植物营养与肥料学报 2012,18(4):868-875
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应

张敬业[1],张文菊[1],徐明岗[1*],黄庆海[2],骆 坤[1]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部植物营养与肥料重点实验室,北京 100081;
2 江西省红壤研究所,国家红壤改良工程技术研究中心,江西进贤 331717)

摘要:采集不同施肥24年的红壤,采用物理分组的方法,观测了长期不同施肥下红壤有机碳及其组分变化,并结合历史资料分析了不同施肥模式对红壤有机碳及其颗粒组分的影响。结果表明,化肥配施有机肥(NPKM)处理下红壤总有机碳含量(10.33 g/kg),砂粒(2000～53 μm)、细粉粒(5～2 μm)和粘粒(<2 μm)组分中的有机碳含量显著高于其他处理。与不施肥(CK)相比,施用化肥(NPK、2NPK)和有机肥(NPKM、M)显著地提高了红壤有机碳在砂粒和粘粒中的分配比例,而降低了其在粗粉粒和细粉粒的分配比例。施化肥(NPK、2NPK)、单施有机肥(M)、化肥配施有机肥(NPKM)处理,土壤有机碳的平均固定速率分别为0.05 t/(hm^2·a)、0.18 t/(hm^2·a)、0.26 t/(hm^2·a)。相关分析表明,不同施肥模式下红壤有机碳的固定量与碳投入量之间存在着极显著的线性相关关系(R^2=0.909, P<0.01),土壤的固碳效率为8.1%;随着碳投入的增加,粗粉粒和细粉粒有机碳储量逐渐下降,而砂粒和粘粒中碳储量逐渐增加,并且粘粒增加速率要远远高于砂粒。以上结果说明,红壤中有机碳还没有达到饱和,还具有一定的固碳潜力,增加的有机碳主要固持在粘粒中,粘粒是红壤有机碳的主要固持组分。

关键词:红壤;长期施肥;有机碳;颗粒组分;碳投入
中图分类号:S153.6+21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)04-0868-08

Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China

ZHANG Jing-ye[1], ZHANG Wen-ju[1], XU Ming-gang[1*], HUANG Qing-hai[2], LUO Kun[1]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences /Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*
2 Jinxian Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Reasearch Center for Red Soil Improvement, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract: Through collecting the red soil under 24 years different fertilization, changes in total organic carbon (SOC) and its fractions in red soil were studied by physical partial size fractionation method. The effects of various fertilizations on soil organic carbon in total soil and its particle-size fractions were analysed based on historical recorded data. Results showed that manure combined with mineral fertilization (NPKM) had the highest SOC content (10.33 g/kg) compared with other treatments. Also, organic carbon concentration in sand (2000-53 μm), fine silt (5-2 μm), and clay (<2 μm) size fractions under the NPKM treatment was the highest of all treatments. Compared with the CK treatment, application of mineral NPK fertilizations (NPK, 2NPK) and the organic fertilizations (M,NPKM) significantly increased the distribution proportion of organic carbon in sand and clay size fractions, whereas significantly reduced the distribution proportion in coarse-silt and fine-silt size fractions. Averaged soil carbon sequestration rate under the treatments of mineral fertilizaters (NPK,2NPK), M and NPKM

收稿日期:2011-12-20　　**接受日期**:2012-04-23
基金项目:国家自然科学基金项目(40901141,40871148);国家重点基础研究发展计划("973"项目)(2011CB100501);公益性农业科研专项(201203030)资助。
作者简介:张敬业(1985—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事土壤环境修复方面的研究。E-mail: jingye112@126.com
*通讯作者 E-mail: mgxu@caas.ac.cn

were 0.05 t/(ha · a), 0.18 t/(ha · a), 0.26 t/(ha · a), respectively. There was a strong positive linear correlation between carbon sequestered and carbon input (R^2 = 0.909, P < 0.01) at this site, indicating that the conversion rate of carbon input to SOC was 8.1%. With the increase in carbon inputs, the carbon storages in coarse silt and fine silt fractions decreased gradually. However, carbon storages in sand and clay increased with higher increment in clay than that in sand. We concluded that organic carbon was mainly sequestrated in clay fraction, which was the key component for soil carbon sequestration. Soil organic carbon did not reach the saturation in red soil and have the potential to sequester more carbon.

