

长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率

蔡岸冬¹, 张文菊^{1*}, 申小冉², 肖婧^{1,3}, 韩天富¹, 徐明岗¹

[1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;

2 中蔬种业科技(北京)有限公司, 北京 100081; 3 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070]

摘要:【目的】探讨不同施肥措施土壤有机碳在不同粒径颗粒中的分配及变化情况, 可揭示各级颗粒中有机碳与外源有机碳输入之间的定量关系。【方法】依托南方红壤连续 20 年长期定位施肥试验, 依据外源有机碳累积输入梯度, 选择不施肥(CK)、氮磷钾化肥配施(NPK)、氮磷钾化肥与秸秆配施(NPKS)、轮作条件下氮磷钾化肥与有机肥配施(NPKMR)、氮磷钾化肥与有机肥配施(NPKM)、单施有机肥(M)、增量氮磷钾化肥与增量有机肥配施(1.5NPKM)7 个处理, 并采用物理分组方法将土壤颗粒分为砂粒(53~2000 μm)、粗粉粒(5~53 μm)、细粉粒(2~5 μm)和粘粒(<2 μm)4 个组分。【结果】与不施肥相比, 长期施肥均能显著增加土壤总有机碳及各级颗粒中的有机碳的储量, 其中以施用有机肥的效果最明显。不同施肥处理各级颗粒中以粘粒的有机碳储量最高, 平均为 16.26 t/hm^2 。施用有机肥和秸秆还田均能显著增加砂粒中有机碳的分配比例, 降低粘粒有机碳的分配比例, 而对粗粉粒和细粉粒无显著影响。土壤砂粒所占的质量百分比及其与粗粉粒、细粉粒和粘粒的比值均与粗粉粒、细粉粒和粘粒组分中有机碳的浓度呈显著正相关关系, 表明小颗粒(粗粉粒、细粉粒和粘粒)中有机碳的固持和富集促进了大颗粒(砂粒)的形成与稳定。各级颗粒之间, 施用有机肥处理的土壤粘粒组分的固碳速率最快, 为 0.29~0.52 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 其次为砂粒[0.30~0.40 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], 而粗粉粒和细粉粒的固碳速率基本相当为 0.09~0.16 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。分析结果还表明, 土壤总有机碳及各级颗粒有机碳与外源有机碳的输入呈显著正线性相关关系, 其中土壤总固碳效率为 10.57%, 而各级颗粒之间, 粘粒和砂粒组分的固碳效率(4.25%和 3.60%)相当于粗粉粒和细粉粒(1.73%和 1.00%)的 2 倍以上。【结论】南方红壤各级颗粒中有机碳均没有出现饱和现象, 有机碳主要在土壤粘粒和砂粒组分中富集, 细颗粒中有机碳的富集会促进大粒径土壤颗粒的形成, 而粘粒是土壤固碳效率最重要的矿物颗粒组成部分。表明长期配施有机肥不仅是红壤有机质提升的重要措施, 也是改善红壤结构的重要途径。

关键词: 长期施肥; 红壤; 土壤有机碳; 土壤颗粒; 固碳效率

中图分类号: S152.3; S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)06-1431-08

Soil carbon sequestration efficiency of different particle-size fractions after long-term fertilization

CAI An-dong¹, ZHANG Wen-ju^{1*}, SHEN Xiao-ran², XIAO Jing^{1,3}, HAN Tian-fu¹, XU Ming-gang¹

[1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China;

2 China Vegetable Seed Technology Co., Ltd. (Beijing), Beijing 100081, China;

3 School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China]

Abstract: 【Objectives】 Our objective was to explore effects of various long-term fertilization practices on soil organic carbon distribution ratios and quantitate the relationship between organic carbon sequestered and additional organic carbon input in different particle-size fractions. 【Methods】 The designed treatments were selected to obtain a gradient of additional carbon input, including no fertilizer control (CK), chemical nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers (NPK), straw return with chemical fertilizers (NPKS), chemical fertilizers combined with

收稿日期: 2015-04-26

接受日期: 2015-06-18

网络出版日期: 2015-07-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371247); 公益性行业(农业)科研专项(201203030, 201303126)资助。

