有机碳含量。

关键词: 喀长期定位试验; 红壤性水稻土; 土壤团聚体; 土壤有机碳; ^{13}C ; 施肥改变

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

土壤结构是调控土壤物理、化学和生物过程及土壤有机碳分布的重要因素之一, 是土壤肥力的基础。土壤团聚体作为土壤结构的最基本单元, 在保证和协调土壤中的水肥气热, 影响土壤酶的种类和活性, 维持和稳定土壤疏松熟化层等方面至关重要^[1]。土壤团聚体与土壤有机碳二者之间相互作用, 相互影响, 密不可分。前者为后者提供存在场所及物理保护, 后者为前者提供形成所必需的胶结物质。施肥作为最普遍的农田管理措施, 在对土壤团聚体分布、土壤有机碳含量、团聚体有机碳关系等方面有着至关重要的影响。邱佳颖等^[2]对红壤性水稻土水稳性团聚体分布及其固碳特征进行了研究, 认为施用秸秆和粪肥均显著促进了土壤大团聚体形成并提高了团聚体的稳定性, 但团聚体所固持的有机碳含量与其粒级大小没有显著的线性相关关系。安婷婷等^[3]系统地分析了施肥

对棕壤团聚体组成及其有机碳分布的影响, 发现长期施用有机肥增加了土壤中大团聚体的数量及其有机碳含量, 有利于土壤表层有机碳的固定。向艳文等^[4]研究表明, 水稳性大团聚体对土壤有机碳具有强富集和物理保护作用, 长期化肥和稻草配合施用能显著提高大团聚体内有机碳含量和储量。袁颖红等^[5]研究表明, 长期连续施用无机肥、有机肥和无机肥与有机肥配施对土壤有机碳在团聚体内的分布有较大影响, 且较大微团聚体内含有较多的新形成有机物质。以往的研究结果已充分证实外源有机物料的投入有利于土壤大团聚体的形成及有机碳含量提高。但对于那些经长期施用有机肥培肥而土壤结构发达的高肥力土壤, 当其后续施肥措施改变时, 其土壤团聚体组成、有机碳分布是否会发生不合理的改变, 还有待进一步论证。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371250)和湖南省研究生科研创新项目(CX2015B267)资助。

* 通讯作者(lcyin0418@sohu.com)

作者简介: 张艺(1992—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳平衡研究。E-mail: 798762135@qq.com

目前, $\delta^{13}\text{C}$ 方法已经广泛用于研究土壤有机碳动态变化。与其他研究土壤有机碳周转方法相比, $\delta^{13}\text{C}$ 方法不仅具有无放射性, 标记均匀和可长期标记等优点外, 更能直接计算出土壤或其组分中不同植物来源有机碳的比例和数量^[5]。以往的研究大多采用室内培养试验的方法, 通过添加 $\delta^{13}\text{C}$ 标记的玉米秸秆研究有机碳的分解速率及周转情况^[7-8]。但室内的试验条件与田间实际情况相差较大, 不能完全说明土壤有机质的转化过程。由此, 本研究依托湖南农业大学一个长达 30 a 且已进行适当变更的长期定位施肥试验, 分析长期施用高量有机肥、常量有机肥、化肥及改变施肥措施(化肥改为常量有机肥、常量有机肥改为高量有机肥、高量有机肥改为化肥、常量有机肥改为化肥)3 a 后对红壤性水稻土团聚体分布及有机碳周转的影响, 并通过改施 C_4 玉米秸秆以替代 C_3 水稻秸秆, 运用 $\delta^{13}\text{C}$ 田间自然丰度方法, 计算土壤有机碳更新比例, 以期改善红壤性水稻土结构, 提高红壤性水稻土肥力, 促进稻作农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 长期定位试验概况

本研究所利用长期定位试验的设置详情见张蕾等^[9]。简而言之, 本定位试验起始于 1982 年, 其母质为长沙地区广泛分布的第四纪红色黏土, 耕作制度为稻-稻-冬闲。定位试验起始之初设置了高量有机肥、常量有机肥、化肥等 3 个处理, 共 36 个小区。每季水稻的施肥量为施 N 150 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O=1 : 0.5 : 1。化肥处理下氮、磷、钾肥分别以尿素、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氮的 2/3、1/3; 养分不足部分用化肥补足。2012 年栽植早稻前, 本定位试验管理人员利用 3 个不同施肥处理重复数量相对较多的优势对该定位试验进行了变更。即: 从“常量有机肥”处理(NOM, normal organic material)和“高量有机肥”处理(HOM, high organic material)各随机选取 3 个小区, 然后变更为化肥处理, 得到“常改化”处理(N-C, chemical fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment)和“高改化”处理(H-C, chemical fertilization treatment changed from original high organic fertilization treatment); 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, 得到“常改高”处理(N-H, high organic fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment); 从“化肥”处理(CF,

