

长期施肥下灰漠土有机碳组分含量及其演变特征

刘 骅¹, 佟小刚², 许咏梅¹, 马兴旺¹, 王西和¹, 张文菊², 徐明岗^{2*}

(1 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆乌鲁木齐 830000;

2 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 采用湿筛和重液悬浮的物理分组方法分析了 18 年不同施肥模式下灰漠土有机碳组分含量差异及其演变特征。结果表明: 与不施肥相比, 长期有机无机肥配施(NPKM 和 1.5 NPKM) 增加各有机碳组分的效果最显著, 且粗和细自由颗粒有机碳、物理保护有机碳、矿物结合有机碳增加速率最高, 平均分别达到 0.12、0.06、0.08 及 0.17 g/(kg·a); 秸秆还田使粗和细自由颗粒有机碳分别以 0.05 和 0.03 g/(kg·a) 的速率增加, 而撂荒和施化肥维持着各有机碳组分的含量。不同有机碳组分间存在显著的相关性, 其中以粗自由颗粒有机碳含量增幅最高, 不同施肥模式下平均增幅是其它有机碳组分的 2.1~8.0 倍; 以矿物结合有机碳所占比例最高, 达到 56.9%~77.8%, 说明粗自由颗粒有机碳对施肥较敏感, 而矿物结合有机碳是灰漠土固存有机碳的主要形式。综上分析, 长期有机无机肥配施是提高灰漠土有机碳组分含量和培肥土壤的有效模式。

关键词: 长期施肥; 灰漠土; 有机碳组分; 演变特征

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)04-0794-07

Evolution characteristics of organic carbon fractions in gray desert soil under long-term fertilization

LIU Hua¹, TONG Xiao-gang², XU Yong-mei¹, MA Xing-wang¹, WANG Xi-he¹, ZHANG Wen-ju², XU Ming-gang^{2*}

(1 Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water-saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, China;

2 Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: The wet sieving and density fractionation scheme was used to study the content and evolution characteristics of organic carbon fractions in grey desert soil under 18 years' fertilization. The results showed that, compared with CK, manure combined with inorganic fertilizer(NPKM and 1.5 NPKM) was most effective on the increase the all organic carbon fractions, and also kept them in the highest increase rate. The average increase rate in coarse free particulate organic carbon(cfPOC) was 0.12 g/(kg·a), in fine free particulate organic carbon(ffPOC) was 0.06 g/(kg·a), in intra-microaggregate particulate organic carbon(iPOC) was 0.08 g/(kg·a) and in mineral-associated organic carbon(MOC) was 0.17 g/(kg·a), respectively. Straws return also increased cfPOC and ffPOC by 0.05 and 0.03 g/(kg·a) respectively. The treatment of abandonment(CK0) and chemical fertilizer maintained the organic carbon content in all fractions. There was a significantly positive relationship between the different organic carbon fractions. The cfPOC under long term fertilization was increased higher than other organic carbon fraction by 2.1~8.0 times, which implied cfPOC was more sensitive to the fertilizations. The MOC, accounting for 56.9%~77.8% of total organic carbon(TOC), was main form for organic carbon sequestration in grey desert soil. In a word, long-term manure combined with chemical fertilizers was benefit to enhance content of organic carbon fractions and improve fertility of gray desert soil.

收稿日期: 2009-05-01

接受日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(40871148); 国家“十一·五”重点科技支撑计划(2006BAD05B09、2006BAD02A14、2007BAC15B01);

“国家灰漠土肥力与肥料效益重点野外科学观测试验站”项目资助。

作者简介: 刘骅(1961—), 女, 安徽省人, 副研究员, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: liuhualh@sohu.com

* 通讯作者 Tel: 010-82105636, E-mail: mgxu@caas.ac.cn

Key words: long-term fertilization; gray desert soil; organic carbon fractions; evolution characteristic