作者简介: 蔡岸冬(1987—), 男, 河南商丘人, 硕士, 主要从事土壤培肥与改良方面的研究工作。E-mail: caiandong0906@163.com

* 通信作者 Tel: 010-82108661, E-mail: zhangwenju01@caas.cn

manure (NPKM), chemical fertilizer combined with manure under soybean rotation (NPKMR), manure (M) alone, and high application rate of NPKM (1.5NPKM). Soil samples were collected after twenty-year fertilization practices, and separated into sand (53–2000 μm), coarse silt (5–53 μm), fine silt (2–5 μm) and clay (<2 μm) by the physical fractionation. **【Results】** Compared with CK, the total soil organic carbon (SOC) stocks and those of the particle-size fractions are significantly increased under the fertilization treatments. The long-term application of manure with or without chemical fertilizers is the most effective practice for increasing soil organic carbon. The SOC stock in the clay fraction (16.26 t/hm^2) is the highest among the four particle-size fractions after the 20 years fertilization treatments. The treatments with manure and straw incorporation significantly increase the SOC distribution proportion in the sand size fraction (13.33%–25.36%), while the treatments reduce the proportions in the clay-size fraction, and there are no significant changes in both the coarse and fine silt fractions. However, the application of chemical fertilizer has less effects on the organic carbon distribution ratios of the fractions. The concentrations of SOC in the coarse silt, fine silt, and clay size fractions are significantly correlated with the mass proportion of sand size fraction and the mass ratio of sand to coarse silt, fine silt, and clay size fractions, respectively. The treatments with manure show higher carbon sequestration rates in the clay [0.29–0.52 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], sand fractions [0.30–0.40 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]. Meanwhile, the coarse and fine silt fractions have low and equal sequestration rates [0.09–0.16 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$] after the 20 years fertilizations. Significantly positive linear correlations are observed between the SOC sequestered in total and all fractions with the gross accumulated organic carbon input during the 20 years. The sequestration efficiency of total organic carbon is 10.57%. The sequestration efficiencies in the clay (4.25%) and sand fractions (3.60%) are about double of those in the coarse silt (1.73%) and fine silt fractions (1.00%). **【Conclusions】** Our results indicate that in red soil, SOC accumulation mainly occurs in the clay and sand size fractions. Accumulation of SOC in the clay-size fraction benefits the sand-size fractions (aggregates) formation. Application of manure is not only an important practice for soil carbon sequestration, but also an optimal management to improve physical structure of red soil.

Key words: long-term fertilization; red soil; soil organic carbon; soil particle; carbon sequestration efficiency

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,同时,也是土壤肥力的重要标志之一,并与土壤的物理、化学、生物等许多属性都存在直接或间接的关系^[1],因此,探究农田土壤有机碳固持机理对于提高土壤肥力及作物产量均具有重要意义。土壤有机碳的动态变化主要取决于有机碳的输入和输出水平,而农田土壤有机碳的输入主要来源于根茬、秸秆和有机肥。一般而言,土壤有机碳含量随着外源有机碳输入量的增加而增加^[2–3],而单位外源有机碳输入下土壤有机碳的变化量即为土壤固碳效率^[4],不同气候条件、管理措施及土壤属性是其变化的主要制约因子。因此,Srinivasarao 等^[5]研究印度热带半干旱地区表明土壤固碳效率为 25%,高于 Rasmussen 等^[6]报道美国及加拿大温带地区的土壤固碳效率(14%–21%)。Majumder 等^[7]对灌溉条件水稻—小麦轮作制度下的研究发现其固碳效率为 14%,Zhang 等^[8]发现相同轮作制度下土壤的固碳效率为 20%,远高于水稻—黄麻轮作制度下的固碳效率(5%)^[9]。依据土壤质地分组得到的土壤不同大小

颗粒在调节土壤物理、化学和生物过程以及控制土壤有机碳分解中起着重要作用,因此,不同大小颗粒对土壤有机碳的动态变化也起着不同程度的作用^[10–11]。大多数研究者认为土壤有机碳主要集中于粘粒上^[12–13],但也有研究报道细粉粒中有机碳所占的比例最大^[14]。Diekow 等^[15]研究表明施用不同量的氮肥均能增加各级颗粒有机碳的含量;Aoyama 等^[16]研究认为长期施用有机肥主要增加了大团聚体(>0.25 mm)的有机碳含量,施用化肥并没有增加各级颗粒有机碳含量;Xu 等^[17]研究表明,不同程度的秸秆还田均能增加颗粒(>0.53 mm)有机碳含量;Tong 等^[18]研究发现,不同施肥处理下(化肥、秸秆和有机肥)矿物结合态颗粒(<0.053 mm)的固碳效率最大。综上所述,关于土壤的固碳效率已有大量报道,但大多研究主要集中在土壤总有机碳固持效率方面,对于长期不同施肥处理下各级颗粒固碳效率的研究还比较薄弱。我国南方红壤地区占农田可利用土壤面积的 6.5%,对粮食安全起着重要作用^[19],因此,本研究以红壤长期定位试验为依托,

试图通过 20 年连续不同施肥的培养,探讨长期不同施肥措施下各级颗粒中有机碳储量、固碳速率及固碳效率的差异性,以期能够深入了解土壤有机碳固持效率的机制,为土壤肥力培育及可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