Key words: red soil; long-term fertilization; soil organic carbon; particle-size fractions; carbon input

农田土壤有机碳(SOC)是土壤肥力的重要指标,其储量约占全球 SOC 储量的 10%[1],它在全球固碳减排中占据着非常重要的份额。除土壤本身的性质、气候因子和轮作外,施肥是影响农田有机碳转化和积累最重要的农业管理措施之一[2]。研究不同施肥模式下农田有机碳及其组分对施肥的响应关系,对于土壤培肥和实现粮食增产、减少温室气体的排放等具有非常重要的意义。

由于土壤有机碳的变化是一个相当缓慢的地球生物化学过程,其数量的变化不足以全面反映各种农业管理措施对土壤有机碳的影响。近 10 年来,从最初的化学提取(如腐殖质)到现在的非破坏性的物理性颗粒分级,有机碳的分组手段越来越广泛地被应用到农田土壤有机碳的研究中[3]。研究表明,土壤中有机碳约有 50% ~ 100% 与土壤颗粒相结合[4],因此,土壤颗粒分组能更大程度地反映土壤有机碳的变化[5]。Amelung 等[6]在北美通过降雨和温度差异研究了 21 个天然草地表层 10 cm 土壤的有机碳在颗粒大小组分中的分布,发现细砂粒有机质组分(20 ~ 250 mm)随年平均温度的增加而下降,随年平均降雨量的下降而增加,而粘粒中有机质变化恰恰相反。Gerzabek 等[7]和 Wu 等[8]研究表明施用化肥对不同粒级下有机碳含量影响较小,而施用绿肥和动物粪便都显著增加了各个粒级的含量。可见,国际上对于不同颗粒中有机碳的研究一直比较活跃。目前,国内主要集中于施肥措施对水稻土中不同团聚体有机碳的研究上,而对于长期不同施肥对红壤旱地不同颗粒组分中有机碳变化研究还较少[9-10]。因此,研究红壤中不同施肥下颗粒有机碳组分变化,对于了解有机碳周转及固存机制具有重要的意义。

系统的碳投入是影响土壤有机碳及组分的最直接的因素。农田土壤的碳投入包括作物残茬、根系分泌物及脱落物,秸秆还田或有机肥等。一般来说,在土壤有机碳没有达到饱和之前,土壤有机碳水平会随着碳投入的增加而提高。大量研究表明,土壤有机碳的增加量与碳投入水平一般呈显著的线性相关关系[10-11]。如 Zhang 等对我国北方地区种植 15 年的长期定位试验研究表明土壤有机碳的固定量与碳投入之间具有极显著的线性相关关系[10]。但也有研究表明,土壤有机碳对系统的碳投入水平的增加无响应[12]。尽管目前对于土壤有机碳与碳投入之间的响应关系研究较多,但对于不同土壤有机碳组分的碳变化与碳投入之间的关系并不十分清楚,特别是在红壤上的相关研究还鲜见报道。因此,本文采集红壤长期定位试验不同施肥处理的土壤,采用物理分组的方法,结合历史观测产量数据,分析了长期施肥 24 年后红壤总有机碳、不同颗粒组分有机碳的分配及其与碳投入水平的响应关系,为红壤培肥模式的选择提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　试验地概况

红壤旱地长期定位试验位于江西省进贤县江西省红壤研究所内(28°37′N,116°26′E)。该地区属亚热带季风气候,年均温 17.7℃,年均降水量 1727 mm。土壤母质为第四纪红黏土。该定位试验始建于 1986 年,试验前土壤的基本性质为: 有机碳含量 8.93 g/kg,全氮、全磷、全钾分别为 0.98、1.42 和 15.83 g/kg,pH 值为 6.0。小区面积 22.2 m^2。

本文选取该长期试验的 5 个不同的典型施肥处理: 1) 不施肥(CK); 2) 化肥氮磷钾配施(NPK); 3)2 倍量的化肥氮磷钾配施(2NPK); 4) NPK 配施有机肥 (NPKM); 5) 单施有机肥(M)。每个处理 3 次重复,采用随机区组排列。自试验开始起,一直采取春玉米(4 ~ 7 月)和夏玉米(7 ~ 10 月)轮作模式。每年肥料用量分两季施用,每季施用纯 N 60 kg/hm^2、P_2O_5 30 kg/hm^2 和 K_2O 60 kg/hm^2。化肥种类分别为尿素、钙镁磷肥、氯化钾; 有机肥为新鲜猪粪,含水量为 80%,干物质含碳量为 40%,N、

