

后续施肥措施改变对红壤性水稻土团聚体有机碳组分的影响

张 艺, 尹力初, 戴 齐

(湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128)

摘要: 利用一个长达 30 年且已进行适当变更的长期定位施肥试验,采用物理方法对团聚体有机碳进行分组,并运用 $\delta^{13}\text{C}$ 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(化改常、常改高、高改化、常改化)3 年后红壤性水稻土团聚体有机碳组分含量及其分布比例的变化规律,以期为调控稻田土壤肥力及红壤性水稻土有机碳库的管理提供理论依据。结果表明:与施用化肥 30 年相比,长期施用有机肥显著提高了红壤性水稻土团聚体总有机碳、粗游离态颗粒有机碳(cfPOC)、细游离态颗粒有机碳(ffPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)及矿物结合态有机碳(MmMOC)的含量,其中以游离态颗粒有机碳变幅最大,达 67.5%~150.0%,对施肥最敏感,能较好地反映长期施肥下土壤有机碳库的变化。在后续施肥过程中,增加有机肥施入量(化改常、常改高)团聚体总有机碳、粗游离态颗粒有机碳(cfPOC)、细游离态颗粒有机碳(ffPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)及矿物结合态有机碳(MmMOC)含量将分别显著提高 5.2%~15.5%,2.8%~40.2%,18.9%~43.9%,2.8%~17.6%,5.1%~8.2%;而减少有机肥施入量(高改化、常改化)则与之相反,分别降低 15.8%~20.9%,12.6%~26.9%,24.6%~48.4%,19.9%~23.9%,4.9%~21.9%。在所有施肥处理条件下闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)分布比例最低,为 11.3%~13.4%;矿物结合态有机碳(MmMOC)分布比例最高,为 50.4%~59.0%,是红壤性水稻土固存有机碳的主要形式。外源新碳施入量越多,大团聚体及其各有机碳组分的新碳含量越高,且 45.6%~50.1%进入矿物结合态有机碳组分,34.1%~42.3%进入游离态颗粒有机碳组分,11.8%~18.0%进入闭蓄态颗粒有机碳组分。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,从而进一步维持或提升土壤不同组分有机碳库。

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

中图分类号: S153.6;S147.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0278-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.046

Effects of Following-up Fertilization Reforming on the Fractions of Aggregate-associated Organic Carbon in Red Paddy Soils

ZHANG Yi, YIN Lichu, DAI Qi

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

Abstract: A 30-year experiment was altered, and aggregate-associated organic carbon fractions based on density fractionation scheme and its $\delta^{13}\text{C}$ value were measured to study the changes of following-up fertilization reforming on their content and distribution after 3-year fertilization alteration under 7 fertilization treatments, including 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), and high organic fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment (N-H), which were analyzed to provide scientific basis for controls of soil fertility and organic carbon management. The results showed that compared with 30-year application of chemical fertilizer, long term application of organic fertilizer significantly increased the content of total aggregate-associated organic carbon, coarse free particulate organic carbon (cfPOC), fine free particulate organic carbon (ffPOC), occluded particulate organic carbon (oPOC) and mineral-associated organic carbon (MmMOC). The fPOC with the highest magnitude of increase by 67.5% to 150.0% indicated that it was

收稿日期:2016-06-17
资助项目:国家自然科学基金项目(41371250);湖南省研究生科研创新项目(CX2015B267)
第一作者: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
通信作者:尹力初(1973—),男,教授,硕士研究生导师,主要从事土壤肥力与农业生态研究。E-mail:lcyin0418@sohu.com