供试土壤采自中国农业科学院湖南祁阳(东经 111°52',北纬 26°45')肥料长期试验站,是我国亚热带地区具有富铝化特征的地带性土壤,成土母质为第四纪红土。年均气温 18℃,≥10℃积温 5600℃,年均降水量 1255 mm,年均蒸发量 1470 mm,无霜期约 300 d,年日照时数 1610 h。试验开始于 1990 年,种植方式均为小麦-玉米轮作,一年两熟;试验开始时(1990 年)土壤有机碳含量 7.47 g/kg,全氮 1.07 g/kg,全磷 0.45 g/kg,全钾 13.28 g/kg;土壤颗粒组成中,砂粒(53~2000 μm)含量 11.9%,粗粉粒(5~53 μm)35%,细粉粒(2~5 μm)10.9%,粘粒(<2 μm)41%。

1.2 试验设计

本研究选择其中 7 个处理:1)不施肥(CK);2)氮、磷、钾化肥配施(NPK);3)氮、磷、钾化肥与秸秆配施(NPKS);4)轮作条件下氮、磷、钾化肥与有机肥配施(NPKMR);5)氮、磷、钾化肥与有机肥配施(NPKM);6)单施有机肥(M);7)增量氮、磷、钾化肥与增量有机肥(处理 5 的 1.5 倍)配施(1.5NPKM)。每处理 2 次重复,试验小区面积为 196 m²,随机排列。该试验地无灌溉设施,不灌水。肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,其用量分别为 N 300 kg/(hm²·a)、P₂O₅ 120 kg/(hm²·a)、K₂O 120 kg/(hm²·a)。除 1.5NPKM 处理之外,所有施尿素处理的氮肥用量相同,有机肥为鲜猪粪,其中有有机肥处理(配施)的氮 70% 来源于有机肥,有机肥处理只考虑其中的氮养分,不考虑磷、钾养分。秸秆还田处理为每季作物秸秆的一半还田,未考虑其它养分。肥料于整地前全部以基肥形式施入。

于 2010 年 5 月小麦收获后采集土壤样品,采样深度为 0—20 cm,每个小区采集 3 个点。土壤样品采集后先在室内风干、磨碎,然后过 2 mm 筛,备用。在研磨过程中弃去 >2 mm 的砂砾和有机物。

1.3 土壤颗粒有机碳的分离和测定

土壤颗粒分级采用改进的 Anderson 等^[13]和武天云等^[20]的分组方法:称取已过 2 mm 筛的风干土

样 10 g 置于 250 mL 的烧杯中,并加蒸馏水 100 mL,于超声波发生器清洗槽中超声分散 30 min,然后将分散的悬浮液冲洗过 53 μm 筛,直至洗出液为清亮为止,筛上得到砂粒(53~2000 μm),然后根据 Stokes 定律分别计算出粗粉粒(5~53 μm)、细粉粒(2~5 μm)和粘粒(<2 μm)的离心时间^[21],用离心机对洗出液进行离心(离心力 4000 × g)。离心过程中粗粉粒为离心管底部沉淀,直接转移至铝盒;细粉粒和粘粒悬液采用 0.2 mol/L CaCl₂ 絮凝,再离心收集。各级颗粒转移至铝盒后,先在 60℃ 水浴锅上蒸干,然后置于 60℃ 烘箱内 12 h 烘干。烘干后各级颗粒碾磨过 0.25 mm 筛,用元素分析仪(利曼公司,EA3000)测定砂粒(S-SOC)、粗粉粒(CS-SOC)、细粉粒(FS-SOC)和粘粒(C-SOC)的有机碳含量。

1.4 计算方法

农田生态系统下外源有机碳输入主要来自作物根系、残茬、秸秆还田及有机肥,本研究中外源有机碳输入量的估算方法见 Jiang 等^[22]。其中,有机碳储量的计算采用公式(1)。

$$SOC_{stock} = SOC_{content} \times BD \times H \times 10 \quad (1)$$

式中, SOC_{stock} 和 SOC_{content} 分别代表土壤有机碳储量(t/hm²)和有机碳含量(g/kg),BD 表示土壤容重,单位 g/cm³,H 为土层深度,本研究为 0.2 m,10 为转化系数。