土壤有机碳是土壤肥力和养分循环的重要基础物质,对耕地生产力及其稳定性具有决定性影响^[1]。不同农业管理措施都会引起农田土壤有机碳库发生显著变化,如免耕、配施有机肥、秸秆还田等都可以实现碳汇,而不合理农业管理措施则会导致有机碳的损耗^[2]。因此,研究人为干预下的农田土壤有机碳固定的主导因素和主要途径,揭示农田土壤有机碳在不同农业措施影响下的变化特征,对土壤培肥措施的选择、土壤质量的改善和生产力的提高都具有非常重要的指导意义。

土壤有机碳是组成不同的异质复合物,不同组分有着不同的周转速率和组成特征。因此,目前研究都将有机碳按照周转的快慢和控制转化的因素分成不同独立的组分^[3-4],如轻组有机碳、颗粒有机碳、氧化活性有机碳等,而且它们比土壤总有机碳对耕作、施肥等农业生产措施的响应更敏感^[5-7]。但这些单独的有机碳组分只能反应有机碳库某组分量的变化,并不能反应有机碳在土壤中累积和转化的过程。Six 等^[4]按照有机碳不同的固存机制将有机碳分成不同概念组分库:未被保护的活性有机碳(游离于团聚体间)、物理保护的有机碳(蔽蓄于团聚体内)及生物化学作用保护的有机碳(被矿物颗粒吸附结合)。该有机碳概念组分模型强调土壤团聚体和矿物在土壤有机碳固存和转化中的作用,并通过轻微破坏土壤的物理分组技术得到这些组分,真实反应了有机碳在土壤中的存在状态,为细致研究有机碳的变化特征和转化过程提供了先进方法。但目前国内研究主要是长期施肥对土壤不同粒级团聚体内有机碳^[8]、氧化活性有机碳^[7]、颗粒有机碳含量及深度分布^[9]的影响,对于以此有机碳库概念模型分组有机碳的研究还鲜见报道。而且,多数有机碳含量变化特征研究也仅限于试验当年土样,缺乏有机碳组分在时空上的动态变化研究。因此,本研究利用 18 年灰漠土长期肥料定位试验历史保存土样和 2007 年采集样品,采用湿筛和重液悬浮的物理分组方法,测定和分析化肥、有机肥、秸秆长期配施条件下灰漠土自由颗粒有机碳、微团聚体内物理保护有机碳及矿物结合有机碳含量和时序变化状况,揭示长期不同施肥条件下灰漠土有机碳组分含量差异及演变特征,以进一步认识长期施肥下灰漠土有机碳转化

过程和固存机制。

1 材料与方法

1.1 试验设计

长期肥料肥效试验位于新疆乌鲁木齐市“国家灰漠土肥力与肥料效益重点野外科学观测试验站”(N 43°57', E 87°46')内,海拔高度 600 m,年均气温 5~7℃,年降水量 180~250 mm,年蒸发量 1600~2200 mm,属干旱半干旱荒漠气候。试验地为发育于黄土状洪积-冲积物母质的灰漠土,土壤质地为砂质壤土^[10]。该试验始于 1990 年,初始土壤基本性状为:有机碳 8.80 g/kg,全氮 0.87 g/kg,全磷 0.67 g/kg,全钾 19.8 g/kg,有效氮 55.2 mg/kg,速效磷 3.4 mg/kg,速效钾 288 mg/kg, pH 8.1, CEC 16.20 cmol/kg,容重 1.25 g/cm³。

本试验从长期肥料肥效试验中选择以下 8 个处理:1) 不耕作,不施肥(撂荒, CK0), 2) 不施肥(CK), 3) 单施氮肥(N), 4) 氮、磷配施(NP), 5) 氮、磷、钾配施(NPK), 6) 常量氮、磷、钾 + 常量有机肥(NPKM), 7) 增量氮、磷、钾 + 增量有机肥,即氮、磷、钾和有机肥施用量均是处理 6 的 1.5 倍(1.5 NPKM); 8) 常量氮、磷、钾 + 秸秆还田(NPKS)。每年施 N 242 kg/hm²、P₂O₅ 138 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm²,施肥时 40% 的化学氮肥作追肥,60% 的化学氮肥及全部化学磷、钾肥和有机肥作基肥。所有施氮处理的施氮总量相同;有机肥为羊粪,常量有机肥施用量为 30000 kg/hm²,每年秋季一次施入翻地。秸秆还田为当季作物全部秸秆粉碎还田。试验种植方式为玉米—冬小麦—春小麦轮作,一年一熟。试验小区面积 468 m²,不设重复。