more sensitive to the fertilizations than other organic carbon fractions. After 3-year following-up fertilization alteration, total aggregate-associated organic carbon, cfPOC, ffPOC, oPOC and MmMOC were improved by 5.2% to 15.5%, 2.8% to 40.2%, 18.9% to 43.9%, 2.8% to 17.6% and 5.1% to 8.2% under the treatment of increasing input of organic fertilizer (C-N and N-H), respectively, while those under the reducing input of organic fertilizer treatments (H-C and N-C) were reduced by 15.8% to 20.9%, 12.6% to 26.9%, 24.6% to 48.4%, 19.9% to 23.9% and 4.9% to 21.9%. The MmMOC, accounting for 50.4% to 59.0% of total aggregate-associated organic carbon, was the main form for organic carbon sequestration in red paddy soil under all fertilization, while oPOC accounted for 11.3% to 13.4%. The application of fresh organic carbon resulted in the higher content new soil organic carbon content of macroaggregates and all aggregate-associated organic carbon fractions. About 45.6% to 50.1% of fresh organic carbon was transferred to MmMOC, 34.1% to 42.3% to fPOC and 11.8% to 18.0% to oPOC. As a conclusion, the following-up organic fertilization is necessary to maintain or improve red paddy soil aggregate-associated organic carbon fractions in the southern China.

Keywords: long-term experiment; red paddy soil; soil aggregate; soil organic carbon fraction; ^{13}C ; fertilization change

土壤有机碳是土壤养分循环及肥力供应的核心物质,在土壤结构、持水性、缓冲性等方面具有重要作用,直接影响着耕地生产力和作物产量^[1]。同时土壤有机碳也是地球陆地生态系统中最大的碳库,其碳含量是大气中 CO_2 碳含量的 2~3 倍,其微小变化即可能对温室效应甚至全球碳平衡产生深远影响^[2]。因此,近年来土壤有机碳的分布及动态变化等受到广泛关注。但由于土壤有机碳具有高度异质性,且总有机碳含量只能反映有机碳矿质化分解与腐质化合成的最终平衡结果,在较短时间内对农业管理措施的响应不甚敏感而难以及时反映其内在变化^[3]。土壤团聚体与土壤有机碳二者之间相互作用、相互影响而密不可分,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。土壤团聚体有机碳组分的微小变化能在一定程度上反映土壤总有机碳的潜在演变趋势。由此,开展土壤团聚体有机碳组分研究对更好地了解土壤有机碳动力学变化、揭示土壤有机碳的循环与转化过程等具有重要意义^[4]。

团聚体内的有机碳根据其在土壤结构中的分布位置及功能可分为游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳与矿物结合态有机碳^[5]。土壤团聚体有机碳组分受诸多因素影响,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)。施肥作为最重要的农田管理措施之一,无疑是影响土壤团聚体有机碳组分的重要因素。徐江兵等^[6]系统地分析了不同施肥处理对旱地红壤有机碳及其组分的影响,发现长期施用有机肥降低了大团聚体的周转,并显著提高了土壤团聚体中粗颗粒态有机碳、细颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的含量;王雪芬等^[7]研究表明,长期施用

有机肥可以显著提高红壤颗粒有机碳组分,但对矿物结合态有机碳影响不显著,而施用化肥对土壤有机碳各组分影响均不明显;王朔林等^[8]对栗褐土有机碳组分进行了研究,认为长期施用化肥、有机肥以及有机肥与化肥配施均能提高土壤游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳含量。以上研究普遍发现在土壤培肥过程中团聚体有机碳组分相对于土壤总有机碳对施肥管理的响应更为敏感,但现有关于施肥影响土壤团聚体有机碳组分的报道大多关注其数量的变化,而有机碳组分数量的变化不足以全面反映土壤团聚体有机碳及某一组分的分解变化和周转状态,还需进一步借助碳同位素示踪技术,阐明土壤有机碳组分在不同团聚体中的分配去向及在团聚体内部的转化与更新;同时,已有的研究主要针对培肥过程中土壤团聚体有机碳组分在长期不同施肥措施下的变化,而已培肥土壤团聚体有机碳组分对于后续施肥措施的响应还鲜有报道。由此,本研究依托湖南农业大学一个长达 30 年且已进行适当变更的长期定位施肥试验,采用物理方法对团聚体有机碳进行分组,运用 $\delta^{13}\text{C}$ 田间自然丰度方法,分析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(化改常、常改高、高改化、常改化)3 年后红壤性水稻土团聚体有机碳组分含量及其分布比例的变化规律,以期为调控稻田土壤肥力及红壤性水稻土有机碳库的管理提供理论依据。