土壤总有机碳及各级颗粒有机碳的固持速率和固持效率采用公式(2)~(4)计算。

$$\Delta SOC_{stock} = SOC_{stock-t} - SOC_{stock-c} \quad (2)$$

$$SOC_{SR} = \frac{\Delta SOC_{stock}}{n} \quad (3)$$

$$SOC_{SE} = \frac{\Delta SOC_{stock}}{(C_{input-t} - C_{input-c})} \quad (4)$$

式中, SOC_{stock-t}、SOC_{stock-c} 和 ΔSOC 分别代表各处理下有机碳储量、对照有机碳储量和有机碳储量的增加量; C_{input-t} 和 C_{input-c} 分别代表处理和对照外源有机碳输入量; n 代表外源有机碳输入的年份; SOC_{SR} 和 SOC_{SE} 分别代表土壤固碳速率和固碳效率。

1.5 数据处理

试验结果采用 Excel 和 SPSS(11.5) 软件进行统计与分析,不同处理间采用邓肯法进行差异性检验(P<0.05)。采用简单线性关系(y = ax + b)来拟合土壤有机碳增加量与外源有机碳累积输入增加量之间的关系,并采用 t 检验来验证彼此之间斜率的差异性^[23]。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤有机碳的影响

2.1.1 长期施肥对土壤总有机碳含量和储量的影响

表 1 显示连续 20 年长期施肥后不同处理下土壤总有机碳含量和储量的变化情况。不同施肥处理间,土壤总有机碳含量和储量均表现为 M、NPKMR、NPKM、1.5NPKM > NPKS、NPK > CK。与 CK 相比,NPKS 处理的土壤总有机碳含量增加了 27.37%,1.5NPKM 处理增加了 103.85%。就土壤总有机碳储量而言,NPKMR 处理增加最多,为 21.84 t/hm²,其次为 M(21.03 t/hm²)和 1.5NPKM(20.34 t/hm²),而 NPK 和 NPKS 仅增加了 5.24 t/hm² 和 4.81 t/hm²。

2.1.2 长期施肥各级颗粒有机碳储量的变化 长期施肥条件下粘粒中有机碳储量最高,平均为 16.26 t/hm²,其次为砂粒(6.27 t/hm²),而粗粉粒(4.50 t/hm²)与细粉粒(3.55 t/hm²)最低,可见粘粒是有机碳赋存的主要矿物颗粒组成部分(表 1)。施有机肥的处理砂粒、粗粉粒、细粉粒和粘粒中有机碳储量比 CK 分别显著提高了 3.44~4.70 倍、1.06~1.25 倍、0.95~1.40 倍和 0.51~0.92 倍;NPKS 处理的砂粒和细粉粒有机碳储量显著增加,而 NPK 处理并没有显著提高砂粒的有机碳储量。与 NPK 相比,施用有机肥均能显著提高各级颗粒的有机碳储量,其中,粘粒增加最多,为 3.77 t/hm²~8.44 t/hm²,其次为砂粒,而粗粉粒和细粉粒最低;NPKS 处理的砂粒有机碳储量显著增加,而粗粉粒的有机碳储量却降低,但细粉粒和粘粒的有机碳储量并没有显著变化。

2.1.3 不同颗粒有机碳储量的分配比例 连续施肥 20 a 后不同颗粒有机碳储量的分配比例也存在显著差异(表 1)。整体而言,粘粒所占的比例最高,平均达到 54.32%,其次为砂粒(19.32%),而粗粉粒(14.68%)与细粉粒(11.68%)最低。对于粘粒而言,与 CK(64.08%)相比,施有机肥的处理其分配比例降低,为 9.15%~15.77%,而 NPK(57.93%)和 NPKS(54.81%)处理的分配比例并没有显著改变;对于砂粒,施有机肥和 NPKS 处理其所占的比例均显著高于 CK 和 NPK 处理,而后两者之间并没有显著差异;NPKS 处理的粗粉粒有机碳储量的分配比例最低为 12.24%,而 NPKM 处理的分配比例最高(16.19%);细粉粒有机碳储量所占

的分配比例在 10.06%~12.72% 之间,且不同处理之间并无显著差异。

2.2 长期施肥条件下不同颗粒有机碳含量与其质量的关系

砂粒质量百分数(砂粒质量/全土质量)及其与其它小颗粒质量比值的变化均能反映出砂粒质量的相对变化量。从图 1 可以看出,土壤砂粒所占的质量百分比与粗粉粒、细粉粒和粘粒组分中有机碳的浓度呈显著正相关关系,其斜率分别为 0.43、0.21 和 0.32,表明粗粉粒、细粉粒和粘粒中有机碳每增加 1 g/kg,砂粒质量百分比将会增加 0.43%、0.21% 和 0.32%;同时,砂粒与粗粉粒、细粉粒和粘粒质量比值也随着粗粉粒、细粉粒和粘粒中有机碳的增加而显著增加。总体而言,小颗粒(粗粉粒、细粉粒和粘粒)中有机碳的固持和富集能促进大颗粒(砂粒)的形成与稳定。