chemical fertilizer)中随机选择 3 个小区变更为常量有机肥处理, 得到“化改常”处理(C-N, normal organic fertilization treatment changed from chemical fertilization treatment)。由此, 变更后的定位试验共包含 7 个处理, 即原有的 3 个处理(高量有机肥、常量有机肥、化肥)及新增加的 4 个处理(高改化、常改化、常改高、化改常)。2012 年以后该定位试验所用的有机物料从水稻秸秆变更为玉米秸秆(粉碎并过 10 mm 筛), 其 C、N、P、K 含量分别为 449.8、10.44、5.93、12.61 g/kg, 有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -12.6‰, 常量或高量有机肥处理下每年的秸秆用量分别为 9.58、19.16 t/hm²。近 5 a 来种植的早稻、晚稻品种分别为湘早粳 15、VY46。早稻于每年 4 月下旬移栽, 7 月上旬收获, 而晚稻于 7 月中旬移栽, 10 月底收获。每小区植稻 35 株。2012 年 4 月采集供试小区耕作层土壤(0 ~ 15 cm)测定其基本理化性质指标, 变更施肥措施前高量有机肥、常量有机肥、化肥处理的土壤有机碳含量及氮、磷、钾含量见表 1。

表 1 变更施肥措施前土壤有机碳含量及氮、磷、钾含量
Table 1 Contents of soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, potassium before changing fertilization measure

处理	有机碳 (g/kg)	pH	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)
高量有机肥	20.46	5.51	1.39	1.31	12.50
常量有机肥	18.67	5.33	1.57	1.32	12.49
化肥	14.45	5.58	1.70	1.29	12.47

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集 于 2015 年 4 月栽植早稻前, 在每个小区中随机确定 3 个采样点, 用切刀切下长×宽×高=5 cm × 5 cm × 15 cm 的原状土柱, 轻放于塑料盒子并避免土块相互挤压。将带回土样风干至土壤塑限(含水量约为 22% ~ 25%)时, 把土块沿着自然缝隙轻轻掰成大小不同的团块, 使其通过 8 mm 筛, 拣去作物残根和小石头等异物, 在室温下继续风干, 土样风干后测定土壤团聚体组成及其他性质。

1.2.2 土壤团聚体分级 团聚体的分级采用湿筛法^[10]。新鲜土样自然风干后, 依次过 2、0.25 和 0.053 mm 筛。具体操作为: 称取大约 100 g 风干土置于 2 mm 的筛子上放于盆内, 调整盆内水面的高度, 使筛子移动到最高位置时团聚体刚好淹没在水面以下。待土样在水面下浸泡 5 min 后开启团聚体筛分仪, 在 2 min 内上下摆动 50 次, 摆幅为 3 cm。将留在筛上的物质用蒸馏水洗至烧杯中, 通过筛子的土和水进行下一级团聚体的分离, 操作步骤同上。分离出的不同大小团聚体土样在 60℃ 下烘干, 称量, 备用。

1.2.3 有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定 土壤全土有机碳含量及各粒径团聚体有机碳含量均采用元素分析仪测定(Elementar II, 德国), 其原理是土壤有机碳在高温条件下燃烧释放出 CO_2 , 并用 TCD 监测器检测其碳含量。土壤和玉米秸秆有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值用同位素质谱仪(Finnigan MAT251, Thermo Electron) 测定。

1.2.4 结果计算与统计分析 $\delta^{13}\text{C}$ 值是描述样品与标准化合物相比较 ^{13}C 自然丰度变异程度的指标。 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围从 -40‰ ~ -23‰ , 平均为 -27‰ ; C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围从 -19‰ ~ -9‰ , 平均为 -12‰ ^[11]。当改施 C_4 玉米秸秆替代 C_3 水稻秸秆时, 就导致了土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值改变, 根据单位时间内 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化程度, 就可以计算出土壤有机碳更新比例。土壤全土有机碳(或各粒径团聚体有机碳)中来源于玉米秸秆新碳的比例的计算公式为^[12]:

$$f(\%) = (\delta - \delta_{\text{CK}}) / (\delta_{\text{L}} - \delta_{\text{CK}}) \times 100 \quad (1)$$