P_2O_5、K_2O 含量分别为 0.40%、0.35% 和 0.50%，施用量 15 t/hm^2。磷、钾肥和有机肥均作为基肥，氮肥用量的 2/3 作基肥，1/3 追肥。每年对作物产量进行记录，每季作物收获后，秸秆及残茬全部移走并采集土壤样品。

本文研究的土壤(0—20 cm 耕层)采集于 2010 年 11 月份，每个小区按 S 型采样并混匀。将样品中的根系、石块等挑出，土样自然风干，过 2 mm 筛后备用。

1.2 土壤颗粒分级方法

采用改进的 Anderson 等[13]的颗粒分级方法：称取 10 g 风干土样于 250 mL 烧杯内，加水 100 mL，在超声波发生器清洗槽中超声分散 30 min，然后将分散悬浮液冲洗过 53 μm 筛，直至洗出液变清亮为止。在筛上得到是的砂粒(53 ～2000 μm)和部分植物残体。根据 Stockes 定律，计算每一个粒级颗粒分离的离心时间，用离心机对洗出液进行离心。通过不同的离心速度和离心时间分离得到粗粉粒(5～53 μm)、细粉粒(2～5 μm)和粘粒(<2 μm)。其中，细粉粒和粘粒悬液采用 0.2 mol/L $CaCl_2$ 絮凝，再离心收集。各组分转移至铝盒后，先在水浴锅上蒸干，然后置于烘箱内，60℃下 12 h 烘干。烘干后，各组分磨细过 0.25 mm 筛，采用元素分析仪测定有机碳含量。

1.3 土壤固碳定量估算

土壤的固碳速率[C, t/(hm^2·a)]的估算采用差减法，即目前各试验处理耕层土壤的碳储量(S_t, t/hm^2)与该试验点起始年份耕层土壤储碳量(S_0, t/hm^2)差值的年(n)平均变化，即为研究期间土壤的平均固碳速率。

$$S_0 = C_0 \times B_0 \times D \quad (1)$$

$$S_t = C_t \times B_t \times D \quad (2)$$

$$C = (S_t - S_0)/n \quad (3)$$

不同颗粒组分中 SOC 储量的计算公式为：

$$S_i = C_t \times A_i \times B_t \times D \quad (4)$$

其中，A_i 为各粒级含量占全土的百分比(%)，C_0 和 C_t 分别为试验开始时和目前有机碳含量(g/kg)，B_0 和 B_t 分别为试验开始时和目前耕层土壤容重(g/m^3)，D 为耕层深度(20 cm)。

1.4 土壤碳投入的估算

系统的碳投入主要来自作物根系及其分泌物、茬、有机肥和秸秆。本试验每季作物收获后秸秆和残茬全部移除，所以有机碳的投入主要是根系及其分泌物和有机肥。由于不同的施肥处理导致土壤肥力不同进而影响作物产量，从而使得根系及其分泌物中有机碳进入土壤的含量不同，即碳投入不同。

由于作物根系及其分泌物不断更新变化，常规方法很难测得其含量。已有研究表明，用碳同位素示踪的方法得到作物生长至收获期间，来自根系的有机碳量(包括作物生长期间根系脱落物、分泌物及死亡根系)按可收获的地上部分碳量的 30% 来进行估算[14]，这种估算在国际上也被普遍采用[15-16]。本试验中，1986～2010 年每季都将玉米的秸秆和籽粒产量进行统计，根据玉米植株的含碳量为 44.4%[17]及有机肥施入量，计算有机碳的投入量：

$$A = [(YG + YR) \times 0.444 \times 30\% + M]/n \quad (5)$$

式中：A、YG 和 YR、M 分别代表根系有机碳投入量[t/(hm^2·a)]、籽粒产量(t/hm^2)和秸秆产量(t/hm^2)以及有机肥的碳投入量(C, t/hm^2)，n 代表施肥年份。

1.5 统计分析

所有数据采用 SPSS16.0 软件和 Excel 进行统计分析，处理间差异性检验采用 LSD 多重比较方法。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥下红壤总有机碳的含量

图 1 显示，施肥 24 年后，各施肥处理有机碳的含量较不施肥(CK)处理均显著增加，其中 NPKM 处理最高，达 10.33 g/kg，其次是单施有机肥的处理，有机碳含量为 9.51 g/kg。NPK 配施条件下土壤有机碳比不施肥提高了 41%，但增量化肥(2NPK)