2.3 不同颗粒结合态有机碳固持速率的变化

土壤总有机碳和各级颗粒有机碳的固持速率随不同肥料的持续施用变化差异较大(表 2)。对于土壤总有机碳而言,NPKMR 处理的土壤固碳速率最快,为 1.09 t/(hm²·a),是 NPK 和 NPKS 处理的 4.19 倍和 4.54 倍,而后两者并没有显著差异。对于各级颗粒而言,砂粒和粘粒的平均固碳速率[0.27 t/(hm²·a)和 0.29 t/(hm²·a)]明显高于粗粉粒和细粉粒[0.11 t/(hm²·a)和 0.09 t/(hm²·a)];施用有机肥处理的土壤固碳速率显著高于 NPKS 和 NPK,而后两者并没有显著差异;施用有机肥处理的土壤砂粒、粗粉粒、细粉粒和粘粒的固碳速率是 NPKS 的 4.45 倍、3.66 倍、4.37 倍和 4.23 倍,而 NPKS 和 NPK 处理的各级颗粒平均固碳速率仅为 0.06 t/(hm²·a)和 0.07 t/(hm²·a)。

2.4 土壤有机碳增加量与外源碳输入量之间的关系

连续 20 年外源有机碳累积输入下的土壤总有机碳及各级颗粒有机碳储量的增加量均呈显著正线性相关关系($P < 0.05$),表明土壤总有机碳和各级颗粒中有机碳均没有出现饱和现象,其直线斜率表示不同施肥处理土壤的平均固碳效率(图 2)。土壤总有机碳的固持速率为 10.57%,即当外源有机碳的输入量增加 100 t/hm²,土壤总有机碳储量将会增加 10.57 t/hm²;而各级颗粒而言,粘粒的固碳效率(4.25%)显著高于砂粒(3.60%)、粗粉粒(1.73%)和细粉粒(1.00%)。

表 1 连续 20 年施肥条件下土壤有机碳储量及在不同颗粒中的分配比例

Table 1 Stocks of organic carbon and distribution in different soil particle under the 20 year fertilizer treatments

处理 Treatment	有机碳含量 SOC content (g/kg)	总有机碳储量 SOC stock (t/hm ²)	土壤颗粒有机碳储量(t/hm ²)				有机碳储量分配比例(%)			
			Stocks of organic carbon in particle-size fractions				Distribution of organic carbon stocks in the particle sizes			
			砂粒 Sand	粗粉粒 Coarse silt	细粉粒 Fine silt	粘粒 Clay	砂粒 Sand	粗粉粒 Coarse silt	细粉粒 Fine silt	粘粒 Clay
CK	7.27 ± 0.34 c	17.60 ± 0.81 d	1.72 ± 0.26 c	2.61 ± 0.22 c	1.99 ± 0.18 d	11.28 ± 0.64 d	9.75 ± 1.66 b	14.84 ± 1.20 a	11.32 ± 0.69 ab	64.08 ± 0.72 a
NPK	9.44 ± 0.60 b	22.84 ± 1.46 c	3.04 ± 0.39 c	3.66 ± 0.21 b	2.91 ± 0.12 c	13.23 ± 0.74 c	13.33 ± 2.48 b	16.02 ± 0.98 a	12.72 ± 1.04 a	57.93 ± 1.95 a
NPKS	9.26 ± 0.58 b	22.41 ± 1.40 c	4.68 ± 0.77 b	2.74 ± 0.33 c	2.70 ± 0.23 c	12.28 ± 0.41 cd	20.89 ± 3.43 a	12.24 ± 1.68 b	12.06 ± 1.58 a	54.81 ± 2.03 ab
NPKMR	13.70 ± 0.14 a	39.44 ± 0.41 a	7.63 ± 0.91 a	5.38 ± 0.77 a	4.77 ± 0.30 a	21.67 ± 1.08 a	19.34 ± 2.34 a	13.65 ± 2.30 ab	12.08 ± 0.99 a	54.93 ± 2.89 ab
NPKM	13.96 ± 0.40 a	35.19 ± 1.01 b	8.41 ± 0.80 a	5.70 ± 0.50 a	4.08 ± 0.21 b	17.00 ± 0.16 b	23.91 ± 3.65 a	16.19 ± 1.91 a	11.59 ± 0.94 a	48.31 ± 1.90 c
M	14.10 ± 0.70 a	38.63 ± 1.92 a	9.80 ± 0.27 a	5.56 ± 0.46 a	3.88 ± 0.14 b	19.39 ± 0.27 ab	25.36 ± 1.12 a	14.38 ± 0.52 ab	10.06 ± 0.93 ab	50.20 ± 1.69 b
1.5NPKM	14.82 ± 1.00 a	37.94 ± 2.56 a	8.59 ± 0.55 a	5.86 ± 0.30 a	4.52 ± 0.08 a	18.97 ± 0.89 b	22.64 ± 2.04 a	15.45 ± 0.27 a	11.92 ± 0.67 a	49.99 ± 2.62 b
平均值	11.79	30.58	6.27	4.50	3.55	16.26	19.32	14.68	11.68	54.32
Average										

