

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^{*}

徐江兵^{1,2} 李成亮¹ 何园球^{1†} 王艳玲^{1,2} 刘晓利^{1,2}

(1 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008) (2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要 借助筛分、浮选等物理分组和化学分析方法研究了不同施肥处理下旱地红壤团聚体中不同有机碳组分的差异。结果表明:长期施肥显著地提高了土壤中总有机碳含量(TOC)和团聚体中轻组有机碳(LFC)、团聚体内粗颗粒有机碳(CFC)、团聚体内细颗粒有机碳(FFC)和矿物结合态有机碳(mSOC)的含量,且各有机碳组分与 TOC 均呈极显著相关;团聚体中有机碳含量随团聚体的粒级减小而降低,厩肥处理的促进效果最明显;团聚体中有机碳主要以 mSOC 形式存在。有机肥的施入降低了大团聚体的周转,秸秆处理对团聚体的形成和稳定效果优于厩肥处理;在红壤地区有机无机肥配施使得有机碳在团聚体形成及稳定方面的作用得以加强。

关键词 团聚体;有机碳;不同施肥处理;旱地红壤

中图分类号 S158.3;S152.4 **文献标识码** A

广泛分布于我国亚热带地区丘陵岗地上的旱地红壤,由于长期以来人为不合理的利用和成土类型的特殊性,其酸、粘、板、瘠、旱特征明显,严重影响了生产力的发挥和区域农业的持续发展。但其光温潜力和恢复利用的可能性大,因此,旱地红壤的培肥和管理是该区农业发展的重点。

土壤有机碳是土壤肥力的重要指标,一直受到许多学者的重视。其原因在于一方面,有机碳是土壤团聚体的主要胶结剂之一^[1],是团聚体形成的重要物质基础,团聚体的状况又反过来影响着土壤有机碳的分解转化^[2],进而影响土壤肥力的发挥^[3];另一方面,土壤有机碳的积累及转化是一个长期而缓慢的过程,其影响因素很多,其中以人类管理措施如耕作方式、轮作和施肥等是最为直接的影响方式^[4~6]。土壤有机碳被生物分解后可提供作物生长所需的有效养分,因此被视为土壤中潜在养分库的重要部分^[7]。

土壤团聚体是土壤结构的物质基础,其数量和质量决定着土壤的性质和肥力。发育于第四纪红粘土的红壤由于特殊的成土过程,促使土壤中作为团

聚体形成胶结物质的粘粒和氧化铁铝含量较高,而有机质含量较低。红壤中有机碳主要通过松结合态和多糖的形式参与形成大团聚体,改善土壤结构性^[8]。不同粒径团聚体对土壤的肥力和性质的影响是不同的^[9~11]。总之,有机碳在团聚体中的含量变化和组分分布规律对于红壤肥力的培育和恢复是非常重要的^[5,6]。

影响土壤有机碳在团聚体中分布的农艺措施较多,如耕作方式、轮作和施肥等,但目前,仅见不同轮作、耕作措施对其影响的研究报道^[5,6],关于长期不同施肥对土壤团聚体中有机碳的含量与组成以及二者之间相互关系影响的研究尚未见报道。因此,本文以长期施用不同肥料的旱地红壤为研究材料,借助物理和化学分析方法,对长期施肥条件下旱地红壤水稳性团聚体进行物理分组,并测定不同粒级团聚体中有机碳组分和含量,明确有机碳在团聚体中的分布状况,从而了解不同施肥对红壤有机胶结的团聚体的形成、稳定及更新周转机制的影响,深入理解其对土壤结构恢复重建、红壤肥力变化的重要理论和实践意义。

