植物营养与肥料学报 2015,21(1): 104 - 111
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0111

长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响

王朔林[1], 王改兰[1*], 赵 旭[1], 陈春玉[1], 黄学芳[2]
(1 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 2 山西农业科学院旱地农业研究中心, 山西太原 030031)

摘要:【目的】作为土壤质量的重要指标, 土壤有机碳及其组分在耕地生产力和作物产量方面发挥着重要作用。本文以 25 年长期定位施肥试验为依托,分析了不同施肥处理对栗褐土有机碳含量及其组分的影响,为调控农田土壤肥力及栗褐土有机碳库的管理提供科学依据。**【方法】**田间试验开始于 1988 年,设置 8 个施肥处理为不施肥(CK);单施氮肥(N);氮磷肥合施(NP);单施低量有机肥(M_1);低量有机肥与氮肥合施(M_1N);低量有机肥与氮磷肥合施(M_1NP);高量有机肥与氮肥合施(M_2N);高量有机肥与氮磷肥合施(M_2NP)。于第 25 年玉米播种前,采集以上处理的耕层(0—20 cm)土壤样品。借助有机碳物理分组方法和化学分析方法,测定了土壤总有机碳和有机碳各组分的含量。**【结果】**长期施用不同肥料不同程度地提高了栗褐土总有机碳、游离态颗粒有机碳以及闭蓄态颗粒有机碳含量,其中有机肥与化肥配施尤其是高量有机肥与化肥配施的作用更加明显。与不施肥相比,高量有机肥与无机肥配施(M_2N、M_2NP)总有机碳含量增加了 121.1%、166.8%,游离态颗粒有机碳增加了 239.2%、359.2%,闭蓄态颗粒有机碳增加了 288.4%、289.9%。单施氮肥(N)及有机肥与氮磷肥配施(M_1NP、M_2NP)可显著提高矿物结合态有机碳含量,增幅分别为 27.8%、34.8%、33.3%。不施肥条件下,栗褐土有机碳中颗粒有机碳与矿物结合态有机碳所占的比例相当,长期施肥提高了颗粒有机碳特别是闭蓄态颗粒有机碳的比例,降低矿物结合态有机碳所占的比例,闭蓄态颗粒有机碳成为栗褐土有机碳的主要贮存库。相关分析表明,长期施肥条件下栗褐土游离态、闭蓄态颗粒有机碳含量之间及其与总有机碳含量之间均呈极显著正相关,矿物结合态有机碳含量与总有机碳及其他组分的有机碳之间均无明显相关。**【结论】**化肥、有机肥以及有机肥与化肥配施能够提高栗褐土游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳以及总有机碳含量。高量有机肥与化肥配施更有助于栗褐土游离态、闭蓄态颗粒有机碳的积累,有利于土壤养分有效性的提高和有机碳品质的改善。氮肥单施、有机肥与氮磷肥配施则是提高矿物结合态有机碳含量的有效措施。

关键词: 长期施肥; 栗褐土; 有机碳组分; 相关分析
中图分类号: S153.6+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0104-08

Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil

WANG Shuo-lin[1], WANG Gai-lan[1*], ZHAO Xu[1], CHEN Chun-yu[1], HUANG Xue-fang[2]
(*1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;*
2 Institute of Dryland Farming, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract:【Objectives】 As an essential indicator of soil quality, soil organic carbon and its fractions play an important role in land productive capacity and crop yield. Based on a 25-year long-term fertilization experiment, effects of different fertilizing treatments on the contents of total organic carbon and its fractions in cinnamon soil were analyzed to provide scientific basis for controls of soil fertility and organic carbon management. **【Methods】** Since 1988, a field experiment was conducted with eight different fertilizing treatments, no fertilizer (CK), chemical N, chemical NP, low amount organic manure, low amount organic manure plus chemical N, low amount organic manure plus chemical NP, high amount organic manure plus chemical N and high amount organic manure plus chemical NP. At the 25th year, soil samples at 0-20 cm depth of different fertilizing treatments were collected