1.2 样品采集与分析方法

当年土样于 2007 年 5 月采集。由于小区面积较大,取样时人为将小区分为 3 个假重复,以弥补试验无重复之不足。每个重复内随机 5 点采集表层 0—20 cm 原状土样,轻轻混匀后,将土样沿土块自然裂缝掰成小块,过 5 mm 筛,以打破超大团聚体,并自然风干。历史保存土样分别测定分析 1990、1994 及 2000 年样品。由于历史土样为风干后密封保存,保存过程由于微生物活动引起的有机碳消耗微小,因此忽略其对土壤中有机碳的影响。

灰漠土有机碳组分分离与测定:按照 Sleutel 等^[11]和 Six 等^[12]的方法。采用湿筛和重液悬浮法

获得存在于大团聚体 ($>250 \mu\text{m}$) 中的粗自由颗粒有机碳 (Coarse free particulate organic carbon, cf-POC)、微团聚体间 ($53\sim250 \mu\text{m}$) 的细自由颗粒有机碳 (Fine free particulate organic carbon, ffPOC)、微团聚体内物理保护的有机碳 (Intra-microaggregate particulate organic carbon, iPOC) 及与矿物 ($<53 \mu\text{m}$) 结合的有机碳 (Mineral-associated organic carbon, MOC)。具体分组流程详见参考文献 [13]。未分组全土和烘干后各组分磨细后过 0.15 mm 筛, 采用 EA3000 型元素分析仪测定有机碳和全氮含量。最后以单位重量土壤中有机碳含量来表示总有机碳和各组分有机碳的量。其它土壤理化性质指标采用常规分析法测定^[14]。

1.3 数据分析

实验测定结果均以平均值表示。采用邓肯法检验不同施肥处理之间有机碳组分含量差异显著性 ($P < 0.05$)。有机碳组分时序动态变化特征采用有机碳组分含量随施肥年份延长变化的线性回归方程分析, 其中以方程决定系数 R^2 的显著性判断有机碳组分变化的显著性, 以方程回归系数表示有机碳组分的年变化速率。以上统计与分析均利用 Excel 和 SPSS11.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对灰漠土各有机碳组分含量的影响

2007 年不同施肥处理灰漠土各有机碳组分含量和分布 (图 1) 显示, 长期施肥对粗和细自由颗粒有机碳 (cfPOC 和 ffPOC) 影响较大。与不施肥相比, 不同施肥处理均显著增加了 cfPOC 和 ffPOC 含量。

其中以有机无机肥配施 (NPKM 和 1.5 NPKM) 的 cf-POC 和 ffPOC 含量最高, 分别达到 $2.65\sim3.19 \text{ g/kg}$ 和 $1.20\sim1.67 \text{ g/kg}$, 是不施肥处理的 $6.0\sim7.0$ 和 $3.0\sim4.1$ 倍; 其次是秸秆还田 (NPKS) 处理, cfPOC 和 ffPOC 含量分别为 1.58 g/kg 和 0.90 g/kg , 是不施肥处理的 3.5 和 2.2 倍; 施化肥处理 (N、NP 和 NPK) cfPOC 和 ffPOC 增幅最低, 分别为 $0.4\sim1.1$ 和 $0.3\sim0.5$ 倍; 而撂荒处理 (CK0) 也使 cfPOC 和 ffPOC 分别增加了 0.7 和 0.6 倍。

物理保护有机碳 (iPOC), 除单施氮肥 (N) 外, 其它处理与不施肥处理均达显著差异。其中, 有机无机肥配施处理 iPOC 含量增长了 $1.9\sim3.2$ 倍, 秸秆还田处理增加了 87.8% ; 撂荒提高了 62.9% ; 而氮磷钾配施 (NPK) 和氮磷配施 (NP) 下 iPOC 增幅最低, 平均仅为 36.2% 。