^{*} 国家自然科学基金项目(406701108)资助

[†] 通讯作者

作者简介:徐江兵(1981~),男,硕士研究生,从事有机碳循环与转化方面的研究。E-mail:jiangbxu@126.com

收稿日期:2006-04-12;收到修改稿日期:2006-10-11

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期试验设于中国科学院红壤生态试验站(北纬 28°15'20", 东经 116°55'30")内,该站地处中亚热带,成土母质是覆盖在第三纪红砂岩上的第四纪红色粘土,年均温 17.6℃,年降雨量 1 795 mm,年蒸发量 1 318 mm,降雨集中于每年的 3~6 月份。试验设计和管理状况详见孔宏敏等^[12]的研究报道。本研究仅采用了 NPK+秸秆、NPK+绿肥、NPK+厩肥和 NPK 共 4 个处理(分别记作秸秆、绿肥、厩肥及对照)。

1.2 采样与分析方法

于 2004 年 9 月(花生收获后一个月)采集表层 0~15 cm 原状土样,每小区随机采集 5 点,混匀。土壤团聚体和有机碳库的物理分组流程如图 1 所示^[5]。

1.2.1 团聚体分级 团聚体的分级采用湿筛法^[5],并略作修改。称取 50 g 风干土,在 25℃ 水中浸泡 5 min,然后将土样依次通过 2 000 μm、250 μm、53 μm 的筛子,得到三种粒级的团聚体:>2 000 μm

(粗大团聚体),250~2 000 μm(细大团聚体),53~250 μm(微团聚体)。最后将各粒级的团聚体 60℃ 下烘干,并称重(53 μm 的土壤组分用差减法算出)。

1.2.2 颗粒密度分组 分析前将各粒级的团聚体在 110℃ 下烘干过夜,冷却后,称取 5.00g 样品置于 100 ml 离心管中,加入相对密度为 1.78 g cm⁻³ 的碘化钠(NaI)溶液,用超声波分散 10 min,离心(3 500 r min⁻¹)10 min 后将上清液倾入砂芯漏斗中,抽滤,收集漏斗上的轻组组分(LF),重复上述过程 3 次直至重液中无轻组组分为止,再用去离子水反复冲洗轻组组分数次后移至铝盒中,在 60℃ 下烘干。剩余的重组组分中加入 0.5% 的六偏磷酸钠(HMP)后在震荡机上震荡 18 h,分散后的重组组分依次倒入 250 μm、53 μm 筛子,将留在筛子上的 250~2 000 μm、53~250 μm 团聚体内颗粒有机物(砂)在 60℃ 烘干(分别记为团聚体内粗颗粒有机碳(CF)和团聚体内细颗粒有机碳(FF))。