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见文献[9]。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粘土,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年栽植早稻前,本试验利用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)。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449.8,10.4,5.9,12.6 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9.6,19.2 kg/hm²。近5年来所种植的早稻、晚稻品种分别为湘早籼15和VY46。早稻于每年4月下旬移栽,7月上旬收获,晚稻于7月中旬移栽,10月底收获。每小区植稻35株。

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集 定位试验变更3年后,于2015年4月栽植早稻前,每处理选取3个小区,并在每个小区中随机确定3个采样点,用铲刀切下长×宽×高=5 cm×5 cm×15 cm的原状土柱组成混合土样,共计21个土样(3×7=21),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。新鲜土样自然风干后,依次过2,0.25,0.053

mm筛。具体操作为:称取大约30 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后开启自制的团聚体筛分仪,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 大团聚体中有机碳组分分离 大团聚体内有机碳分组采用Six等^[10]提出的物理分组方法。取10 g已烘干大团聚体(>0.25 mm)放在0.25 mm和0.053 mm组成的筛子上,放入50个直径为4 mm的小玻璃珠,在恒定的水流下振荡,确保所释放出来的微团聚体被立即冲进0.053 mm筛子上,避免被玻璃珠进一步破坏。当所有大团聚体破碎完全后,则留在0.25 mm筛上的为粗游离态颗粒有机碳(cfPOC)和粗砂粒;留在0.053 mm筛上是微团聚体、细游离态颗粒有机碳(ffPOC)及细砂粒;通过0.053 mm筛的部分为粉粘粒。

细游离态颗粒有机碳(ffPOC)和蓄态颗粒有机碳(oPOC)的分离采用密度悬浮法:将上步烘干后的微团聚体转移至50 ml离心管中,加入30 ml相对密度为1.85 g/cm³的碘化钠溶液,用手摇动,在2 400 r/min下离心10 min。平衡后,将离心管中悬液抽吸到0.045 mm的滤纸上,用蒸馏水洗掉碘化钠,即为游离态颗粒有机碳(ffPOC);离心管底部重组部分,加入蒸馏水清洗,再离心弃去上清液,直至将重液从团粒中清除,然后加入浓度为5 g/L的六偏磷酸钠溶液,振荡18 h。振荡分散后的团粒过0.053 mm的筛,并用蒸馏水完全洗净,留在筛上的即为蓄态颗粒有机碳(oPOC);通过0.053 mm的粉粘粒,收集,用于测定矿物结合有机碳(MOC)。

1.3 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¹³C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‰。当改施 C_4 玉米秸秆代替 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。

本试验中,土壤大团聚体有机碳(或各组分有机碳)中来源于玉米秸秆新碳的比例为^[11]:

$$f\% = (\delta - \delta\text{Cck}) / (\delta\text{C}_L - \delta\text{Cck}) \times 100$$

式中: δ 为添加玉米秸秆后土壤大团聚体有机碳(或各组分有机碳)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; δCck 为未添加玉米秸秆时土壤大团聚体有机碳(或各组分有机碳)的 $\delta^{13}\text{C}$

值; δC_L 为玉米秸秆碳的 $\delta^{13}C$ 值。

根据大团聚体或各组分有机碳总量 C ,有机碳总量中来自玉米秸秆新碳 C_N 为: $C_N=fC$

有机碳及 $\delta^{13}C$ 值的测定:土壤大团聚体有机碳含量及各组分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 $\delta^{13}C$ 值用同位素质谱仪(Finnigan MAT251,Thermo Electron)测定。

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($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体总有机碳的影响