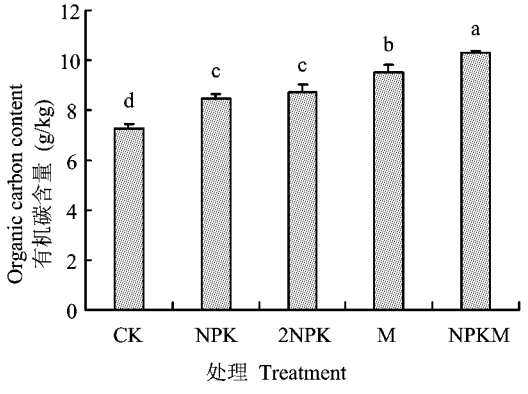

图 1 长期不同施肥下红壤有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content of red soil with long-term different fertilizations

[注(Note)：柱上不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 5% level.]

与常量化肥(NPK)处理间土壤有机碳无显著差异,平均为 8.61 g/kg。与起始年份(1986 年)有机碳的含量(8.93 g/kg)相比,NPKM 和 M 处理有机碳含量分别提高了 15.7% 和 6.5%,常量施肥和增量施肥基本维持土壤有机碳原有水平,而不施肥处理下降了 18.1%。

2.2　红壤不同颗粒组分中有机碳对施肥的响应

2.2.1 长期不同施肥对不同颗粒组分有机碳含量的影响　长期不同施肥处理对土壤颗粒组分有机碳含量具有显著影响(表 1)。施肥显著提高了砂粒、细粉粒和粘粒中有机碳含量。粗粉粒中有机碳含量对化肥不敏感,而有机肥(M、NPKM)显著降低了粗粉粒中的有机碳含量。不施肥处理中砂粒、细粉粒和粘粒中的有机碳含量最低,而粗粉粒中有机碳含量最高。与不施肥相比,施用化肥(NPK、2NPK)使砂粒中有机碳含量增加了约 1.3 倍,细粉粒有机碳含量增加了约 1.13 倍,而粘粒有机碳含量仅提高了 14.2%～15.9%。施用有机肥(M、NPKM)使砂粒中有机碳含量增加了 1.9 倍,细粉粒有机碳含量增加了 1.4 倍,粘粒有机碳含量提高了 26.4%～36.3%,而施用有机肥(M、NPKM)显著降低了粗粉粒的有机碳含量,降低幅度为 26.9%～29.1%。

表 1　长期施肥下红壤不同粒径颗粒的有机碳含量(g/kg)

Table 1　Content of organic carbon in different particle size fractions of red soil with long-term fertilizations

处理 Treatment	砂粒 Sand	粗粉粒 Coarse silt	细粉粒 Fine silt	粘粒 Clay
CK	14.25 c	4.09 a	7.83 d	9.22 c
NPK	18.55 b	3.78 ab	9.12 bc	10.69 b
2NPK	18.80 b	3.56 ab	8.74 cd	10.53 b
M	26.47 a	2.90 b	10.13 b	11.65 ab
NPKM	27.29 a	2.99 b	12.16 a	12.57 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示在5%水平差异显著 Values followed by different letters within a column are significantly different at the 5% level.

2.2.2 长期不同施肥对红壤总有机碳在不同粒径颗粒中分布比例的影响　从图 2 可以看出,长期不同施肥显著地影响了红壤总有机碳在不同颗粒中的分布。施肥显著提高了有机碳在砂粒和粘粒中的分配比例,降低了有机碳在粉粒中的分配比例。与不施肥相比,施用化肥处理 NPK、2NPK 使砂粒有机碳的分配比例分别提高了 2.2、4.9 个百分点,使粘粒中有机碳的比例分别提高了 1.2、1.4 倍,而使有机碳在粉粒(粗粉粒和细粉粒)中的比例分别下降了 0.6、1.3 倍。施用有机肥处理 M、NPKM 使砂粒有机碳的分配比例分别提高了 1.8、2.7 个百分点,在粘粒中的分配比例分别提高了 1.5、1.6 倍,而使粗粉粒和细粉粒中有机碳的分布比例分别降低了 1.0、1.4 倍。