将烘干后的 LF、CF、FF 磨细过 100 目筛,用元素分析仪测定其有机碳含量(LF-C、CF-C、FF-C)。矿物结合态有机碳(mSOC)用差减法计算得出。

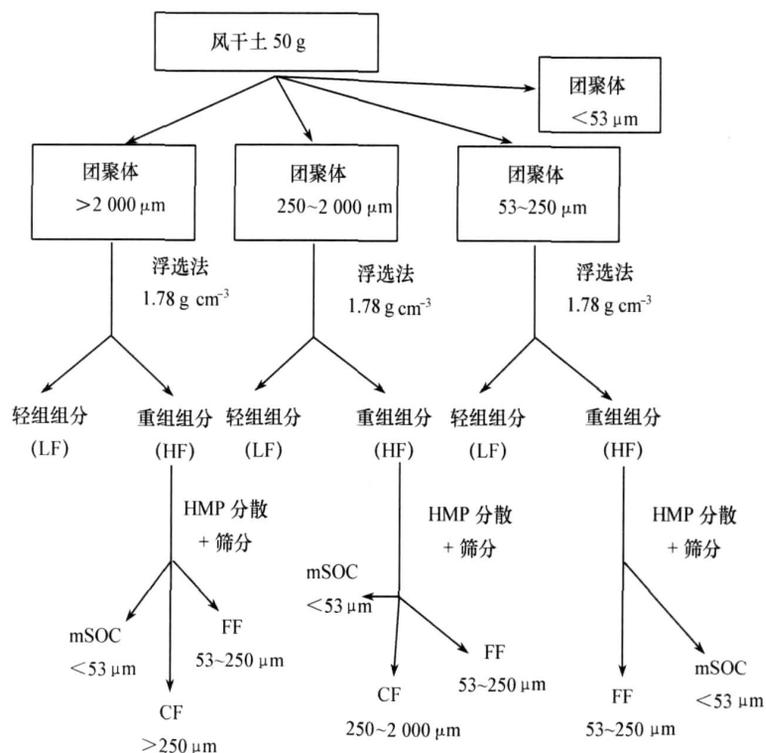


图 1 土壤团聚体及有机碳库的物理分组流程图

Fig. 1 Flow chart of physical fractionation of soil aggregates and organic carbon pools

mSOC: 矿物结合态有机碳; CF: 团聚体内 250~2 000 μm 颗粒有机物;

FF: 团聚体内 53~250 μm 颗粒有机物; HMP: 六偏磷酸钠

1.2.3 碳氮分析 土壤全氮含量用开氏消煮法测定^[13]。由于团聚体中的砂砾(sand)含量低且不含有机物^[14],所以在计算颗粒有机碳含量时需要做含砂量校正,去砂后有机碳含量用以下公式计算^[5]:

$$\text{去砂团聚体中有机碳含量}(C) = \frac{\text{有机碳含量}}{1 - \text{砂含量}(\%)}$$

1.2.4 统计分析 数据统计分析采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤及团聚体中有机碳含量的影响

供试旱地红壤本底的有机碳含量较低,粘粒含量较高,因此对有机碳的固持能力较强。增施有机肥均显著提高了土壤有机碳的含量,与 CK 处理相比,秸秆、绿肥、厩肥处理中有机碳分别增加了 1.38 g kg^{-1} 、 1.67 g kg^{-1} 、 3.38 g kg^{-1} (表 1),厩肥处理增幅最大。同其余类型土壤相比,华北平原的潮土在有机肥年施用量约 $18\ 000 \text{ kg hm}^{-2}$ (以鲜重计)的条件下,进行 15 a 的长期试验后,有机碳增加幅度为 99.0%^[15],旱地红壤中厩肥、绿肥处理每年有机肥输入量分别约为 $15\ 000 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $3\ 000 \text{ kg hm}^{-2}$ 的情况下,17 a 时间内的增幅均高于潮土。

表 1 不同施肥处理下旱地红壤有机碳和养分含量

Table 1 Contents of organic carbon and nutrients in soil different in treatment

| 施肥处理 Fertilized treatments | 有机碳 Organic C(g kg^{-1}) | 全氮 TN(g kg^{-1}) | C/N |
|-------------------------------|--|--------------------------------|-------|
| 秸秆 Stem | 7.54b | 0.74b | 10.18 |
| 绿肥 Green manure | 7.83b | 0.82b | 9.54 |
| 厩肥 Livestock manure | 9.54a | 1.03a | 9.26 |
| 对照 CK | 6.16c | 0.66c | 9.33 |

注:同列中字母不同表示差异达显著水平($p < 0.05$) Note: The different letters following the data in the same column show significant difference at 0.05 level

有机无机肥配施对不同粒级团聚体中有机碳含量影响的结果如图 2 所示。结果表明,各处理中土壤团聚体中有机碳含量随团聚体的粒级减小而降

低, $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 和 $250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 团聚体中有机碳的含量显著高于 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体的,前二者间差异未达显著水平。各有机肥处理均对土壤团聚体中有机碳含量的增加表现出不同程度的促进作用。厩肥的促进作用最显著, $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 、 $250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 、 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体中有机碳含量较对照处理分别提高了 71.7%、84.7%、76.2%,而另两种有机肥处理提高幅度为 10%~30%之间,且仅绿肥处理的 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体中有机碳含量与对照处理的相比差异达到显著水平。各处理中 $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 与 $250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 大团聚体中有机碳含量差异不显著^[16],但均显著高于 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 微团聚体有机碳含量。这一点与以前学者的研究是类似的:Puget 等认为大团聚体是由较新的有机物(碳)胶结较小的团聚体形成的^[17],有机碳含量高于微团聚体^[18]。