收稿日期: 2014-03-28 **接受日期:** 2014-06-25
基金项目: 国家国际科技合作专项(2011DFR31230)资助。
作者简介: 王朔林(1989—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: wangshuolin3109@126.com
* 通信作者 E-mail: gailanwang@hotmail.com

before the sowing of maize. Contents of soil total organic carbon and its fractions were determined by physical partial size fractionation method and chemical analysis. 【**Results**】 The results show that compared with no fertilizer application, the long-term different fertilizer application can increase the contents of total organic carbon, FPOM-C and OPOM-C in cinnamon soil, and the effect of manure combined with chemical fertilizer application, especially higher amount of manure with chemical fertilizer application is more significant. After the long-term application of M_2N and M_2NP, the contents of total organic carbon are increased by 121.1% and 166.8%, FPOM-C contents are increased by 239.2% and 359.2%, and OPOM-C contents are increased 288.4% and 289.9%. Compared with no fertilizer treatments, the treatments of N, M_1NP and M_2NP could be more suitable for the accumulation of MOM-C, which are 27.8%, 34.8%, 33.3% higher than that of no fertilizer treatment, respectively. The distribution proportions of POM-C and MOM-C in cinnamon soil are similar to those of the no fertilization. While under the long-term fertilizer application, the distribution proportions of POM-C in SOC are significantly increased, however, the proportion of MOM-C is significantly reduced. The percentage of OPOM-C in SOC has the maximum increase; as a consequence, OPOM-C is the main organic carbon pool in cinnamon soil. The correlation analysis indicates that under the long-term fertilization condition, the contents of FPOM-C and OPOM-C are highly and significantly related to each other, and they also have a strong correlation with total organic carbon content. However, MOM-C is not significantly correlated with total organic carbon and other fractions. 【**Conclusions**】 Chemical fertilizer, manure, and manure with chemical fertilizer application increase the contents of FPOM-C and OPOM-C and TOC in cinnamon soil. Higher amount of manure with chemical fertilizer application is the most effective measure to promote FPOM-C and OPOM-C, which is beneficial to nutrient availability and the quality of organic carbon. The chemical N alone and manure with chemical N, P application are better ways to increase MOM-C.

Key words: long-term fertilization; cinnamon soil; soil organic carbon fraction; correlation analysis

土壤有机碳是地球陆地生态系统中最大、最活跃的碳库,据估算全球土壤固定的有机碳约为1500Pg,超过了植被与大气有机碳储量之和[1]。由于土壤有机碳储量巨大,其较小幅度的变化就可能对大气 CO_2 浓度水平产生深远影响[2]。土壤有机碳同时也是土壤肥力的基础,与土壤结构、持水性、缓冲性和作物养分的有效性高度相关,直接影响着耕地的生产力和作物的产量[3]。但由于土壤总有机碳含量是容量指标,只能反映出有机碳矿化分解和合成的最终结果,不足以全面地反映土壤质量的内在变化[4]。因此,人们将土壤有机碳的研究与其分组技术相联系,提出了多种有机碳分组方法,其中物理分组由于破坏性较小,且可以呈现原状有机碳的结构和功能而成为当前研究土壤有机碳分组的主流[5]。物理分组方法将土壤有机碳分为易分解组分和稳定性组分,其中,易分解组分可以作为反映农业管理措施引起的土壤质量改变的敏感性指标,而稳定性组分则对有机碳固存具有重要意义[6]。

施肥条件下土壤有机碳含量及组分的变化,国内学者在黑土[7-8]、灰漠土[9]、棕壤[10]以及红壤[11]等土壤上已有较深入的研究。结果表明,施肥是影响土壤有机碳转化和积累的重要因素之一[12-15]。但由于受气候、土壤母质和耕作等诸多因素的影响,相同施肥措施对土壤有机碳及其组分的影响在不同区域、不同土壤类型上存在差异[16-17]。如,王玲莉等[10]系统地分析了不同施肥措施对棕壤有机碳及其组分的影响,表明施用化肥会导致颗粒有机碳含量下降,但可以稳定矿物结合态有机碳含量,最终提高了土壤总有机碳含量,而施用有机肥或有机肥与化肥配施则能够提高土壤颗粒有机碳、矿物结合态有机碳及总有机碳的含量。王雪芬等[11]对旱地红壤有机碳含量及其组分进行了研究,认为施有机肥可以显著提高颗粒有机碳组分,但对矿物结合态有机碳影响不显著,而施化肥对有机碳各组分影响均不明显。目前,相关的研究在黄土丘陵区的栗褐土上鲜见报道,为此,本研究以25年的长期定位施肥试验为依托,探讨长期施用不同肥料对栗褐土有机碳总量及其组分的影响,为栗褐土有机碳库的管理提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　供试土壤