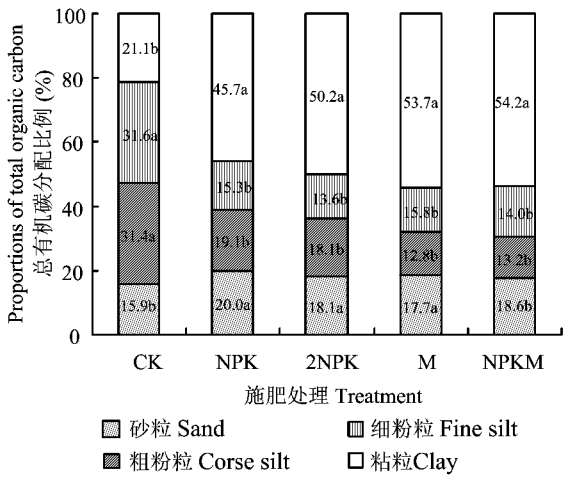

图 2　不同施肥下红壤总有机碳在不同粒径颗粒中的分布

Fig. 2　Distribution of total organic carbon in different particle size fractions of red soil with different fertilizations

[注(Note): 数据后不同字母表示同一粒级下不同处理在5%水平差异显著 Values followed by different letters were significantly different among different treatments in the same fraction at the 5% level.]

2.3　长期不同施肥下红壤系统碳投入量的变化

不施肥或施化肥处理下,系统的碳投入主要来源于作物根系及分泌物。由图 3 可知,长期不同施肥措施显著提高了作物生物量,进而提高了系统的总碳投入量。与不施肥相比,NPK 处理中来源于作物根系有机碳的归还量提高了 189%。与 NPK 相

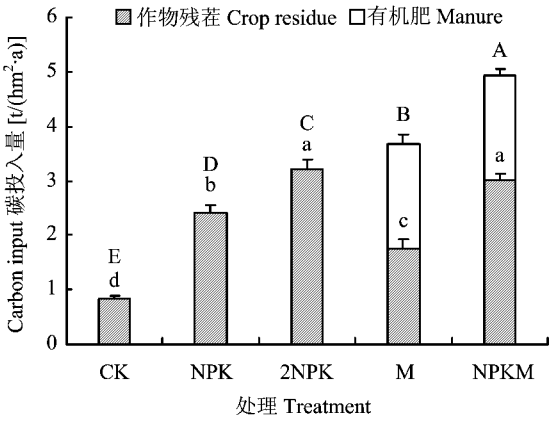

图3 不同施肥模式下每年来自于作物生物量和有机肥的碳投入量

Fig. 3 Annual carbon input from crop biomass and manure under different fertilization systems

[注(Note):柱上不同小写字母代表不同处理间来自于作物生物量的碳投入的显著性差异($P=0.05$),不同大写字母表示不同处理间总有机碳投入的显著性差异($P=0.05$) Different small letters above the bars indicate a significant difference ($P=0.05$) in carbon input by crop biomass among different treatments and different capital letters above the bars indicate a significant difference ($P=0.05$) in total carbon input among different treatments.]

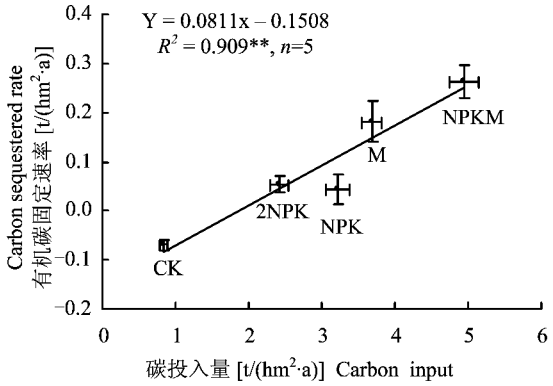

图4 长期不同施肥下碳投入量和有机碳固定速率的关系

Fig. 4 Relationship between carbon input and carbon sequestered rate under long-term different fertilizations

比,2NPK也显著提高了根系有机碳的归还量,根系有机碳归还量达3.23 t/(hm²·a),与NPKM处理作物根系的有机碳归还量基本相当。虽然与不施肥相比,单施有机肥显著提高了作物产量,但作物根系的归还量仍显著低于施化肥处理。总之,NPKM处理中总碳的投入量最大,达到了4.95 t/(hm²·a),其次为M处理,为3.68 t/(hm²·a)。

2.4 长期不同施肥模式对红壤有机碳固定速率及其不同组分碳储量的影响

由图4可知连续施肥24年后,不施肥处理表现出土壤有机碳的损失,平均损失速率为0.07 t/(hm²·a)。而各施肥处理表现出明显的有机碳累积,尤其以M和NPKM有机碳的累积速率最高,分别达0.18 t/(hm²·a)和0.26 t/(hm²·a)。