表 2 是不同粒级的团聚体有机碳在总有机碳中分布状况。对照处理中, $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 、 $250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 、 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体有机碳分别占总有机碳的 2.0%、24.5%、23.9%和 49.6%,增施有机肥后,大团聚体有机碳所占比例增加,其中以 $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 增加最快,增加了 1~3 倍, $250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 和 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体有机碳比例差异不显著,而 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体有机碳所占比例呈明显下降趋势,这是养分有效性提高和有机质品质改善的体现^[19]。尽管 $> 2\ 000 \mu\text{m}$ 大团聚体中有机碳在总有机碳中的比例差异较大,虽然施肥在一定程度上解释该结果,但其受耕作等农业措施影响较大,且含量较低,仅从此角度很难说明一些问题,有必要对其余粒级有机碳组分作进一步探讨。

表 2 不同粒级的团聚体有机碳占总有机碳的百分率

Table 2 Percentage of organic carbon to TOC in aggregates different in particle size (%)

| 施肥处理 Fertilized treatments | 团聚体粒级 Size of aggregate (μm) | | | |
|-------------------------------|--|-------------------|---------------|--------|
| | $> 2\ 000$ | $250 \sim 2\ 000$ | $53 \sim 250$ | < 53 |
| 秸秆 Stem | 5.9Ca | 30.4Ba | 25.9Ba | 37.8Ac |
| 绿肥 Green manure | 3.7Db | 28.3Ba | 23.7Ca | 44.3Ab |
| 厩肥 Livestock manure | 5.9Ca | 27.0Ba | 23.4Ba | 43.6Ab |
| 对照 CK | 2.0Cb | 24.5BB | 23.9Ba | 49.6Aa |

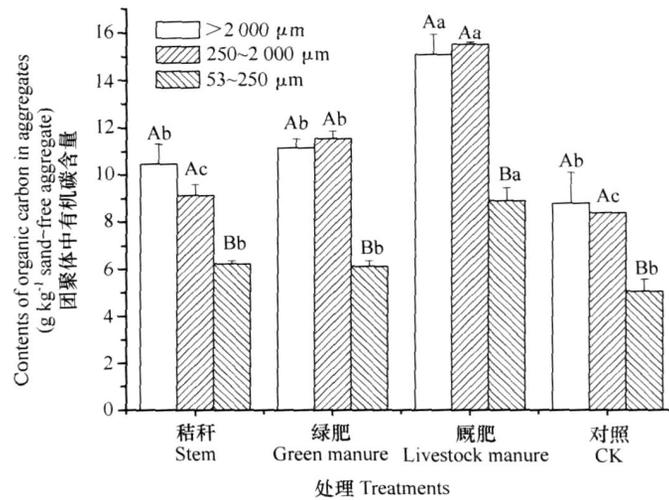


图2 有机无机肥配施对不同粒级团聚体中有机碳含量的影响

Fig. 2 Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on contents of organic carbon in aggregates different in particle size

注:图中小写字母的不同表示同一粒级团聚不同处理间分析差异显著($p < 0.05$),而大写字母的不同表示同一处理不同粒径团聚体间分析差异显著($p < 0.05$),下图表中相同 Note: The different small letters above bars mean significant difference at 0.05 level between treatments, with aggregate the same in particle size, however the different capital letters mean significant difference at 0.05 level between aggregates different in particle size, in the same treatment. It is the same in the following figures and tables

2.2 不同粒级团聚体中有机碳的物理组成

2.2.1 不同施肥处理中有机碳组分含量差异 由于 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体在全土中的质量分数很低(1%~4%),无法对这部分团聚体进一步分析,因此,下文中团聚体中有机碳的物理组成不包括 $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体中的组分。分析结果如图3所示。