试验于1988年布置在山西省河曲县砖窑沟流域的沙坪村窑家嘴梁顶平地上,供试土壤按山西省

第二次土壤普查分类为轻壤黄土质淡栗褐土(土种),以中国土壤系统分类为黄土正常新成土(土类),1988年作物播种前测得的试验地0—20 cm土壤基本理化性状:有机碳含量3.27 g/kg、全氮0.455 g/kg、全磷1.23 g/kg、碱解氮14.0 g/kg、速效磷2.85 mg/kg、速效钾87.0 mg/kg、pH 8.06、$CaCO_3$含量为13.55%。

1.2 试验设计

试验设8个处理:不施肥(CK);单施氮肥(N);氮磷肥合施(NP);单施低量有机肥(M_1);低量有机肥与氮肥合施(M_1N);低量有机肥与氮磷肥合施(M_1NP);高量有机肥与氮肥合施(M_2N);高量有机肥与氮磷肥合施(M_2NP)。各处理施肥量见表1。试验设3次重复,随机区组排列,小区面积4 m×6 m,每年试验小区的处理不变。氮肥用含N 460 g/kg的尿素,磷肥用含P_2O_5 140 g/kg的过磷酸钙,有机肥使用当地圈肥,氮含量3.64 g/kg,P_2O_5含量为2.46 g/kg(多年平均值)。种植作物从1988年到2008年一直为糜子和马铃薯两种作物每年换茬轮作,从2009年至今一直种植玉米。所有肥料全部作基肥,在作物播种前撒施,并耕翻入土。耕作管理措施与大田相同。

表1 各处理的施肥量(kg/hm²)

Table 1 Fertilization amounts of each treatment

处理 Treatment	有机肥 Organic Fertilizer	氮肥(N) Nitrogenous Fertilizer	磷肥(P_2O_5) Phosphate Fertilizer
CK	0	0	0
N	0	120	0
NP	0	120	75
M_1	22500	0	0
M_1N	22500	120	0
M_1NP	22500	120	75
M_2N	45000	120	0
M_2NP	45000	120	75

1.3 土壤样品的采集

试验于2013年作物播种前采集耕层(0—20 cm)土壤样品,风干后过筛。

1.4 测定方法

土壤有机碳含量:H_2SO_4—$K_2Cr_2O_7$外加热法[18]。

土壤有机碳分组采用Six等[19-20]的物理分组方法,将土壤有机碳分为颗粒态有机碳(POM-C)和矿物结合态有机碳(MOM-C),其中颗粒态有机碳又细分为游离态颗粒有机碳(FPOM-C)和闭蓄态颗粒有机碳(OPOM-C)。

土壤游离态颗粒有机碳(FPOM-C):浮选法分离,称取20.00 g过2 mm筛的风干土壤样品,放入装有100 mL密度为1.8 g/cm³ NaI溶液的离心管中,用手摇动,悬浮物离心(3500 r/min)15 min。平衡后,将管中的上清液抽吸到0.45μm的滤膜上,用蒸馏水洗掉碘化钠,然后转入已称重的蒸发皿中,80℃烘干后即得轻组有机碳,用(1∶3)H_2SO_4-0.2 mol/L $K_2Cr_2O_7$外加热法测定[11-12, 21]。

土壤闭蓄态颗粒有机碳(OPOM-C)和土壤矿物结合态有机碳(MOM-C):离心管中剩余的部分用超声波进一步打碎分散土壤团聚体,悬浊液通过孔径为53μm的尼龙筛,用蒸馏水冲洗筛子至无浑浊液为止。留在筛子上的样品即为OPOM-C组分,通过筛子的为MOM-C组分,分别转移到已称重的蒸发皿中,在80℃下烘干,采用H_2SO_4—$K_2Cr_2O_7$外加热法测定[11,21]。

数据处理采用Microsoft Excel 2003和DPS 7.05软件。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤总有机碳(TOC)含量的影响