相关分析表明,红壤有机碳的固定速率与系统总碳投入之间呈现极显著的正相关关系($P<0.01$),红壤有机碳的固定速率随着碳投入的增加而增加,这表明所研究的红壤仍具一定的固碳潜力。有机碳的固定量和碳投入的相关关系通过以下线性方程来表示:$Y=0.0811x-0.1508$,其中x[t/(hm²·a)]代表碳投入量,Y[t/(hm²·a)]代表有机碳固定量,相关方程的斜率表示土壤对碳投入的转化效率,截距表示当土壤的固碳量为零时所需的维持投入量。本研究结果表明,24年期间,约有8.1%的碳投入转化为了红壤有机碳,而每年需要投入1.86 t/hm²的碳,才能使该试验点红壤有机碳维持在起始水平(8.93 g/kg)。

通过研究分析长期不同施肥24年后红壤不同组分中碳储量与碳投入的关系表明,红壤砂粒和粘粒的碳储量与总有机碳投入之间具有显著的正相关关系(图5),但粗粉粒和细粉粒SOC储量却随着年碳投入的增加而下降。砂粒和粘粒SOC储量分别从1.97 t/hm²增加到6.07 t/hm²和从6.54 t/hm²增加到14.96 t/hm²,而粗粉粒和细粉粒SOC储量分别从5.07 t/hm²减少到3.49 t/hm²和从6.09 t/hm²减少到3.38 t/hm²。从拟合的方程我们可以看出,粘粒中有机碳的固定速率是砂粒的2.1倍,可见增加的有机碳主要固持在粘粒中。

3 讨论

农田系统的碳投入主要来自作物根系及其分泌物、根系残茬、有机肥投入和秸秆还田。本研究通过24年的长期定位试验,证实了平衡施肥和施用有机肥可以通过增加作物产量和残茬的归还量,进而增加土壤有机碳的含量,尤其是化肥有机肥配施效果最好。因为施肥一方面主要增加了作物产量,使归还的土壤中的根茬和根系分泌物增加;另一方面是施用有机肥为土壤提供了有机碳源增加了微生物活性[18],促进了土壤有机碳和养分的转化,从而提高了土壤有机碳的固定量。

土壤中由于不同大小颗粒的表面化学性质不

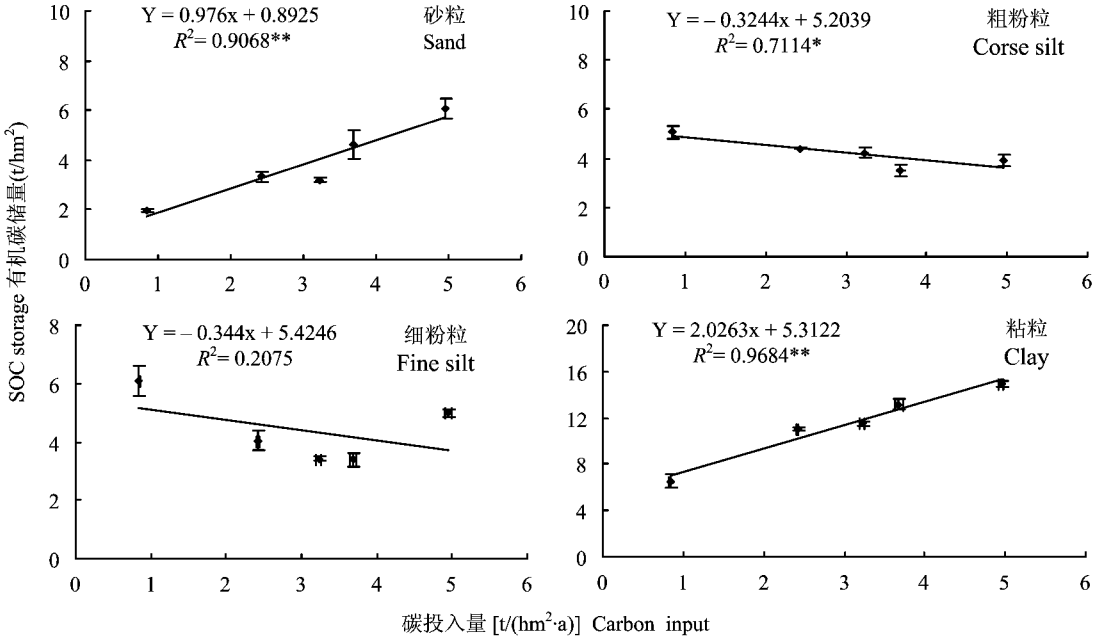

图 5　长期不同施肥模式下各组分碳储量与系统每年碳投入的关系

Fig. 5　Relationship between soil organic carbon (SOC) in different particle-size fractions and cumulative carbon input under long-term fertilization systems