由图 1 可知,不同施肥处理下土壤团聚体($>0.25\text{ mm}$)总有机碳含量存在显著差异。相对于长期化肥处理(18.4 g/kg),长期常量有机肥处理(25.9 g/kg)、长期高量有机肥处理(28.9 g/kg)下团聚体总有机碳含量分别提高了 40.7% 、 57.5% 。同时,后续施肥措施的改变也显著影响了团聚体总有机碳含量。与高量有机肥处理相比,高改化处理下团聚体总有机碳含量降低了 20.9% 。与常量有机肥处理相比,常改高处理下团聚体总有机碳含量提高了 5.2% ;常改化处理下则降低了 15.8% 。与化肥处理相比,化改常处理下团聚体总有机碳含量提高了 15.5% 。表明后续施肥过程中减少有机肥的施入量(高改化、常改化)将不利于土壤团聚体总有机碳的保持,而增加有机肥的施入量(化改常、常改高)将促进土壤团聚体总有机碳的进一步累积。

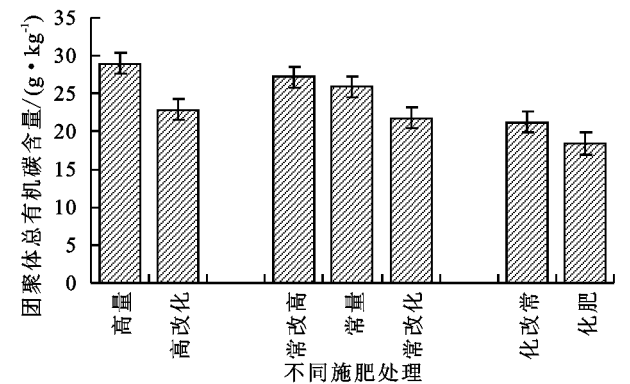


图 1 不同施肥处理下土壤团聚体总有机碳含量

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体有机碳组分含量的影响

2.2.1 大团聚体内微团聚体之间有机碳组分含量 从表 1 可以看出,不同施肥处理下土壤大团聚体内微团聚体之间有机碳组分呈现出相同的规律,各有机碳组分碳含量均为矿物结合态有机碳(MMOC) $>$ 粗游离

态颗粒有机碳(cfPOC) $>$ 细游离态颗粒有机碳(ffPOC)。30 年长期不同施肥处理下土壤大团聚体内微团聚体之间有机碳组分存在显著差异。与化肥处理相比,常量有机肥处理、高量有机肥处理下细游离态颗粒有机碳(ffPOC)含量分别提高了 67.5% 和 150% ;粗游离态颗粒有机碳(cfPOC)含量分别提高了 81.2% 和 101% ;矿物结合态有机碳(MMOC)含量分别提高了 42% 和 43% 。其中以游离态颗粒有机碳(fPOC)增幅最大,表明了游离态颗粒有机碳(fPOC)对不同施肥措施响应十分灵敏,可作为土壤有机碳库变化的早期预示指标。

后续施肥措施的改变也显著影响了土壤大团聚体内微团聚体之间有机碳组分。与高量有机肥处理相比,高改化处理下 ffPOC、cfPOC、MMOC 含量分别降低了 48.4% 、 26.9% 、 10.6% 。与常量有机肥处理相比,常改高处理下仅 ffPOC 提高了 18.8% ,而 cfPOC、MMOC 含量的变化不明显;而常改化处理下 ffPOC、cfPOC、MMOC 含量分别降低了 24.6% 、 12.6% 、 21.8% 。与化肥处理相比,化改常处理下 ffPOC、cfPOC、MMOC 含量分别提高了 43.9% 、 40.2% 、 7.7% 。表明后续施肥过程中如增加有机肥施入量(如化改常、常改高)将提高大团聚体内微团聚体之间各有机碳组分碳含量,而减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将降低大团聚体内微团聚体之间各有机碳组分碳含量,其中以细游离态颗粒有机碳(ffPOC)的变化幅度最大。

2.2.2 大团聚体中微团聚体内有机碳组分含量 不同施肥处理下大团聚体中土壤微团聚体内有机碳组分也呈现出相同的规律,各有机碳组分碳含量大小均为矿物结合态有机碳(mMOC) $>$ 闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)(表 1)。30 年长期不同施肥处理下土壤微团聚体内有机碳组分存在显著差异。与化肥处理(7.4 g/kg)相比,常量有机肥处理和高量有机肥处理分别使微团聚体总有机碳含量增加 1.0 、 2.3 g/kg 。同时,各有机碳组分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,常量有机肥处理、高量有机肥处理下 oPOC 含量分别提高了 24.3% 和 47.4% ; mMOC 含量分别提高了 8.2% 和 23.8% 。