经过连续25年的不同施肥处理后,栗褐土总有机碳含量产生了明显差异(图1)。与不施肥(CK)相比,施肥处理显著或极显著提高了栗褐土总有机碳含量,其中,高量有机肥与化肥配施(M_2N、M_2NP)的效果最为明显,总有机碳含量较对照分别增加了121.1%、166.8%,其次是低量有机肥与化肥配施(M_1N、M_1NP),总有机碳含量分别提高了78.8%、104%。单施化肥(N、NP)与单施有机肥(M_1)的处理土壤总有机碳含量相近,分别为4.56、4.61和4.68 g/kg,较CK分别提高了55.8%、57.8%、60.3%。

与试验初始(1988年)的土壤总有机碳含量3.27 g/kg相比,不同施肥处理也有明显提高,提高幅度为39.5%～138.2%,而不施肥处理的土壤总有机碳含量则下降了10.6%。

以上结果表明,长期施用化肥、有机肥均可有效提高栗褐土总有机碳的含量,化肥与有机肥配合

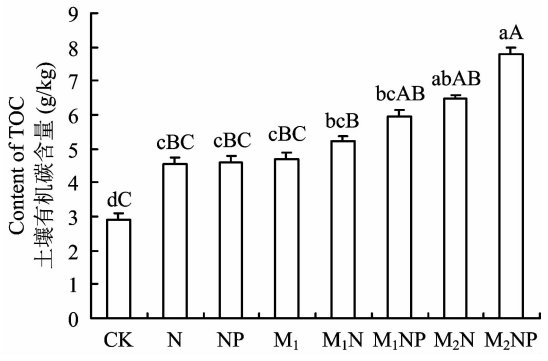

图 1　不同处理土壤总有机碳含量

Fig. 1　Contents of TOC under different treatments

[注(Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平,柱上不同大写字母表示处理间差异达到 1% 显著水平 Lowercase letters above the bars mean significant at the 5% level and capital letters above the bars at the 1% level among treatments.]

施用的效果更佳,而且土壤有机碳含量随有机肥投入量的增加而增加。长期不施肥栗褐土总有机碳含量有降低的趋势。

2.2　不同处理土壤有机碳组分含量

2.2.1 土壤颗粒态有机碳含量

2.2.1.1 土壤游离态颗粒有机碳含量　表 2 表明,施肥处理的土壤游离态颗粒有机碳含量较对照有不同程度的增加,其中,单施氮肥处理土壤游离态颗粒有机碳含量较低,与对照相比仅增加 9%。NP 与 M_1 处理游离态有机碳含量相近,分别较对照增加 96.4% 和 88.2%。有机肥与化肥配施土壤游离态颗粒有机碳含量较高,M_1N、M_1NP、M_2N、M_2NP 依次较对照增加了 153.4%、191.0%、239.2% 和 359.2%。可见,长期施化肥、有机肥可以提高栗褐土游离态颗粒有机碳含量。有机肥与化肥配施肥效较明显,而单施氮肥处理影响较小。

2.2.1.2 土壤闭蓄态颗粒有机碳含量　长期不同施肥处理对栗褐土闭蓄态颗粒有机碳含量具有显著影响(表 2)。与对照相比,单施化肥(N、NP)与施低量有机肥(M_1、M_1N、M_1NP)处理土壤闭蓄态颗粒有机碳含量分别提高了 113.3%、146.7%、161.9%、158.7%、174.0%,但这 5 个施肥处理间差异未达显著水平。高量有机肥(M_2N、M_2NP)处理的土壤闭蓄态颗粒有机碳含量较高,分别达到 4.086 和 4.102 g/kg,为对照的 3.88 和 3.90 倍,且与其他施肥处理间差异达到显著水平。以上结果表明,长期施化肥、有机肥均能够明显提高栗褐土闭蓄态颗粒有机碳的积累,且以高量有机肥与化肥配施效果更佳。

表 2　不同处理土壤游离态、闭蓄态颗粒及矿物结合态有机碳含量(g/kg)

Table 2　Contents of FPOM-C, OPOM-C and MOM-C under different fertilization treatments

处理 Treatment	游离态颗粒有机碳 FPOM-C	闭蓄态颗粒有机碳 OPOM-C	颗粒有机碳 POM-C	矿物结合态有机碳 MOM-C
CK	0.365 d	1.052 c	1.417 d	1.486 c
N	0.398 d	2.242 b	2.640 c	1.899 ab
NP	0.717 cd	2.595 b	3.312 bc	1.303 cd
M_1	0.687 cd	2.755 b	3.442 bc	1.201 cd
M_1N	0.925 bc	2.721 b	3.646 bc	1.575 bc
M_1NP	1.062 bc	2.882 b	3.944 a	2.003 a
M_2N	1.238 ab	4.086 a	5.324 a	1.078 d
M_2NP	1.676 a	4.102 a	5.778 a	1.981 a

注(Note): 数值后不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters mean significant at the 5% level.