从图中可以看出,轻组有机碳含量(LF-C)占总有机碳的7%~10%,这与文献中“LF-C占土壤总碳的2%~18%”^[20]的结果是一致的。不同施肥处理间LF-C含量顺序为:厩肥>绿肥>秸秆>CK,厩肥和绿肥对LF-C含量的促进作用均达到显著水平,其中厩肥处理其含量最高,达 0.93 g kg^{-1} ,为CK处理的1.8倍,对照处理和秸秆处理之间统计结果不显著。

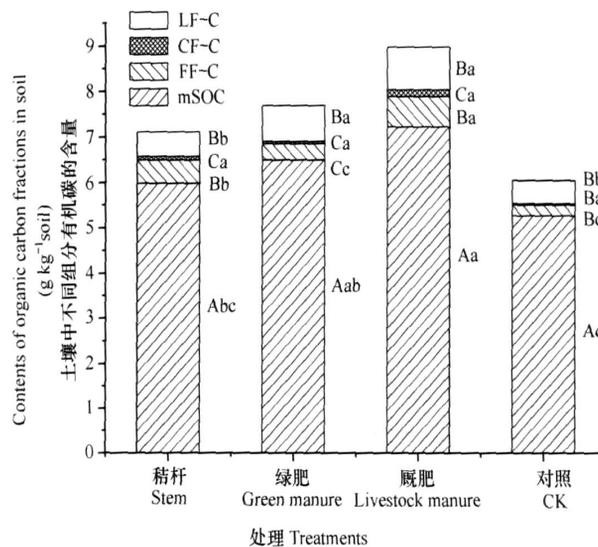


图3 有机无机肥配施对有机碳组分在总有机碳中含量的影响

Fig. 3 Effect of different formula of fertilization on contents of organic carbon fractions in soil

颗粒有机碳 (POM) 是土壤中相对活跃的有机碳库^[21]。结果表明,CF-C 和 FF-C 在土壤中含有量很低,分别占总有机碳的 0.5%~1.5% 和 4%~7%。对于 CF-C, 厩肥、秸秆、绿肥、CK 处理中含量分别为 148.5 mg kg^{-1} 、 75.6 mg kg^{-1} 、 46.1 mg kg^{-1} 、 29.6 mg kg^{-1} , 有机肥的施用虽然有促进作用,但统计结果不显著;对于 FF-C, 各处理的含量分别为 505.6 mg kg^{-1} 、 361.0 mg kg^{-1} 、 673.4 mg kg^{-1} 、 238.4 mg kg^{-1} , 各有机肥处理与 CK 处理的差异均达到显著水平, 厩肥处理效果最显著, 秸秆、绿肥效果次之。长期施肥使得 FF-C 显著增加, 增幅大于 CF-C, 这表明 FF-C 对有机碳固持极其重要^[16]。

矿物结合态有机碳 (mSOC) 与土壤矿物颗粒结合较紧密, 是土壤中最稳定的有机碳库, 也是有机碳主要组成部分, 一般很难被植物利用。结果表明 mSOC 占总有机碳的 76%~85% (图 3), 与 CK 相比, 有机肥处理 mSOC 中含量均有较大幅度的提高, 厩肥和绿肥处理增幅达显著水平。

对长期施肥处理中的有机碳组分与总有机碳进行相关性分析 (表 3), 结果表明:LF-C、CF-C、FF-C 和 mSOC 与总有机碳均具有显著相关性, 且达到极显著水平, 说明这些有机碳组分均是土壤有机碳的稳定成分。

表 3 红壤中总有机碳与各有机碳组分的相关性

| | LF-C | CF-C | FF-C | mSOC |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| TOC | 0.882 ** | 0.837 ** | 0.868 ** | 0.974 ** |

注: $n=12$; ** 表示显著性水平 $p<0.01$ Note: $n=12$; ** Correlation is significant at the 0.01 level