后续施肥措施的改变也显著影响了微团聚体有机碳及其各有机碳组分碳含量。与高量有机肥处理相比,高改化处理下微团聚体总有机碳含量降低了 17.2% ,oPOC、mMOC 含量分别降低了 23.9% 、 13.2% 。与常量有机肥处理相比,常改高处理下微团聚体总有机碳含量提高了 11.6% ,oPOC、mMOC 含量分别分别提高了 17.6% 、 8.2% ;而常改化处理下微团聚体总有机碳含量降低了 10.3% ,oPOC、mMOC 含量分

别降低了 19.9%,4.9%。与化肥处理相比,化改常处理下微团聚体总有机碳含量提高了 4.3%,oPOC、mMOC 含量分别提高了 2.8%,5.1%。可见,后续施肥过程中如增加有机肥施入量(如化改常、常改高)

将提高微团聚体有机碳及其各有机碳组分碳含量,而减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将降低微团聚体有机碳及其各有机碳组分碳含量,其中以闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)的变化幅度相对较大。

表 1 不同施肥处理下土壤团聚体有机碳组分含量 g/kg

处理	微团聚体间			微团聚体内	
	ffPOC	cfPOC	MMOC	oPOC	mMOC
高量	2.85±1.02a	7.90±0.89a	8.51±0.63a	3.64±0.16a	6.08±1.35a
高改化	1.47±0.28b	5.77±0.52ab	7.61±1.40ab	2.77±0.06c	5.28±0.12ab
常改高	2.27±0.68ab	7.32±0.41a	8.25±0.38a	3.61±0.33a	5.78±0.22ab
常量	1.91±0.20ab	7.12±1.65a	8.45±0.76a	3.07±0.06b	5.34±0.38ab
常改化	1.44±0.29b	6.22±0.16ab	6.6±1.48bc	2.46±0.28c	5.08±0.18ab
化改常	1.64±0.15b	5.51±0.28ab	6.41±0.29bc	2.54±0.02c	5.16±0.39ab
化肥	1.14±0.54b	3.93±1.07b	5.95±0.84c	2.47±0.17c	6.08±1.35a

注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.3 不同施肥处理对土壤团聚体有机碳组分分布比例的影响

土壤团聚体有机碳组分分布比例是指各有机碳含量占土壤团聚体总有机碳含量的比率。与有机碳组分的绝对含量相比,它排除了有机碳总量的差异,可以体现不同施肥措施下土壤碳库状况。不同施肥处理下红壤性水稻土团聚体中各有机碳组分分布规律基本相似(图 2),闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)分布比例最低,占到总有机碳的 11.3%~13.4%;游离态颗粒有机碳(fPOC,其为 ffPOC、cfPOC 之和)占到总有机碳的 27.6%~37.1%;矿物结合态有机碳(MmMOC,其为 MMOC、mMOC 之和)分布比例最高,占到总有机碳的 50.4%~59%,是红壤性水稻土有机碳固存的主要形态。

30 年长期不同施肥处理下土壤团聚体各有机碳组分分布存在显著差异。与化肥处理相比,常量有机肥处理、高量有机肥处理下游离态颗粒有机碳(fPOC)分布比例分别提高了 26.6%和 34.6%;闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)分布比例分别降低了 11.6%和 6.4%;矿物结合态有机碳(MmMOC)分布比例分别降低了 9.7%和 14.7%。

后续施肥措施的改变也显著影响了土壤团聚体各有机碳组分分布。与高量有机肥处理相比,高改化处理下游离态颗粒有机碳(fPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)所占比例分别降低了 14.7%,3.7%,矿质结合态有机碳(MmMOC)则提高了 11.8%。与常量有机肥处理相比,常改高处理下游离态颗粒有机碳(fPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)所占比例分别提高了 0.9%,11.8%,矿物结合态有机碳(MmMOC)则降低了 3.3%;而常改化处理下其有机碳组分分布差异不明显。与化肥处理相比,化改常处理下游离态颗粒有机碳(fPOC)含量提高了 22%,闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)、矿质结合态有机碳(MmMOC)所占比