2.2.1.3 土壤总颗粒有机碳含量　土壤总颗粒有机碳含量为游离态颗粒有机碳与闭蓄态颗粒有机碳含量之和。表 2 表明,虽然单施氮肥的土壤游离态颗粒有机碳含量与对照间差异不显著,但由于其闭蓄态颗粒有机碳含量增加幅度较大,使土壤总颗粒有机碳显著增加,为对照的 1.86 倍。NP、M_1、M_1N 处理的颗粒有机碳含量相似,在 3.312 ～ 3.646 g/kg 之间,较对照提高了 133.7% ～ 157.3%。处理 M_1NP、M_2N、M_2NP 土壤颗粒有机碳含量较高,较对照提高了 178.3%、275.7%、307.7%,不仅显著高

于对照,与其他施肥处理之间的差异也达到了显著水平。将施磷肥与不施磷肥处理(M_2N 和 M_2NP、M_1N 和 M_1NP、N 和 NP)的总颗粒有机碳含量进行对比,可以看出,施磷肥土壤颗粒有机碳含量较无磷肥的处理有增加趋势。上述结果表明,长期施用氮肥、有机肥及有机肥与氮肥配施均可以提高栗褐土总颗粒有机碳含量,磷肥有一定的促进作用。

2.2.2 土壤矿物结合态有机碳含量 不同处理土壤矿物结合态有机碳含量如表2所示。长期施用不同肥料对土壤矿物结合态有机碳含量的影响较小,与对照相比有增有减。单施氮肥及有机肥与氮磷肥配施处理(M_1NP、M_2NP)的矿物结合态有机碳含量较对照显著提高,增幅分别为27.8%、34.8%和33.3%。处理 NP、M_1、M_1N 的土壤矿物结合态有机碳含量与对照间无显著差异,而 M_2N 处理的矿物结合态有机碳含量显著低于对照,降低幅度为27.5%。结果表明,长期单施氮肥、有机肥和氮磷肥配施有利于栗褐土矿物结合态有机碳的积累,而高量有机肥与氮肥配施栗褐土矿物结合态有机碳的含量降低。

2.3 不同施肥条件下栗褐土各组分有机碳分配比例

土壤游离态、闭蓄态颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的分配比例是指其有机碳含量占土壤总有机碳含量的比率,与有机碳组分的绝对含量相比,它可以消除总有机碳含量差异对有机碳组分的影响,更能体现土壤碳库状况[22]。由表3可以看出,对照处理的颗粒有机碳含量和土壤矿物结合态有机碳占土壤总有机碳含量的比例相当,在颗粒有机碳中,以闭蓄态颗粒有机碳为主,游离态颗粒有机碳较低。经长期不同施肥后,栗褐土有机碳分配比例发生了明显变化。

与对照相比,施肥处理的矿物结合态有机碳所占比例呈下降趋势,以高量有机肥处理的降幅较大,由对照的50.8%分别降低至25.4%和16.7%,处理 NP、M_1、M_1N、M_1NP 的降低幅度较小,分别降至28.3%、25.6%、30.1%和33.6%,N 处理的下降幅度最小,由50.8%降低到41.7%。对游离态颗粒有机碳分配比例而言,除 N 处理分配比例低于对照外,其他施肥处理较对照均有所增加,从对照的12.5%分别上升至14.7%～21.5%。长期施肥使栗褐土闭蓄态颗粒有机碳占土壤总有机碳的比值明显增加,由36%增加至48.3%～63.2%,超过了矿物结合态所占比例。由于长期施肥条件下闭蓄态颗粒有机碳分配比例较对照增加明显,致使总颗粒有机碳分配比例也随之升高。在不同施肥处理中,总颗粒有机碳分配比例的顺序是 N < (M_1N、M_1NP) < (NP、M_1) < (M_2N、M_2NP)。