式中: δ 为添加玉米秸秆后土壤全土有机碳(或各粒径团聚有机碳)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; δ_{CK} 为未添加玉米秸秆时土壤全土有机碳(或各粒径团聚有机碳)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; δ_{L} 为玉米秸秆碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

根据全土或不同粒径土壤团聚体有机碳总量(C), 那么有机碳总量中来自玉米秸秆新碳(C_{N})部分为:

$$C_{\text{N}} = f \times C \quad (2)$$

平均重量直径(MWD):

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n x_i \times m_i \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 个筛子上团聚体的平均直径, m_i 是第 i 个筛子上颗粒百分比。

团聚体对土壤有机碳的贡献率 = (某级团聚体中有机碳含量 \times 某级团聚体的含量) / 土壤总有机碳含量 $\times 100\%$ (4)

所有测定结果用 Excel 进行整理和初步分析, 用 SPSS 进行方差分析, 多重比较采用 LSD 检验, 显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布及其稳定性的影响

不同粒径土壤团聚体在改善土壤结构和固定养分等方面发挥着不同的作用^[13]。如表 2 所示, 各施肥处理下 < 0.053 mm 粉黏粒含量最少, 占土壤干重的 $4.35\% \sim 8.77\%$; $0.25 \sim 0.053$ mm 微团聚体含量为 $8.01\% \sim 18.68\%$; $2 \sim 0.25$ mm 细大团聚体含量为 $32.71\% \sim 47.88\%$; > 2 mm 粗大团聚体含量为 26.50%

$\sim 53.57\%$ 。其中 > 0.25 mm 大团聚体比例为 $72.48\% \sim 86.33\%$, 是红壤性水稻土团聚体主要组成部分。

30 a 长期不同施肥处理下土壤团聚体的组成存在显著差异($P < 0.05$)。相对于化肥处理, 高量有机肥处理、常量有机肥处理下 > 2 mm 粗大团聚体的含量分别为化肥处理的 2.02 倍和 1.76 倍; $2 \sim 0.25$ mm 细大团聚体的含量则分别降低了 28.86%、19.57%; $0.25 \sim 0.053$ mm 微团聚体的含量分别降低了 57.12%、41.27%; 而 < 0.053 mm 粉黏粒的含量也以化肥处理相对较高。团聚体的平均重量直径(MWD)体现了土壤结构的稳定性, 反映了土壤结构状况。长期不同施肥处理下 MWD 大小为: 高量有机肥处理(3.07 mm) $>$ 常量有机肥处理(2.79 mm) $>$ 化肥处理(1.90 mm)。与化肥处理相比, 高量有机肥处理、常量有机肥处理下 MWD 分别提高了 61.6%、46.8%。

后续施肥措施改变也显著影响了土壤团聚体的分布。与高量有机肥处理相比, 高改化处理下 > 2 mm 粗大团聚体含量降低了 28.17%, 其他团聚体组分含量提高了 24.95% ~ 65.17%; MWD 降低了 21.17%。与常量有机肥处理相比, 常改高处理下 > 2 mm 粗大团聚体含量提高了 7.08%, 其他团聚体组分含量降低了 2.00% ~ 17.46%, MWD 提高了 5.38%; 而常改化处理下 > 2 mm 粗大团聚体含量降低了 43.20%, 其他团聚体组分含量提高了 29.48% ~ 69.28%, MWD 降低了 31.54%。与化肥处理相比, 化改常处理下 > 2 mm 粗大团聚体含量提高了 73.13%, 其他团聚体组分含量降低了 19.38% ~ 39.45%; MWD 提高了 44.22%。因此, 在后续施肥措施改变 3 a 的过程中, 增加有机肥施入量(如常改高、化改常)将显著增加 > 2 mm 粗大团聚体含量而相应减少其他团聚体组分含量, 并显著提高 MWD。而减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将显著增加其他团聚体组分含量而相应降低 > 2 mm 粗大团聚体含量, 并显著降低土壤 MWD。