同，其结合的有机碳的量、组成、化学性质、抗分解能力也存在本质区别[19-20]，而这些不同大小颗粒结合有机碳以及不同特性的综合作用使各级土壤颗粒结合的有机碳对耕作、施肥等农业措施的反应不同[21]。土壤砂粒有机碳主要是新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时或者是过渡的有机碳，它对农业管理措施十分敏感[22]。本研究结果表明，砂粒有机碳对施肥响应最敏感，平均增幅相当于总有机碳的 2.4 倍，是其它粒径组分的 1.9 ～ 2.8 倍。长期施肥显著增加了砂粒有机碳的含量，化肥配施有机肥效果最佳，比不施肥处理（CK）增加了 91.5%，比单施化肥处理（NPK）的增加了 47.1%。杨长明等[23]在田间条件下比较了不同施肥模式对华北平原潮土土壤有机碳组分的影响，发现有机无机肥配施处理的砂粒中有机碳含量比不施肥处理（CK）增加了 138.9%，比单施化肥处理（NPK）的增加了 55.2%。主要原因是有机肥是经生物物质、动植物废弃物、植物残体加工而来，提供了与砂粒有机碳组成相近的有机碳组分，所以砂粒有机碳的增加效果最好。Wu 等[8]和佟小刚[24]等研究表明，施用有机肥后土壤各个组分中有机碳含量均增加，但本研究施用化肥和有机肥后粗粉粒含量降低，与 CK 相比，施肥处理中粗粉粒有机碳含量平均降低了 11.1%，主要原因可能是与粗粉砂粒结合的有机质最易分解[25]，粗粉粒是土壤有机质的易分解碳库[21]，是有机碳向更细颗粒转移的中转站[9]，施用化肥和有机肥后加速了粗粉粒向更细组分的有机碳的转化。施化肥和有机肥显著增加了土壤粘粒碳的含量，其含量占据了土壤总有机碳的 44.2% ～ 54.2% 的比例，说明了长期施肥下粘粒在土壤固定有机碳中起着重要的作用。

本研究表明，土壤有机碳的固定量与碳投入水平之间具有极显著的线性关系，表明红壤旱地有机碳还没有饱和，还具有一定的固碳潜力，投入有机碳的转化效率为 8.1%。该结果与 Kong 等[26]在亚热带地区的研究结果相当，但略高于我国华北地区（6.9%～7.7%）的转化效率，主要是由于红壤的质地粘重。研究表明，粘粒是土壤有机碳固定的重要机制，粘粒较大的表面积和对有机碳物理保护能促进土壤固定更多的有机碳。本研究结果中红壤的转化效率明显低于我国东北地区的转化效率[27]，主要原因是该地区高温、高湿，微生物活性增强，有机碳周转较快，损失多[27-28]。本研究表明，该试验点红壤中每年至少要投入 1.86 t/hm^2 的碳才能维持有机碳的原有水平，这对于农业生产中的维持施肥和环境友好的可持续发展具有重要的指导意义。另

外,本研究表明红壤砂粒和粘粒的碳储量与总有机碳投入之间存在显著的正相关关系,但粗粉粒和细粉粒有机碳储量却随着年碳投入的增加而下降,这表明新增加的有机碳主要分配在砂粒和粘粒中,同时减少了粗粉粒和细粉粒中的碳储量,主要原因可能是施用化肥和有机肥为微生物提供了直接的速效养分,加强了微生物活动,代谢分泌物增多,这些分泌物又直接由粗颗粒转移至细颗粒,从而促进粘粒有机碳积累[16],同时微生物活动增加促进了粗粉粒和细粉粒中碳的分解,降低了其碳的储量。粘粒平均有机碳储量分别是砂粒、粗粉粒和细粉粒的2.54、2.54和2.63倍,可见粘粒是有机碳固持的主要组分。

4 结论

1) 施肥显著提高了旱地红壤有机碳的水平,施用有机肥尤其是化肥配施有机肥能显著提升红壤有机碳水平,施肥24年后红壤中有机碳比不施肥平均提高了41%。

2) 施有机肥显著地改变了红壤中有机碳在不同粒径中的分配比例,显著提高了有机碳在砂粒和粘粒中的分配比例,有机无机肥配施条件下有机碳在砂粒和粘粒中的分配比例分别达到了18%和53%。随着碳投入增加,粗粉粒和细粉粒有机碳储量逐渐下降,而砂粒和粘粒中碳储量逐渐增加,粘粒的增加速率(202.6%)要显著高于砂粒(97.6%),可见新增加有机碳主要固定在粘粒中,粘粒是红壤有机碳固持的主要组分。