以上结果表明,长期施肥有利于提高颗粒态有机碳(尤其是闭蓄态颗粒有机碳)占总有机碳的比例,但会降低矿物结合态有机碳的分配比例,且不同施肥处理中,以高量有机肥与化肥配施处理效果最明显,其次是氮磷肥配施和单施有机肥处理,低量有机肥与化肥配施处理的影响相对较小。

表3 不同处理土壤游离态、闭蓄态颗粒及矿物结合态有机碳占总有机碳的比例(%)

Table 3 Proportions of FPOM-C, OPOM-C and MOM-C in SOC under different fertilization treatments

处理 Treatment	游离态 FPOM-C	闭蓄态 OPOM-C	颗粒有机碳 POM-C	矿物结合态 MOM-C
CK	12.5	36.0	48.5	50.8
N	8.7	49.2	57.9	41.7
NP	15.4	56.2	71.6	28.3
M_1	14.7	58.8	73.5	25.6
M_1N	17.7	52.0	69.7	30.1
M_1NP	17.8	48.3	66.1	33.6
M_2N	19.2	63.2	82.4	16.7
M_2NP	21.5	52.6	74.1	25.4

2.4 各形态有机碳之间的相关性分析

表4表明,土壤总有机碳含量与游离态、闭蓄态颗粒有机碳含量之间呈正相关,相关性达极显著

表4 栗褐土各形态有机碳之间的相关关系

Table 4 Correlations among different fractions of soil organic carbon

有机碳形态 Carbon fraction	TOC	FPOM-C	OPOM-C	MOM-C
TOC	1			
FPOM-C	0.958**	1		
OPOM-C	0.9446**	0.8966**	1	
MOM-C	0.2959	0.205	−0.0116	1

注(Note):$r_{0.05}=0.7067$, $r_{0.01}=0.8343$, * 表示5%水平差异显著性 Significant at the 5% level; ** 表示1%水平差异显著 Significant at the 1% level.

水平,但与矿物结合态有机碳间的相关性不显著。游离态颗粒有机碳与闭蓄态颗粒有机碳含量之间极显著相关。可见,栗褐土游离态、闭蓄态颗粒有机碳含量很大程度上依赖于总有机碳含量,同时也说明不同形态颗粒有机碳之间关系密切。而矿物结合态有机碳含量受总有机碳含量的影响较小。

3　讨论

3.1　土壤总有机碳含量

农田土壤总有机碳数量主要取决于有机碳的输入和降解之间的平衡[2]。在本试验中,不施肥处理土壤有机碳含量较试验前已经有明显下降趋势,主要是由于黄土高原处干旱地区,蒸发强度大,土壤有机碳矿化剧烈,且栗褐土的粘粒含量低,土壤矿物对有机碳的物理性保护较弱,长期不施肥根茬归还量已不足以维持土壤有机碳的矿化损失。

单施化肥对土壤总有机碳含量的作用: 提高,降低,也可能保持不变[23-25]。本研究通过 25 年的长期定位试验表明,长期单施化肥可有效提高栗褐土总有机碳含量,且其效果接近于低量有机肥处理。施用化肥可以提高土壤总有机碳含量的原因主要在于化肥可以促进作物的生长,提高作物生物量,增加作物根茬及根系分泌物归还量,进而提高土壤总有机碳含量[26]。本试验结果还表明,有机肥与化肥配施是提高土壤有机碳含量的最佳施肥手段,这与张敬业等[14]的研究结果相同。因为有机肥与化肥配施,一方面增加了作物产量,使作物残留物量增加,另一方面施用有机肥直接提供了有机物。