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体中有机碳含量的影响

土壤不同粒径团聚体中有机碳含量是土壤有机碳矿质化作用与腐质化作用动态平衡的微观表征, 在保持土壤肥力和稳定土壤碳汇等方面具有重要意义。由表 3 可以看出, 各施肥处理下土壤团聚体中有机碳含量因粒径而异。随着土壤团聚体粒径逐渐减小, 其有机碳含量呈现出降低趋势, 其中粗大团聚体(> 2 mm) $>$ 细大团聚体($2 \sim 0.25$ mm) $>$ 微团聚体($0.25 \sim 0.053$ mm) $>$ 粉黏粒(< 0.053 mm)。

表 2 不同施肥处理对土壤团聚体分布及其稳定性影响
Table 2 Effects of different fertilization treatments on distribution and mean weight diameters of soil aggregates

处理	MWD(mm)	团聚体分布(%)			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	3.07 ± 0.07 a	53.57 ± 1.84 a	32.71 ± 1.80 d	8.01 ± 0.64 e	5.62 ± 0.42 bcd
高改化	2.42 ± 0.08 c	38.48 ± 1.40 c	40.87 ± 1.50 b	13.23 ± 2.24 b	7.42 ± 0.50 ab
常改高	2.94 ± 0.17 ab	50.09 ± 4.12 ab	36.24 ± 3.05 c	9.33 ± 0.61 de	4.35 ± 0.94 d
常量有机肥	2.79 ± 0.20 b	46.78 ± 4.58 b	36.98 ± 3.38 bc	10.97 ± 1.72 cd	5.27 ± 2.17 cd
常改化	1.91 ± 0.15 d	26.57 ± 1.89 d	47.88 ± 3.57 a	18.57 ± 0.69 a	7.05 ± 1.26 ab
化改常	2.74 ± 0.02 b	45.88 ± 0.70 b	37.07 ± 1.84 bc	11.74 ± 0.97 bc	5.31 ± 0.23 cd
化肥	1.90 ± 0.06 d	26.50 ± 3.72 d	45.98 ± 3.58 a	18.68 ± 0.66 a	8.77 ± 1.03 a

注：同列不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著，下同。

30 a 长期定位施肥后,全土中有机碳含量随着有机肥用量增加而提高。与化肥处理相比,高量有机肥处理和常量有机肥处理分别使全土中有机碳含量增加了 10.46、6.96 g/kg,各处理之间差异达到显著水平($P < 0.05$)。各粒径团聚体组分中有机碳含量也随有机肥施用量的增加而相应提高。与化肥处理相比,高量有机肥处理、常量有机肥处理下 >2 mm 粗大团聚体中有机碳含量分别提高了 66.98% 和 40.98%; 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体中有机碳含量分别提高了 76.91% 和 48.36%; 0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体中有机碳含量分别提高了 64.14% 和 58.78%; <0.053 mm 粉黏粒中有机碳含量分别提高了 37.44% 和 25.64%。

后续施肥措施改变也显著影响了全土及各粒径

团聚体中有机碳含量。与高量有机肥处理相比,高改化处理下全土及各粒径团聚体中有机碳含量分别降低了 27.30%、16.32% ~ 29.77%。与常量有机肥处理相比,常改高处理下全土及各粒径团聚体中有机碳含量分别提高了 14.53%、0.70% ~ 15.17%; 常改化处理下则分别降低了 17.54%、11.49% ~ 18.51%。与化肥处理相比,化改常处理下全土及各粒径团聚体中有机碳含量分别提高了 38.50%、20.90% ~ 35.86%。因此,在后续施肥措施改变 3 a 的过程中,增加有机肥施入量(如常改高、化改常)将显著增加全土及各粒径团聚体中有机碳含量,而减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将显著降低全土及各粒径团聚体中有机碳含量。

表 3 不同施肥处理对土壤团聚体中有机碳含量影响(g/kg)
Table 3 Effects of different fertilization treatments on organic carbon contents in soil aggregates