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

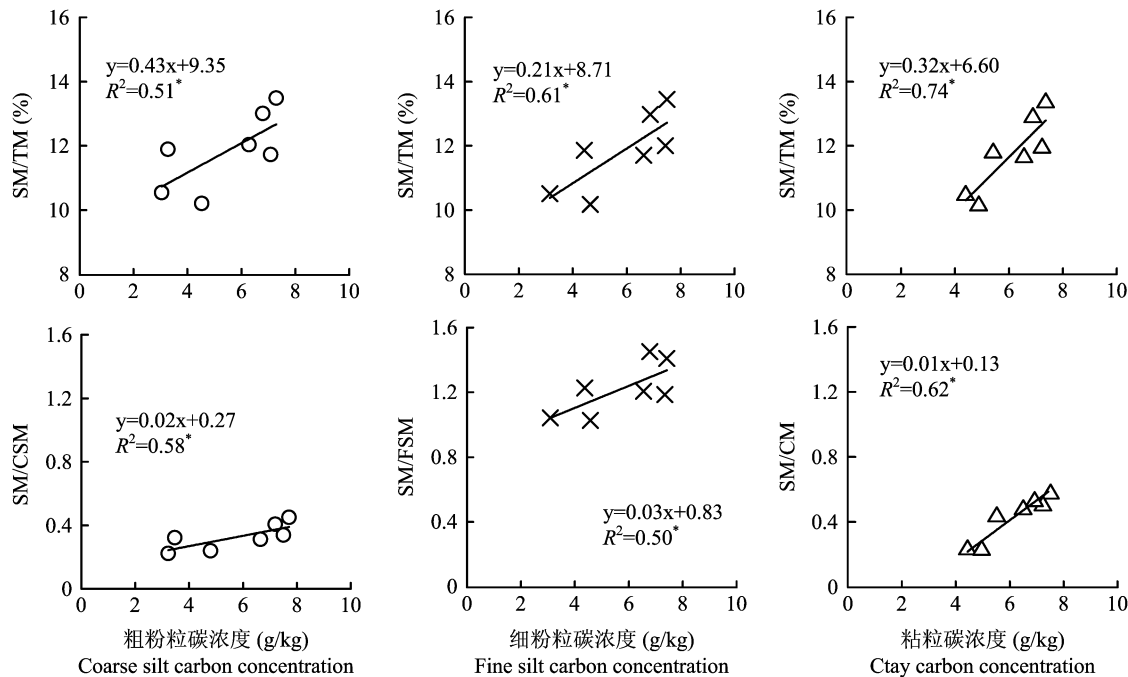


图1 长期施肥下不同颗粒有机碳浓度与砂粒质量百分数及其与粗粉粒、细粉粒和粘粒质量比值的关系

Fig.1 Relationships between organic carbon concentrations in different fractions and mass proportion of sand and mass ratio of sand to coarse silt, fine silt and clay under the long-term fertilization

[注(Note): TM—总质量 Total mass; SM—砂粒质量 Sand mass; CSM—粗粉粒质量 Coarse silt mass; FSM—细粉粒质量 Fine silt mass; CM—粘粒质量 Clay mass. *— $P<0.05$.]

表2 连续20年施肥条件下不同土壤颗粒的固碳速率

Table 2 Sequesterate rates of organic carbon in particle size fractions under the 20 year fertilizer treatments

处理 Treatment	碳输入量 Carbon input (t/hm ²)	总固碳速率 Sequestered rate [t/(hm ² ·a)]	各组分固碳速率[t/(hm ² ·a)] Organic carbon fractions sequestered rate			
			砂粒 Sand	粗粉粒 Coarse silt	细粉粒 Fine silt	粘粒 Clay
CK	6.82					
NPK	23.61	0.26±0.03 c	0.07±0.01 b	0.05±0.00 b	0.05±0.01 c	0.10±0.06 c
NPKS	37.39	0.24±0.09 c	0.15±0.09 b	0.01±0.00 b	0.04±0.00c	0.05±0.02 c
NPKMR	116.69	1.09±0.11 a	0.30±0.05 a	0.14±0.03 a	0.14±0.02 a	0.52±0.05 a
NPKM	136.15	0.88±0.06 b	0.33±0.07 a	0.15±0.03 a	0.10±0.01 b	0.29±0.01 b
M	169.53	1.05±0.13 b	0.40±0.07 a	0.15±0.01 a	0.09±0.00 b	0.41±0.04 a
1.5NPKM	190.87	1.02±0.11 a	0.34±0.05 a	0.16±0.03 a	0.13±0.01 a	0.38±0.04 a
平均 Average	97.29	0.76	0.27	0.11	0.09	0.29