2.2.2 红壤团聚体的周转 对各粒级团聚体中有机碳组分进一步分析, 得出有机碳组分在去砂团聚体中的含量, 结果如图 4 所示。由于大团聚体中 FF-C (即图 4 中的 $250\sim 2\,000 \mu\text{m}$ FF-C) 含量随着大团聚体的存在时间延长而增加, 大量 FF-C 表明其周转速率慢, 因此大团聚体中的 CF-C/FF-C (即图 4 中 $250\sim 2\,000 \mu\text{m}$ CF-C/FF-C) 可以用来表示大团聚体周转的相对指标, 该值越大, 大团聚体周转越快^[22]。在秸秆、绿肥、厩肥和 CK 处理中, 该比值分别为 0.33、0.36、0.62、0.62, 有机肥的施入降低了土壤大团聚体的周转, 秸秆处理对大团聚体周转影响最大, 原因在于秸秆中木质素含量高, 腐殖化系数高^[23], 有更多的有机物质残留在土壤中稳定团聚体, 且秸秆处理下真菌数量多, 而真菌菌丝是团聚体作用的主要因子, 两方面作用使得秸秆处理的大团聚体周转最慢。

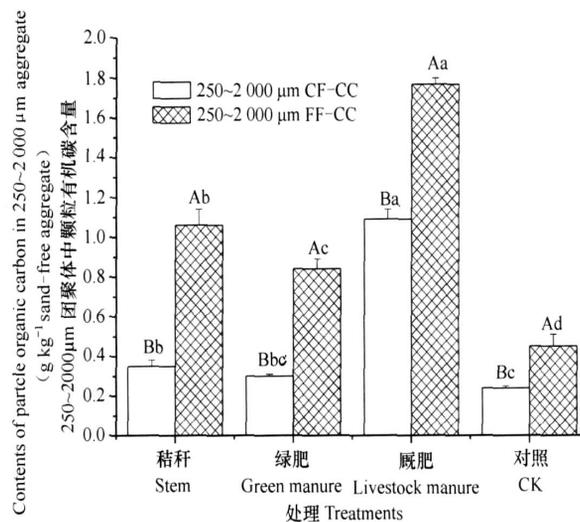


图 4 不同施肥处理对 $250\sim 2\,000 \mu\text{m}$ 团聚体中颗粒有机碳含量的影响

Fig. 4 Effect of fertilization treatment on contents of particle organic carbon in $250\sim 2\,000 \mu\text{m}$ aggregates

2.2.3 有机碳组分关系探讨 团聚体中有机碳组分 CF-C、FF-C 与 LF-C 是相互联系的, 且对稳定团聚体起重要作用^[5]。新鲜残茬 (LF) 结合入大团聚

体内形成 CF, 在微生物活动及农作措施的影响下, 大团聚体破碎为微团聚体, 同时 CF 分解形成 FF, 当又有新鲜残茬加入时, 这些组分与矿物质结合成大

团聚体,参与到新一轮循环中,这一过程被称为团聚体周转的概念性模型。

此概念模型更直观的体现在团聚体及有机组分 C/N 上(表 4),C/N 是有机物分解程度的一个指标^[24],C/N 比值越高,有机物的分解程度就越低,反之亦然^[25]——对于有机组分,有机残茬(LF)及 250~2 000 μm 团聚体中的 CF(表 4)是微生物利用后的有机物料,分解程度最低,因而 C/N 最高;粗颗粒有机物(250~2 000 μm 团聚体中的 CF)的分解程度低于细颗粒有机物(250~2 000 μm 和 53~250 μm 团聚体中的 FF),前者 C/N 高于后者,这种差异在不同粒级团聚体间(250~2 000 μm 团聚体中的 CF 与

53~250 μm 团聚体中的 FF)和较大团聚体内(250~2 000 μm 团聚体中的 CF 和 FF)明显,表明微团聚体形成时间晚于大团聚体。对于团聚体,由于大团聚体包含较多的新鲜残茬,团聚体的分解程度更多受新鲜残茬影响,因而其分解程度低于微团聚体。