处理	全土有机碳	各团聚体有机碳			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	23.11 ± 0.69 a	24.53 ± 0.76 a	24.29 ± 1.38 a	17.76 ± 1.14 a	10.72 ± 0.70 a
高改化	16.80 ± 0.29 cd	18.91 ± 0.62 c	17.06 ± 0.29 c	14.38 ± 1.14 b	8.97 ± 0.54 b
常改高	22.46 ± 0.81 a	23.82 ± 1.53 a	23.46 ± 0.38 a	17.30 ± 0.75 a	10.42 ± 0.41 ab
常量有机肥	19.61 ± 0.36 b	20.71 ± 0.48 b	20.37 ± 0.75 b	17.18 ± 0.38 a	9.80 ± 0.36 b
常改化	16.17 ± 0.53 d	18.33 ± 0.49 c	16.98 ± 1.25 c	14.00 ± 0.85 b	8.09 ± 0.61 c
化改常	17.52 ± 0.52 c	19.41 ± 0.68 bc	17.26 ± 0.92 c	14.70 ± 0.73 b	9.43 ± 0.44 b
化肥	12.65 ± 0.48 e	14.69 ± 0.64 d	13.73 ± 0.53 d	10.82 ± 0.32 c	7.80 ± 0.36 c

2.3 不同施肥处理中土壤团聚体对全土有机碳的贡献率

如表 4 所示,不同粒径土壤团聚体对全土有机碳的贡献率有显著差异。各施肥处理下 < 0.053 mm 粉黏粒对全土有机碳贡献率最小,约占总量的 1.96% ~ 3.93%; 0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体约占总量的 6.19% ~ 17.97%; 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体约占总量的 34.31% ~ 50.28%; >2 mm 粗大团聚体约占总量的 30.12% ~

56.90%。长期高量有机肥处理、常量有机肥处理下以 >2 mm 粗大团聚体对全土有机碳的贡献率最高,分别达到了 56.90%、49.36%; 而长期化肥处理下以 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体的贡献率最高,达到了 47.88%。

后续施肥措施改变也显著影响了各粒径土壤团聚体对全土有机碳的贡献率。与高量有机肥处理相比,高改化处理下 >2 mm 粗大团聚体的贡献率降低了 29.12%, 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体、0.25 ~

0.053 mm 微团聚体、< 0.053 mm 粉黏粒的贡献率分别提高了 29.67%、81.74%、51.15%。与常量有机肥处理相比，常改高处理下 >2 mm 粗大团聚体的贡献率提高了 7.25%，其他粒径团聚体的贡献率分别降低了 1.20%、25.21%、26.04%；而常改化处理下 >2 mm 粗大团聚体的贡献率降低了 38.98%，其他粒径团聚体的贡献率分别提高了 31.11%、66.80%、32.83%。与化肥处理相比，化改常处理下 >2 mm 粗大团聚体的贡献率提高了 64.35%，其他

粒径团聚体的贡献率分别降低了 23.83%、45.08%、11.73%。这表明在后续施肥措施改变 3 a 的过程中，增加有机肥的施入量(如常改高、化改常)将显著提高 >2 mm 粗大团聚体的贡献率，相应降低 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体、0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体的贡献率。而减少有机肥的施入量(如高改化、常改化)则显著降低 >2 mm 粗大团聚体的贡献率，提高 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体、0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体的贡献率。

表 4 不同施肥处理中各粒径团聚体对全土有机碳贡献率(%)
Table 4 Contribution rates of aggregates to soil organic carbon under different fertilization treatments

处理	各团聚体贡献率			
	>2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	56.90 ± 2.72	34.31 ± 2.06	6.19 ± 0.78	2.60 ± 0.33
高改化	40.33 ± 1.59	44.49 ± 1.11	11.25 ± 1.12	3.93 ± 1.04
常改高	52.94 ± 3.40	37.89 ± 1.04	7.21 ± 1.02	1.96 ± 0.78
常量有机肥	49.36 ± 2.33	38.35 ± 2.35	9.64 ± 1.46	2.65 ± 1.24
常改化	30.12 ± 1.68	50.28 ± 1.82	16.08 ± 1.54	3.52 ± 0.87
化改常	50.80 ± 3.15	36.47 ± 0.96	9.87 ± 0.83	2.86 ± 0.37
化肥	30.91 ± 2.06	47.88 ± 2.63	17.97 ± 1.73	3.24 ± 0.78

2.4 外源新碳(玉米秸秆碳)在土壤各级团聚体中的分配

利用测得的不同团聚体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 5)，计算得到外源新碳(玉米秸秆碳)作为有机肥施用后，全土及不同团聚体外源新碳的含量(表 6)。表 6 结果表明，高量有机肥处理、常改高处理、常量有机肥处理和化改常处理下全土中外源新碳的含量分别为 12.87、13.00、6.30 和 4.72 g/kg，其中前两者与后两