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

3 讨论

土壤有机碳的动态变化取决于外源有机碳的输入量和本身的分解量。许多研究已表明长期施肥可以增加土壤中有机碳含量^[24-25]。本研究表明长期

不同施肥措施下土壤总有机碳含量均显著增加,且以有机肥效果最好。施用有机肥土壤总有机碳的固碳速率最快[0.88~1.09 t/(hm²·a)],与Purakayastha等^[26]报道的小麦-水稻-大豆轮作下配施农家肥土壤的固碳速率为1.0 t/(hm²·a)相近,

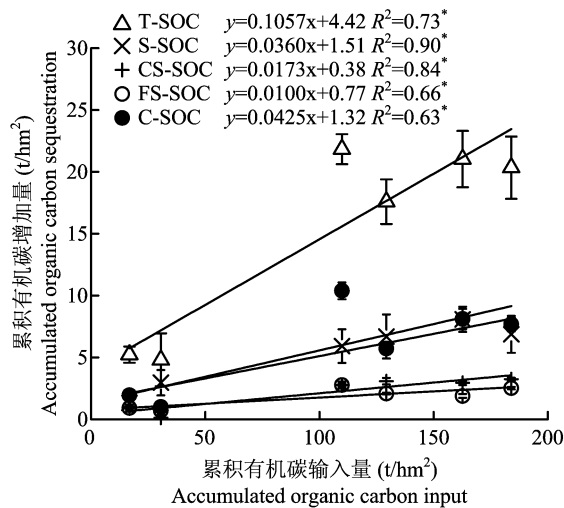


图2 长期施肥下累积有机碳输入量与不同颗粒有机碳的累积增加量的关系

Fig. 2 Relationship between accumulated organic carbon input and accumulated organic carbon sequestration in different fractions of organic carbon under the long-term fertilization

[注(Note): * — $P < 0.05$.]

却显著高于秸秆还田[$0.24 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]和单施化肥[$0.26 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]处理,其原因可能是相对于秸秆($23.61 \text{ t}/\text{hm}^2$)和单施化肥($37.39 \text{ t}/\text{hm}^2$)处理,施用有机肥($116.69 \sim 190.87 \text{ t}/\text{hm}^2$)更能直接地为土壤提供大量的有机碳源。

各级颗粒由于其表面化学性质不同,它们结合有机碳的储量及抗分解能力存在本质的区别,因而对施肥响应也存在显著差异^[14]。本研究表明,与不施肥相比,施用有机肥、秸秆还田(除粗粉粒)和单施化肥均能提高各级颗粒中有机碳的含量,且施用有机肥的效果更好,这与 Wu 等^[12]报道的结果相似,其原因可能是施用有机肥可以为土壤提供不同类型的碳源。而秸秆还田与单施化肥处理的有机碳增加量基本相当,可能是南方天气高温高湿,秸秆分解加快从而导致碳损失。各级颗粒有机碳储量中粘粒所占的比例最高(50.53%),是因为粘粒有机碳主要是半腐殖化和完全腐殖化的有机碳以及微生物代谢^[12,27],相对稳定极难分解^[13],而砂粒有机碳主要处于新鲜残体和腐殖化有机物之间的过渡有机碳^[28]易固持,所以当外源有机碳输入时该粘粒有机碳所占的比例有所下降而砂粒上升。施用有机肥处理的各级颗粒的固碳速率显著高于秸秆还田和单施化肥处理,这与 Sleutel 等^[29]和 Purakayastha 等^[26]的研究结果一致,其原因可能是肥料本身含有多种营养元素,可以促进作物根系和地上部的生长,使归还

农田土壤的根茬增多,同时促进了根系和微生物的活动,向土壤分泌更多的有机代谢物^[30];而施用有机肥不仅可向土壤直接输入有机碳,更重要的是有机肥本身是处于半分解状态的有机质,有利于土壤碳的固持。本研究还发现,土壤砂粒所占的质量百分比及其与粗粉粒、细粉粒和粘粒的比值均与粗粉粒、细粉粒和粘粒组分中有机碳的浓度呈显著正相关关系,这与 Yu 等^[31]研究的结果相似,其原因可能是有机碳有胶结作用,当小颗粒有机碳含量增加时,会把更多的小颗粒团聚在一起而形成较大的颗粒,表明小颗粒(粗粉粒、细粉粒和粘粒)中有机碳的固持和富集促进了大颗粒(砂粒)的形成与稳定。