例分别降低了 10.9%,7.8%。因此,在后续施肥过程中如增加有机肥施入量(如化改常、常改高)将提高游离态颗粒有机碳(fPOC)分布比例,相应减少矿质结合态有机碳(MmMOC)分布比例;而减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将提高矿物结合态有机碳(MmMOC)分布比例,相应减少游离态颗粒有机碳(fPOC)分布比例。

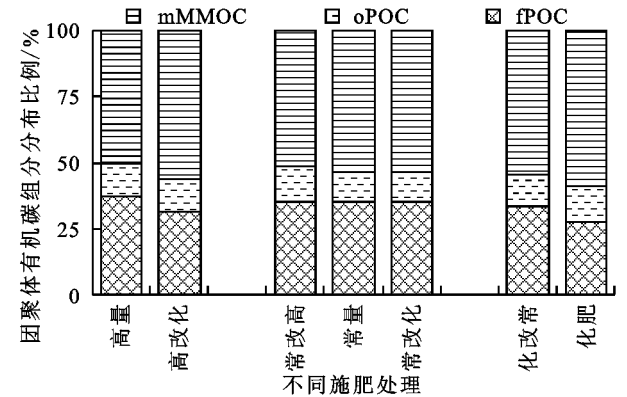


图 2 不同施肥处理下土壤团聚体有机碳组分分布比例

2.4 不同施肥处理土壤团聚体有机碳组分中外源新碳的分配

依据土壤团聚体有机碳各组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 2),可计算得到,施用玉米秸秆 3 年后高量有机肥处理、常改高处理、常量有机肥处理和化改常处理下大团聚体中外源新碳的含量分别为 4.3,3.6,2.8,2.1 g/kg,其中前两者与后两者的差异均达显著水平(表 3)。随有机肥(玉米秸秆)施入量的增多,进入大团聚体及其各有机碳组分的新碳含量相应增加。其中,进入到大团聚体中的外源新碳 11.8%~18%残留在闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)中,34.1%~42.3%残留在游离态颗粒有机碳(fPOC)中,而 45.6%~50.1%残留在矿质结合态有机碳(MmMOC)中。

3 讨论

已有研究表明,约 90%土壤表层有机碳储存在团聚

体中,土壤团聚体对土壤固碳具有重要意义。研究者普遍发现长期施用有机肥可以显著增加土壤团聚体中有机碳的含量^[12]。究其原因,有机肥施入量增加一方面促进作物根系、地上部分的生长,导致作物产量增加,使更多作物残茬还田而间接增加土壤有机碳^[13];另一方面所施入有机肥本身所含有的有机碳是土壤有机碳的前身,对提高土壤有机碳具有直接促进作用。本研究结果同样表明施用有机肥更有利于土壤团聚体有机碳的累积,但其主要原因为后者。因本研究各施肥处理下所施用养分用量相同,有机肥处理由于土壤速效养分较低,作物的长势及产量反而低于化肥处理。

表 2 不同施肥处理土壤团聚体有机碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 值 %

处理	oPOC	mMOC	cfPOC	ffPOC	MMOC
高量	-25.60	-25.58	-23.54	-24.38	-26.24
高改化	-27.66	-27.49	-26.85	-26.13	-28.50
常改高	-25.13	-25.82	-23.45	-23.79	-26.00
常量	-25.03	-25.74	-23.74	-23.93	-26.88
常改化	-26.98	-27.84	-25.86	-24.27	-27.95
化改常	-25.23	-25.33	-24.07	-24.43	-26.90
化肥	-27.50	-27.01	-25.80	-24.74	-27.87