3) 红壤有机碳的固定量与有机碳的投入量之间存在着极显著的线性关系;碳投入的平均转化效率为8.1%,红壤有机碳并没有达到饱和,还具有一定的固碳潜力。

参 考 文 献:

[1] Paustian K, O Andrén, Janzen H H *et al.* Agricultural soils as a sink to mitigate CO_2 emissions[J]. Soil Use Manag., 1997, 13: 230-244.

[2] Hutchinson J J, Campbell C A, Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture[J]. Agric. For. Meteorol., 2007, 142(2-4): 288-302.

[3] 武天云, Jeff J. Schoenau,李凤民,等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717-722.
Wu Tianyun, Schoenau J J, Li F M *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(4): 717-722.

[4] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions[J]. Biol. Fert. Soils, 1991, 12(2): 81-88.

[5] Rasmussen P E, Allmaras R R, Rohde C R *et al.* Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat-fallow system[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(3): 596-600.

[6] Amelung W, Zech W, Zhang X *et al.* Carbon, nitrogen, and sulfur pools in particle-size fractions as influenced by climate[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 172-181.

[7] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchmann H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65: 352-358.

[8] Wu T, Schoenau J J, Li F *et al.* Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the loess plateau of China[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168(1): 100-107.

[9] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 卢昌艾. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3664-3671.
Tong X G, Xu M G, Zhang W J, Lu C A. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(11): 3664-3671.

[10] Zhang W J, Wang X J, Xu M G *et al.* Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. Biogeosciences, 2010, 7(2): 409-425.

[11] Campbell C A, Vandenbygaart A J, Grant B *et al.* Quantifying carbon sequestration in a conventionally tilled crop rotation study in southwestern Saskatchewan[J]. Can. J. Soil Sci., 2007, 87(1): 23-38.

[12] 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.

[13] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R *et al.* Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45(4): 767-772.

[14] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2000, 163(4): 421-431.

[15] Chander K, Goyal S, Mundra M C *et al.* Organic matter, microbial biomass and enzyme activity of soils under different crop rotations in the tropics[J]. Biol. Fert. Soils, 1997, 24(3): 306-310.

[16] Amos B, Walters D T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70(5): 1489-1503.

[17] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.

[18] Bhattacharyya R, Pandey S C, Saha S *et al*. Effect of long term manuring on soil organic carbon, bulk density and water retention characteristics under soybean-wheat cropping sequence in N - W Himalayas[J]. Indian Soc. Soil Sci., 2004, 52: 238-242.

[19] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions[J]. Biol. Fert. Soils, 1991, 12: 81-88.

[20] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. Soil Till. Res., 2002, 63: 133-139.

[21] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. Eur. J. Soil Sci., 2001, 52(3): 345-353.

[22] Mrabet R, Saber N, El-Brahli A *et al*. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco [J]. Soil Till. Res., 2001, 57(4): 225-235.

[23] 杨长明,欧阳竹,董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 887-892.
Yang C M, Ouyang Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization[J]. Chin. J. Ecol., 2005, 24(8): 887-892.

[24] 佟小刚, 王伯仁, 徐明岗, 张文菊. 长期施肥红壤矿物颗粒结合有机碳储量及其固定速率[J]. 农业环境科学, 2009, 28(12): 2584-2589.
Tong X G, Wang B R, Xu M G, Zhang W J. Change characteristics of organic carbon stocks and sequestration rate of particle-size fractions in red soil under long-term fertilizations [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2009, 28(12): 2584-2589.

[25] Dalai R C, May R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland V. Rate of loss of total nitrogen from the soil profile and changes in carbon: nitrogen ratios[J]. Aust. J. Soil Res., 1986, 37: 493-504.

[26] Kong X, Dao T H, Qin J *et al*. Effects of soil texture and land use interactions on organic carbon in soils in North China cities´ urban fringe[J]. Geoderma, 2009, 154(1-2): 86-92.

[27] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H *et al*. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization [J]. Plant Soil, 2005, 268(1): 319-328.

[28] Yan H, Cao M, Liu J *et al*. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved soil management in agricultural soils of China [J]. Agric., Ecosyst. Environ., 2007, 121(4): 325-335.