3.2　土壤各有机碳组分

土壤颗粒有机碳是动植物残体向土壤腐殖质转化的中间产物[27],比全碳更易受土壤管理的影响,提高这部分有机碳含量被认为是抑制土壤有机碳分解、缓解大气 CO_2 浓度上升的重要途径[28]。王玲莉等[11]和刘骅等[9]研究表明长期单施化肥对土壤颗粒有机碳具有负效应,其原因是单施化肥促进了土壤微生物活动,破坏了团聚体结构,使颗粒有机碳分解速度加快。但本研究结果与之不同,长期施化肥土壤游离态、闭蓄态,以及总颗粒有机碳均有所增加。究其原因,可能是土壤颗粒有机碳是相对较新的有机碳,其含量变化应归结于作物归还量。本试验中长期施化肥改善了土壤速效养分状况,提高了作物产量包括生物产量[26],增加了根茬及残落物的归还量,故土壤颗粒有机碳含量有所提高。本试验结果还显示,化肥和有机肥配施可以显著提高游离态、闭蓄态颗粒有机碳的含量,且效果好于单施化肥,这与张敬业等[14]和梁尧等[2]的研究结果一致,其原因在于有机无机肥配施不仅可以提高作物产量、增加颗粒有机碳的直接输入量,同时有机肥的胶结作用可以促进团聚体的形成[29],颗粒有机碳,尤其是闭蓄态颗粒有机碳被团聚体包裹其中,有机碳受到物理保护,避免微生物的接触、降解。

矿物结合态有机碳是有机物分解的最终产物与土壤粘粒和粉粒相结合的部分,稳定性较强[17,30]。佟小刚等[31]和樊廷录等[32]报道长期施有机肥条件下红壤、黑垆土矿物结合态有机碳含量有所增加,原因在于施有机肥为微生物提供了营养,微生物代谢分泌物增多,这些分泌物可以直接转移至细粘粒,导致土壤矿物结合态有机碳积累。但在本研究中,高量有机肥与氮肥配施处理土壤矿物结合态有机碳含量有所下降,究其原因可能是此施肥处理土壤真菌数量相对较高[33],土壤粘粒在真菌丝作用下可以形成团聚体颗粒[22,29],有机碳由矿物结合态向颗粒态转移,且微生物代谢分泌物所增加的矿物结合有机碳含量小于矿物结合态有机碳向颗粒有机碳转移的含量,最终使矿物结合态有机碳净含量减少。

长期施肥后,栗褐土 MOM-C/TOC 比例下降,而 POM-C/TOC 比例上升,使颗粒有机碳,尤其是闭蓄态有机碳成为土壤有机碳的主要存在形式,这与袁颖红等[28]研究的结果一致。说明长期施肥主要提高了栗褐土易分解、活跃的有机碳,是养分有效性提高和有机碳品质改善的体现[34]。

4　结论

1)化肥、有机肥以及有机肥与化肥配施提高了栗褐土游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳以及总有机碳含量,其中有机肥与化肥配施尤其是高量有机肥与化肥配施效果更加明显。氮肥单施、有机肥与氮磷肥配施显著提高了土壤矿物结合态有机碳含量,但高量有机肥与氮肥配施矿物结合态有机碳含量呈下降趋势。

2)长期施肥改变了栗褐土各组分有机碳的分配比例,提高了颗粒有机碳特别是闭蓄态颗粒有机碳的分配比例,降低了矿物结合态有机碳分配比例,使闭蓄态颗粒有机碳成为栗褐土有机碳的主要存在形式,且以高量有机肥与化肥配施效果更为明显。

3)栗褐土游离态、闭蓄态颗粒有机碳含量与总有机碳之间关系密切,很大程度上依赖于有机碳总储量。同时,游离态颗粒有机碳与闭蓄态颗粒有机

碳之间也相互影响,两者显著相关。矿物结合态有机碳含量与土壤总有机碳和各形态颗粒有机碳含量间相关不显著。

参考文献:

[1] 刘中良,方万太,周桦,马强. 不同有机厩肥输入量对团聚体有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1149-1157.
Liu Z L, Fang W T, Zhou H, Ma Q. Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1149-1157.

[2] 梁尧,韩晓增,宋春,李海波. 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.
Liang R, Han X Z, Song C, Li H B. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in Northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3565-3574.

[3] 赵鑫,方万太,李建东,姜子绍. 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.
Zhao X, Fang W T, Li J D, Jiang Z S. Research advances in soil organic carbon and its fractions under different management patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2203-2209.

[4] 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.
Zhang L, Zhang W J, Xu M G *et al*. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1646-1655.

[5] 张国,曹志平,胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1921-1930.
Zhang G, Cao Z P, Hu C J. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farm land ecosystem research: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1921-1930.

[6] 佟小刚,黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009,5(4): 831-836.
Tong X G, Huang S M, Xu M G *et al*. Effects of the different long-term fertilizations on fractions of organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009,5(4): 831-836.