表 3 不同施肥处理土壤团聚体有机碳组分中外源新碳含量 g/kg

处理	团聚体	oPOC	fPOC	MmMOC
高量	4.33±0.14a	0.51±0.15a	1.83±0.41a	1.99±0.32a
常改高	3.59±0.25a	0.46±0.12a	1.33±0.17b	1.80±0.10a
常量	2.85±0.16b	0.42±0.16a	1.13±0.25b	1.30±0.16b
化改常	2.11±0.08b	0.38±0.24b	0.72±0.12c	1.01±0.21b

本文研究结果表明,无论在长期不同施肥下或后续施肥措施改变后,土壤团聚体有机碳总量及其组分都发生显著变化,但团聚体有机碳总量的变化幅度要远低于有机碳组分的变化幅度,尤其以游离态颗粒有机碳(fPOC)变幅最大。Sleutel 等^[14]的研究也得出了相同的结论。由此,此研究结果进一步支持了游离态颗粒有机碳(fPOC)对不同施肥措施响应十分灵敏的观点,可作为农业管理措施下土壤有机碳库变化的早期预示指标。

颗粒态有机碳通常由未分解或半分解的动植物残体和根系残体组成,是土壤活性有机碳的重要组成部分和量度指标,在提高土壤有机碳库、缓解大气 CO₂ 浓度升高等方面具有重要意义。本试验结果显示,长期持续施用有机肥或后续常改高、化改常处理下增加有机肥施入量虽然可以显著提高土壤团聚体各有机碳组分的含量而增加总有机碳含量,但以游离态颗粒有机碳和闭蓄态颗粒有机碳的含量的增加更为显著,这与张敬业等^[15]和梁尧等^[16]的研究结果一致。究其原因,是由于施用有机肥促进了团聚体形成,使颗粒有机碳受到物理保护,避免微生物的接触、降解。而后

续高改化、常改化处理下,改施化肥不利于形成良好的土壤团粒结构,使颗粒态有机碳缺乏物理保护,易被微生物分解利用。

研究表明,土壤颗粒有机碳的分配比例一般在 10% 以上,有的可高达 30%~85%。这与本试验结果一致。本研究各处理下土壤中游离态颗粒有机碳(fPOC)占到总有机碳的 27.6%~37.1%,闭蓄态颗粒有机碳占到总有机碳的 11.3%~13.4%。在后续施肥过程中如增加有机肥施入量(如化改常、常改高)将提高游离态颗粒有机碳(fPOC)分布比例,而减少矿质结合态有机碳(MmSOC)分布比例;如减少有机肥施入量(如高改化、常改化)将提高矿物结合态有机碳分布比例,而减少游离态颗粒有机碳分布比例(图 2)。但各处理下土壤有机碳组分中仍以矿物结合态有机碳分布比例为最高,且进入到团聚体中的外源新碳也以分配于矿质结合态有机碳的比例为最多(表 3),由此说明本研究红壤性水稻土中矿物结合态有机碳是土壤有机碳固存的主要形态。

4 结论

长期施用有机肥显著提高了红壤性水稻土团聚体总有机碳、粗游离态颗粒有机碳、细游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳及矿物结合态有机碳的含量。在后续施肥过程中,增加有机肥施入量将显著提高以上土壤有机碳组分含量,而减少有机肥施入量则与之相反。无论在长期不同施肥下或后续施肥措施改变后,土壤团聚体有机碳组分中都以游离态颗粒有机碳变幅最大,对施肥最敏感,能较好地反映长期施肥下土壤有机碳库的变化。所有施肥处理条件下闭蓄态颗粒有机碳分布比例最低;矿物结合态有机碳分布比例最高,是红壤性水稻土固存有机碳的主要形式。外源新碳施入量越多,大团聚体及其各有机碳组分的新碳含量越高,且外源新碳主要分布在矿物结合态有机碳中。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,从而进一步维持或提升土壤不同组分有机碳库。

参考文献:

[1] 赵鑫,宇万太,李建东,等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 应用生态学报,2006,17(11):2203-2209.

[2] 梁尧,韩晓增,宋春,等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(17):3565-3574.

[3] 张璐,张文菊,徐明岗,等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学 2009,42(5):1646-1655.