本研究还发现,土壤总有机碳及各级颗粒有机碳储量的增加量与外源有机碳输入量的增加量呈显著正线性关系,这与 Majumder 等^[9]和 Zhang 等^[24]报道的结果一致,说明该土壤有机碳还没有出现饱和和迹象。该地区属于亚热带气候,与 de Moraes Sá 等^[32]报道的亚热带土壤固碳效率相似(14.2%),但是低于印度热带土壤固碳效率(25%)^[5],可见不同气候条件下土壤固碳效率存在显著差异^[24]。各级颗粒之间,土壤固碳效率最高的为粘粒(4.25%),这与 Tong 等^[18]报道的粘粉粒固碳效率最大的结果相似,其原因不仅与粘粒拥有较大的比表面积及较强的吸附能力,而且与其所占的比重较大、含量较高有关,所以有利于有机碳与粘粒的接触与固持,因此该颗粒的固碳效率要高于其它颗粒。

4 结论

长期施用有机肥是提升红壤旱地有机碳水平的最佳培肥措施。不同施肥处理下各级颗粒中粘粒有机碳储量明显高于其它颗粒。细颗粒中有机碳的富集会促进大粒径土壤颗粒的形成。施用有机肥处理的土壤各级颗粒固碳速率显著高于秸秆还田和单施化肥处理,而后两者没有显著差异。各级颗粒中有机碳没有达到饱和现象,而粘粒是土壤固碳效率的最重要的矿物颗粒组成部分。

参考文献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478 (7367): 49–56.
- [2] Ghosh S, Wilson B, Ghoshal S *et al.* Organic amendments influence soil quality and carbon sequestration in the Indo-Gangetic plains of India[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156: 134–141.
- [3] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-

- Hai Plain of China[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3): 708–715.
- [4] Yan X, Zhou H, Zhu Q H *et al.* Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 42–51.
- [5] Srinivasarao C, Venkateswarlu B, Lal R *et al.* Soil carbon sequestration and agronomic productivity of an Alfisol for a groundnut-based system in a semiarid environment in southern India[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 40–48.
- [6] Rasmussen P E, Collins H P. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions[J]. *Advances in Agronomy*, 1991, 45: 93–134.
- [7] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K, Chaudhury J. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat-jute agroecosystem under different fertilizer treatments[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1–2): 53–67.
- [8] Zhang W, Xu M, Wang X *et al.* Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 457–470.
- [9] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K *et al.* Organic amendments influence soil organic carbon pools and rice-wheat productivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 775–785.
- [10] Balabane M, Plante A F. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fraction techniques[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55: 415–427.
- [11] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [12] 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]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(1): 100–107.
- [13] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R, Stewart J W B. 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 Science Society of America Journal*, 1981, 45(4): 767–772.
- [14] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 12(2): 81–88.
- [15] 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 and Soil*, 2005, 268(1): 319–328.
- [16] Aoyama M, Angers D A, N'dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(2): 295–302.
- [17] Xu M, Lou Y, Sun X *et al.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 745–752.
- [18] Tong X, Xu M, Wang X *et al.* Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251–259.
- [19] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
- Xu M G, Liang G Q, Zhang F D *et al.* Evolution of soil fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006.
- [20] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 477–481.
- Wu T Y, Schoenau J J, Li F M *et al.* Soil particle size fractionation with centrifugation method[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 477–481.
- [21] 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, 2000.
- Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] Jiang G, Xu M, He X *et al.* Soil organic carbon sequestration in upland soils of northern China under variable fertilizer management and climate change scenarios[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(3): 319–333.
- [23] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- Gai J Y. Experiment and statistical methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [24] 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.
- [25] Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S *et al.* Long term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1): 1–16.
- [26] Purakayastha T J, Rudrappa L, Singh D *et al.* Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system[J]. *Geoderma*, 2008, 144(1): 370–378.
- [27] McGill W B, Paul E A. Fractionation of soil and ^{15}N nitrogen to separate the organic and clay interactions of immobilized N[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1976, 56(3): 203–212.
- [28] 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 and Tillage Research*, 2001, 57(4): 225–235.
- [29] Sleutel S, De Neve S, Németh T *et al.* Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(3): 280–288.
- [30] Lal R, Follett R F, Stewart B A, Kimble J K. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security[J]. *Soil Science*, 2007, 172(12): 943–956.
- [31] Yu H, Ding W, Luo J *et al.* Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 170–177.
- [32] de Moraes Sá J C, Séguy L, Tivet F *et al.* Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil[J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 26: 531–543.