目前对团聚体周转的概念性模型的发展和完善主要集中在 2 1 型粘粒为主的土壤中^[26],在 2 1 和 1 1 型矿物混合类型的红壤地区的研究甚少,本研究表明,长期有机无机肥配施使得团聚体周转的概念性模型得到较好体现,这主要是由于长期施肥使得红壤中有机碳含量显著提高,有机碳对团聚体形成的作用也得到了较大提高。

表 4 不同处理中团聚体和有机碳组分的 C/N 比

Table 4 C/N ratios in aggregates and organic carbon fractions different in treatment

| 处理 Fertilized treatments | 全土 Soil | 团聚体粒级 Size of aggregate (μm) | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|------------------------------|------------------|-------------|------|------|------------------|------|------|
| | | > 2 000 | | 250 ~ 2 000 | | | 53 ~ 250 | | |
| | | 团聚体 Aggregate | 团聚体 Aggregate | LF | CF | FF | 团聚体 Aggregate | LF | FF |
| 秸秆 Stem | 10.2 | 10.4 | 10.3 | 16.9 | 17.1 | 17 | 9.1 | 15.5 | 8.3 |
| 绿肥 Green manure | 9.5 | 10 | 10.5 | 16 | 15.2 | 11.7 | 8.9 | 14.2 | 9.7 |
| 厩肥 Livestock manure | 9.2 | 10 | 10.4 | 15.3 | 16.6 | 12.4 | 9 | 12.6 | 10.3 |
| 对照 CK | 9.3 | 10.4 | 10.5 | 14.8 | 15.7 | 9.1 | 8.8 | 11 | 8.8 |

3 结 论

1) 长期有机无机肥配施显著提高了土壤中有机碳的含量,土壤团聚体中有机碳含量随团聚体粒级减小而降低,厩肥处理对各粒级团聚体有机碳及总有机碳含量促进作用最明显。

2) 红壤中有机碳绝大部分以 mSOC 形式存在,LF-C、CF-C、FF-C 的含量较低;有机肥的施用显著地提高了红壤团聚体中有机碳组分 mSOC、LF-C、CF-C 和 FF-C 的含量;各有机碳组分与 TOC 均呈极显著相关。

3) 各粒径团聚体中 C/N 和 250~2 000 μm 团聚体内 CF-C/FF-C 比值均可表示团聚体周转速率的相对指标。有机肥的施入降低了土壤大团聚体的周转,秸秆处理对团聚体的形成和稳定效果优于厩肥处理。

致谢 本实验操作及文章撰写中得到中国科学院南京土壤研究所李忠佩研究员的指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 刘京,常庆瑞,李岗,等.连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究.水土保持通报,2000,20(4):24~26. Liu J, Chang Q R, Li G, et al. Study on effect of different continuous fertilization on soil aggregates stability (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2000, 20(4):24~26
- [2] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts. Soil and Tillage Research, 2005, 81:253~263
- [3] Whalen J K, Hu Q C, Liu A G. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6):1 842~1 847
- [4] Huang X X, Cao M, Wei C F, et al. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. Pedosphere, 2006, 16(5):660~667
- [5] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62:1 367~1 377
- [6] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregate in soils. Journal of Soil Science, 1982, 62:141~163
- [7] 何念祖,孟赐福.植物营养原理.上海:上海科学技术出版社,1987. He N Z, Meng C F, eds. Plant Nutrient Principle (In Chinese). Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 1987
- [8] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展.干旱区研究,2004,21(4):434~438. Wen Q, Guan X. Progress in the study on soil ag-