者的差异均达显著水平($P < 0.05$)。随有机肥(玉米秸秆)施入量的增多，进入全土及其不同粒径团聚体中的新碳含量相应增加。其中，进入到土壤中的外源新碳 59.52% ~ 65.77% 残留在 >0.25 mm 团聚体中，22.00% ~ 31.57% 残留在 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中，而 6.57% ~ 12.54% 残留在 <0.053 mm 团聚体中。这表明施用的玉米秸秆新碳主要集中在 >0.25 mm 粒径大团聚体中。

表 5 不同施肥处理土壤团聚体 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)
Table 5 $\delta^{13}\text{C}$ values of soil aggregates under different fertilization treatments

处理	各团聚体 $\delta^{13}\text{C}$ 值			
	>2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	-25.93 ± 0.04	-25.96 ± 0.14	-25.32 ± 0.22	-26.16 ± 0.09
常改高	-25.25 ± 0.11	-25.28 ± 0.22	-25.15 ± 0.12	-25.24 ± 0.13
常量有机肥	-26.65 ± 0.21	-26.66 ± 0.08	-26.10 ± 0.18	-26.32 ± 0.14
化改常	-26.54 ± 0.17	-26.27 ± 0.15	-25.61 ± 0.26	-26.64 ± 0.20

表 6 不同施肥处理土壤团聚体外源新碳含量(g/kg)
Table 6 Fresh carbon contents of soil aggregates under different fertilization treatments

处理	全土外源新碳	各团聚体外源新碳			
		>2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
高量有机肥	12.87 a	4.23 ± 0.61 a	3.98 ± 0.30 a	3.20 ± 0.29 a	1.45 ± 0.22 a
常改高	13.00 a	4.26 ± 0.47 a	4.29 ± 0.38 a	2.86 ± 0.23 a	1.59 ± 0.32 a
常量有机肥	6.30 b	1.84 ± 0.71 b	1.91 ± 0.43 b	1.77 ± 0.57 b	0.79 ± 0.11 b
化改常	4.72 b	1.44 ± 0.53 b	1.48 ± 0.76 b	1.49 ± 0.63 b	0.31 ± 0.04 b

3 讨论

土壤团聚体的组成、分布以及功能特性等受诸多影响因素干扰,既包括环境因素(土壤类型、气候条件、植物覆盖等),也包括人为因素(土地利用方式、耕作措施、轮作制度、农田管理等)。本长期定位试验中,不同施肥处理下红壤性水稻土团聚体以 >0.25 mm 大团聚体为优势粒径,约占 72.48% ~ 86.33%。这与易亚男等^[14]研究结果:高、低水位下红壤性水稻土团聚体主要分布在 >0.25 mm 水稳定性大团聚体范围内一致。但另有研究报道,单施有机肥或秸秆下浙江稻田土壤团聚体以 0.25 ~ 0.053 mm 粒径所占比重最大^[15]。究其原因,可能是不同研究下供试土壤类型、气候、施肥、作物种类、利用方式等条件差异所导致。本研究中,30 a 长期施肥和后续施肥措施改变的结果都表明提高有机肥施入量,红壤性水稻土 >2 mm 粗大团聚所占比例提高,团聚体稳定性增强,证实了有机肥在改善红壤性水稻土结构中不可替代的作用。陈晓芬等^[16]也研究表明,施用有机肥有利于 >2 mm 水稳性团聚体的形成。研究认为胶结物质(有机胶结物质、无机胶结物质、有机无机复合体)在土壤团聚体形成过程中起着十分重要的作用^[17]。在后续常改高、化改常处理下,有机肥施入量增加导致土壤中有机胶结物质含量提高,促使粉黏粒、微团聚体通过团聚作用向大团聚体转化,从而促进了土壤大团聚体的形成及其稳定性的提高。而后续高改化、常改化处理下,效果与之相反,说明施用化肥虽然可以提高作物生物量间接增加土壤胶结物质,但效果远不如有机肥明显。因有机肥除了能够提供各种养分,提高作物生物量外,其本身也含有大量有机胶结物质。