[7] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 153-158.
Liang A Z, Zhang X P, Yang X M *et al*. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral - incorporated organic carbon in black soils of northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 153-158.

[8] 张迪,韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2715-2723.
Zhang D, Han X Z. Changes of black soil labile organic carbon pool under different vegetation and fertilization managements[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2715-2723.

[9] 刘骅,佟小刚,马兴旺,等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 84-90.
Liu Y, Tong X G, Ma X W *et al*. Content and evolution characteristics of mineral organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 84-90.

[10] 王玲莉,韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008,14(1): 79-83.
Wang L L, Han X R, Yang J F *et al*. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions in a brown soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science. 2008, 14(1): 79-83.

[11] 王雪芬,胡锋,彭新华,等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及周转速率的影响[J]. 土壤学报,2012, 49(5): 954-961.
Wang X F, Hu F, Peng X H *et al*. Effects of long-term fertilization on organic carbon pools and their turnovers in a red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 954-961.

[12] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H *et al*. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93: 264-280.

[13] 徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒径复合体中C、N、P含量与分配的影响[J]. 中国农业科学,2000, 33(5): 1-7.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(5): 1-7.

[14] 张敬业,张文菊,徐明岗,等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2012,18(4): 868-875.
Zhang J Y, Zhang W J, Xu M G *et al*. Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18 (4): 868-875.

[15] Dou F G, Wright A L, Hons F M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72: 1445-1453.

[16] Govi M, Francioso O, Ciavatta C, Sequi P. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A study by electrofocusing[J]. Soil Science, 1992, 154(1): 8-13.

[17] Jenkinson D S, Fox R H, Rayner J H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called 'priming' effect[J]. Journal of Soil Science, 1985, 36: 425-444.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社,2008.

30-34.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008. 30-34.

[19] Six J, Elliot ET, Paustian K *et al*. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367-1377.

[20] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O *et al*. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAX NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32: 285-309.

[21] Wander M M, Yang X M. Influence of tillage on the dynamics of loose-and-occluded-particulate and humified organic matter fractions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(8/9): 1151-1160.

[22] 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.
Xu J B, Li C L, He Y Q *et al*. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 675-682.

[23] 韩晓日,苏俊峰,谢芳,等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 730-733.
Han X R, Su J F, Xie F *et al*. Effect of long-term fertilization on organic carbon and the different soil organic fractions of brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 730-733.

[24] 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[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 875-878.
Yin Y F, Cai Z C, Qin S W, Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (5): 875-878.

[25] 王旭东,张一平,吕家珑,等. 不同施肥条件对土壤有机质胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 75-81.
Wang X D, Zhang Y P, Lü J L *et al*. Effect of long term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 75-81.

[26] 段建南,李旭霖,王改兰, 等. 黄土高原土壤变化及其过程模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. 55-59.
Duan J N, Li X S, Wang G L *et al*. Changes of soil and its process simulation in Loess Hilly Area [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001. 55-59.

[27] 张履勤,章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662-665.
Zhang L Q, Zhang M K. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 662-665.

[28] 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): 353-360.
Yuan Y H, Li H X, Huang Q R *et al*. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 353-360.

[29] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369-373.
An T T, Wang J K, Li S Y *et al*. Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (2): 369-373.

[30] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.

[31] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3664-3671

[32] 樊廷录,王淑英,周广业,丁宁平. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学,2013,46(2): 300-309.
Fan T L, Wang S Y, Zhou G Y, Ding N P. Effects of long-term fertilizer application on soil organic carbon change and fraction in cumulic haplustoll of loess plateau in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 300-309.

[33] 杨艳菊,王改兰,张海鹏,等. 长期不同施肥处理对栗褐土可培养微生物数量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (4): 35-38.
Yang Y J, Wang G L, Zhang H P *et al*. Effects of long-term different fertilization on culturable microorganisms quantity in cinnamon soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (4): 35-38.

[34] 李忠佩, 焦坤, 林心雄, 程励励. 施肥条件下瘠薄红壤的生物化学性状变化[J]. 土壤, 2003, 35(4): 304-310.
Li Z P, Jiao K, Lin X X, Cheng L L. Effect of fertilizer application on biochemical properties of infertile red soils[J]. Soils, 2003, 35 (4): 304-310.