- gregate formation (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2004, 21 (4) : 434 ~ 438
- [9] 汪景宽,张继宏,王雷,等. 棕壤不同粒级微团聚体中磷素的保持与供应. *土壤通报*, 2001, 32(3) : 113 ~ 116. Wang J K, Zhang J H, Wang L, *et al.* Phosphorous retention and supply in microaggregates of brown earth with different fertility levels in Liaoning Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(3) : 113 ~ 116
- [10] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. *土壤学报*, 2001, 38(1) : 49 ~ 53. Chen E F, Guan L Z, Wang J K, *et al.* Compositional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1) : 49 ~ 53
- [11] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力中的作用. *土壤学报*, 1994, 31(1) : 18 ~ 28. Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1) : 18 ~ 28
- [12] 孔宏敏,何园球,吴大付,等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(5) : 782 ~ 786. Kong H M, He Y Q, Wu D F, *et al.* Effect of long-term fertilization on crop yield and soil fertility of upland red soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5) : 782 ~ 786
- [13] 鲁如坤主编. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. ed. *Analytic Method of Soil and Agriculture Chemistry* (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [14] Elliott E T, Palm C A, Recuss D E, *et al.* Organic matter contained in soil aggregates from a tropical chronosequence: Correction for sand and light fraction. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1991, 34: 443 ~ 451
- [15] 尹云锋,蔡祖聪,钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究. *应用生态学报*, 2005, 16(5) : 875 ~ 878. Yin Y F, Cai Z C, Qin S W. Dynamics of Fluvio-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5) : 875 ~ 878
- [16] Six J, Callewaert P, Lenders S. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 981 ~ 1 987
- [17] Puget P, Chen C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595 ~ 605
- [18] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 665 ~ 676
- [19] 李忠佩,焦坤,林心雄,等. 施肥条件下瘠薄红壤的生物化学性状变化. *土壤*, 2003, 35(4) : 304 ~ 310. Li Z P, Jiao K, Lin X X, *et al.* Effect of fertilizer application on biochemical properties of infertile red soils (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(4) : 304 ~ 310
- [20] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221 ~ 268
- [21] Richard T C, Six J, Paustain K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II. Changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40: 194 ~ 200
- [22] Six J, Elliott E T, Paustain K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2 099 ~ 2 103
- [23] 李忠佩,林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征. *生态学报*, 2002, 22(8) : 1 224 ~ 1 230. Li Z P, Lin X X. Characteristics of organic materials decomposition in infertile red soils (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8) : 1 224 ~ 1 230
- [24] Baldock J A, Oades J M. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, 1992, 15: 1 ~ 42
- [25] 李江涛,张斌,彭新华,等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响. *土壤学报*, 2004, 41(6) : 912 ~ 917. Li J T, Zhang B, Peng X H, *et al.* Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregates stability in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6) : 912 ~ 917
- [26] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7 ~ 31

EFFECT OF FERTILIZATION ON ORGANIC CARBON CONTENT AND FRACTIONATION OF AGGREGATES IN UPLAND RED SOIL

Xu Jiangbing^{1,2} Li Chengliang¹ He Yuanqiu^{1†} Wang Yanling^{1,2} Liu Xiaoli^{1,2}

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Physical fractionation and chemical analysis were conducted of upland red soils different in fertilization combination to study variation of organic carbon fractions in aggregates > 2 000, 250 ~ 2 000, 53 ~ 250 and < 53 μm in particle size. Results show that long-term combined application of organic manure and inorganic fertilizer could significantly increase content of to-

tal organic carbon in soil (TOC) and content of organic carbon in light fraction(LF-C) ,coarse fraction(CF-C) ,inside particle organic carbon-fine (FF-C) and mineral-associated organic carbon(mSOC) in aggregates of all sizes. And organic carbon contents in various fractions of aggregates were significantly related to TOC. Content of organic carbon in aggregates decreased with the decreasing particle size of aggregates. Application of livestock manure significantly improved SOC content ,dominated with mineral-associated organic carbon. Application of organic manure reduced turnover rate of macro-aggregates ,and incorporation of crop residues contributed more than application of organic manure to formation and stability of aggregates. In the red soil region ,the effect of long-term combined application of organic manure and inorganic fertilizer on formation and stability of aggregates should be intensified.

Key words Aggregate ;Organic carbon ;Upland red soil ;Different fertilization treatments