本试验中,不同施肥处理下红壤性水稻土各粒径团聚体中有机碳含量顺序均为:粗大团聚体(>2 mm) $>$ 细大团聚体(2 ~ 0.25 mm) $>$ 微团聚体(0.25 ~ 0.053 mm) $>$ 粉黏粒(<0.053 mm),表明团聚体中有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增大,大团聚体更有利于有机碳富集。以往很多研究也报道,大团聚体比微团聚体含有更多的有机碳^[18]。Jastrow 等^[19]运用 ^{13}C 示踪法进一步证实了大团聚体比微团聚体含有更多的有机碳。究其原因,可能是团聚体层次性机制现象,即微团聚体早于大团聚体形成,大粒径团聚体是由小粒径团聚体形成后通过有机、无机胶结物质胶结作用而形成的^[20]。以往相关研究表明,团聚体对土壤有机碳的贡献率以微团聚体较大^[5],但本试验红壤性水稻土的团聚体对土壤有机碳的贡献率主要体现在 >0.25 mm

的大团聚体上。这可能是由于该部分团聚体是数量优势粒级,而且其有机碳含量最高所导致的。大量长期定位施肥试验表明,单独施用有机肥或有机肥化肥配施均能提高土壤全土和各粒径团聚体中有机碳含量,且有机肥化肥配施效果更好^[21-22]。这与本研究试验结果一致,30 a 长期定位施肥后,高量有机肥处理下全土和各粒径团聚体中有机碳含量均最高。另相关分析也表明,全土中有机碳与外源有机物料输入碳量呈显著正相关(图 1)。此结果说明,土壤有机碳含量变化与外源有机物料投入量直接相关。同时,本研究证明在后续施肥措施改变 3 a 的过程中,增加有机肥的施入量(如常改高、化改常)将进一步显著提高 >2 mm 粗大团聚体中有机碳含量及其贡献率。而减少有机肥的施入量(如高改化、常改化)则降低 >2 mm 粗大团聚体的贡献率,相应提高 2 ~ 0.25 mm 细大团聚体、0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体的贡献率。

大量国内外研究认为土壤大团聚体比微团聚体含有更多新形成的有机物^[23],新增加的碳主要集中在大团聚体中^[24]。本试验中,运用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法证实外源新碳施入量越多,全土和各粒径团聚体新碳含量越高,且团聚体粒径越大,其分配新碳的比例越高。吕元春等^[8]通过室内模拟试验研究 3 种不同类型土壤,表明新进入的外源碳主要分配在大团聚体中。这与本研究的结果类似。但在后续施肥措施改变 3 a 的过程中,常改高处理与高量有机肥处理、化改常处理与常量有机肥处理均未达到显著差异,这可能与改施时间长短、所施用玉米秸秆数量、土壤本身性质、农田管理措施等有关,其具体原因还有待进一步研究。

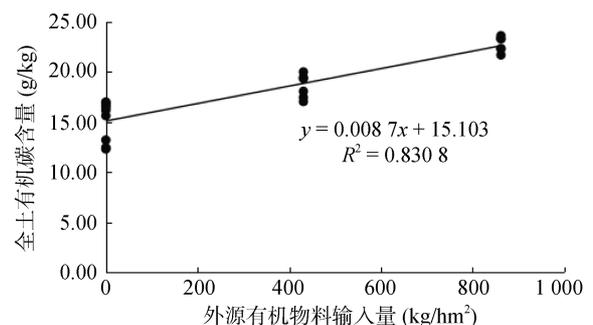


图 1 有机物料输入量与全土有机碳含量的相关关系
Fig. 1 Correlation between soil organic carbon and input applied as organic fertilizer

4 结论

通过长达 30 a 的长期定位试验研究发现:红壤性水稻土以 >0.25 mm 大团聚体为主。施用有机肥明显促进红壤性水稻土 >2 mm 粗大团聚体形成,提

高 MWD，增加全土及各粒径团聚体中有机碳含量。团聚体中有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增大，大团聚体更有利于有机碳富集。有机肥处理下红壤性水稻土中有机碳主要贮存在 >2 mm 粗大团聚体中，而化肥处理下以 2~0.25 mm 细大团聚体对土壤有机碳贡献率最高。外源新碳施入量越多，全土和各粒径团聚体新碳含量越高，且外源新碳主要分布在大团聚中。在后续施肥措施改变 3 a 后，增加有机肥施入量(化改常、常改高)>2 mm 粗大团聚体、MWD、全土及各粒径团聚体中有机碳含量将分别显著提高 7.08%~73.13%、5.38%~44.22%、14.53%~38.50%、0.70%~35.86%；而减少有机肥施入量(高改化、常改化)则与之相反，分别降低 28.17%~43.20%、21.17%~31.54%、17.54%~27.30%、11.49%~29.77%。因此，在我国南方红壤性稻作区的农业生产过程中应继续或加大施用有机肥，从而进一步维持或改善土壤结构，提高土壤有机碳含量。

参考文献：

- [1] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447-455
- [2] 邱佳颖, 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
- [3] 安婷婷, 汪景宽, 李双异. 施肥对棕壤团聚体组成及团聚体中有机碳分布的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 407-409
- [4] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2415-2424
- [5] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2961-2966
- [6] 窦森, 张晋京. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究土壤有机质周转的方法及其评价[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(2): 64-67
- [7] 窦森, 张晋京, 曹亚澄. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 328-334
- [8] 吕元春, 薛丽佳, 尹云峰, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 47-53
- [9] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO_2 排放特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1399-1406
- [10] Elliott E 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
- [11] Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants[J]. Plant Physiology, 1971, 47(3): 380-384
- [12] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22
- [13] Angers D, Recous S, Aita C. Fate of carbon and nitrogen in waterstable aggregates during decomposition of $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situation[J]. European Journal of Soil Science, 1997, 48(2): 295-300
- [14] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 34-36
- [15] 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
- [16] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950-960
- [17] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498
- [18] Six J, Paustain K, Elliot E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society America Journal, 2000, 64(3): 681-689
- [19] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 801-807
- [20] Green V S, Cavigelli M A, Dao T H, et al. Soil physical properties and aggregate-associated C, N and P distribution in organic and conventional crop systems[J]. Soil Science, 2005, 170(10): 822-831
- [21] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 62: 141-163
- [22] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. Geoderma, 2005, 128(1/2): 63-79
- [23] Six J, Paustain K, Elliot E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 681-689
- [24] 慈恩, 杨林章, 施林林, 等. 不同气候带水稻土有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 及胡敏酸结构特征变化[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 78-84
- [25] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1149-1157
- [26] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 675-682

Effects of Following-up Fertilization Reforming on Distribution and Turnover of Aggregate-associated Organic Carbon in Paddy Soils

ZHANG Yi, DAI Qi, YIN Lichu^{*}, GU Zhongyuan

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

Abstract: A 30a experiment was altered and rice straw (C₃ crop) applied as organic fertilizer was replaced by maize straw (C₄ crop) in 2012. Soil aggregation, aggregate-associated organic carbon contents and its $\delta^{13}\text{C}$ values were measured to determine the effects of following-up fertilization reforming on their distribution and turnover after 3 years fertilization alteration under seven different fertilization treatments, i.e. high organic material (HOM), normal organic material (NOM), chemical fertilizer (CF), normal organic fertilization treatment changed from chemical fertilization treatment (C-N), chemical fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment (N-C), chemical fertilization treatment changed from original high organic fertilization treatment (H-C), high organic fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment (N-H). The results showed that the macroaggregates (>0.25mm) were the dominant component in the red paddy soil under all fertilization treatments, accounting for approximately 72.48%–86.33% of the total soil aggregates. Compared with chemical fertilizer for 30 years, long term application of organic fertilizer (HOM and NOM) significantly increased the ratio of the large macroaggregates (>2mm) and improved MWD. The contents of organic carbon in soil aggregates increased with the increasing particle size of the aggregates, and macroaggregates were more favorable for soil organic carbon enrichment. Large macroaggregates (>2mm) were the main contributor of soil organic carbon under organic fertilization treatments (HOM and NOM) in the red paddy soil, while it was small macroaggregates (2–0.25mm) under chemical fertilization treatment. The more application of fresh organic carbon, the higher new soil organic carbon content of whole soil and all sizes of aggregates. The new soil organic carbon was mainly distributed in the macroaggregates (>0.25mm). After 3 years following-up fertilization alteration, the ratio of the large macroaggregates (>2mm), MWD, organic carbon in whole soil, and aggregate-associated organic carbon was improved by 7.08%–73.13%, 5.38%–44.22%, 14.53%–38.50% and 0.70%–35.86% respectively under the treatments of increasing input of organic fertilizer (C-N and N-H), while reduced by 28.17%–43.20%, 21.17%–31.54%, 17.54%–27.30% and 11.49%–29.77% respectively under the treatments of reducing input of organic fertilizer (H-C and N-C). As a conclusion, the following-up organic fertilization is necessary to maintain or improve red paddy soil aggregation and organic carbon in the southern China.

Key words: Long-term experiment; Red paddy soil; Soil aggregates; Soil organic carbon; ^{13}C ; Fertilization change