矿物结合有机碳 (MOC) 受施肥影响较小。与不施肥处理相比, 撂荒、秸秆还田、单施氮肥均未显著增加 MOC。有机无机肥配施 (NPKM 和 1.5 NPKM) 下 MOC 含量达 $7.63\sim10.25 \text{ g/kg}$, 比不施肥显著增加了 $42.6\%\sim91.4\%$ 。氮磷钾配施 (NPK) 和氮磷配施 (NP) MOC 平均增加了 14.1% 。

由图 1 还看出, 不同有机碳组分相比, 灰漠土中矿物结合有机碳 (MOC) 所占比例最高, 占到总有机碳的 $56.9\%\sim77.8\%$, 对固定有机碳显示出重要作用。细自由颗粒有机碳 (ffPOC) 所占比例最低, 仅为 $5.9\%\sim9.5\%$; 物理保护有机碳 (iPOC) 和粗自由颗粒有机碳 (cfPOC) 所占比例无显著差异, 分别占到总有机碳的 $9.6\%\sim15.6\%$ 和 $6.7\%\sim19.8\%$ 。

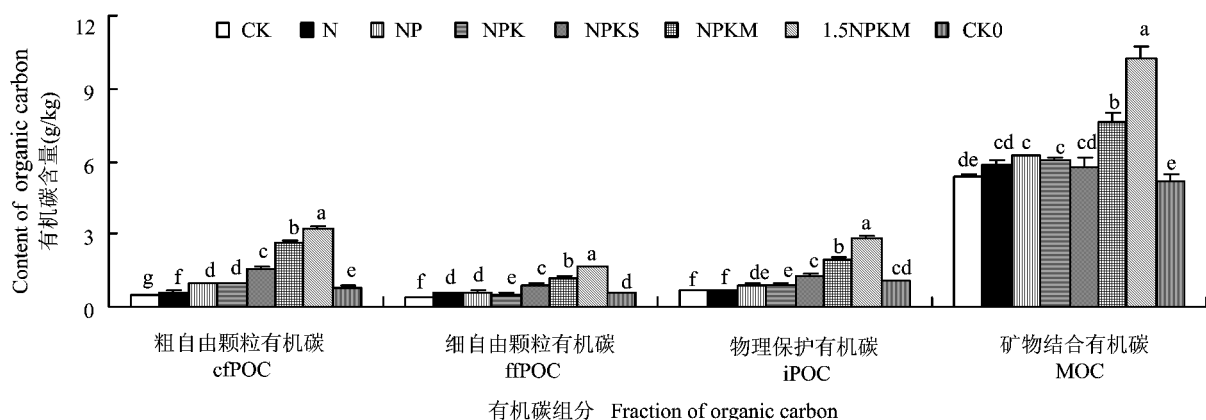


图 1 长期不同施肥下灰漠土有机碳组分含量 (2007 年)

Fig. 1 Contents of organic carbon fractions in grey desert soil under different long-term fertilization (2007a)

[注 (Note): cfPOC—Coarse free particulate organic carbon; ffPOC—Fine free particulate organic carbon; iPOC—Intra-microaggregate particulate organic carbon; MOC—Mineral-associated organic carbon]

2.2 长期施肥下灰漠土各有机碳组分时序变化

18年不同施肥模式下灰漠土各有机碳组分演变表现出较大差异。到2007年,有机无机肥配施(1.5 NPKM和NPKM)各有机碳组分均有显著增加,cf-POC、ffPOC分别比试验初始时(1990年)提高了3.6~4.5和3.1~4.8倍,分别以年均0.10~0.13和

0.05~0.07 g/kg的速率显著增加;iPOC、MOC分别较1990年提高1.1~2.1和0.2~0.6倍,年均增加速率分别达到0.05~0.11和0.09~0.24 g/kg。同时,1.5 NPKM处理各组分有机碳年均增加速率均显著高于NPKM,说明增量有机无机肥配施比常量有机无机肥配施能进一步显著增加灰漠土有机碳(图2、表1)。

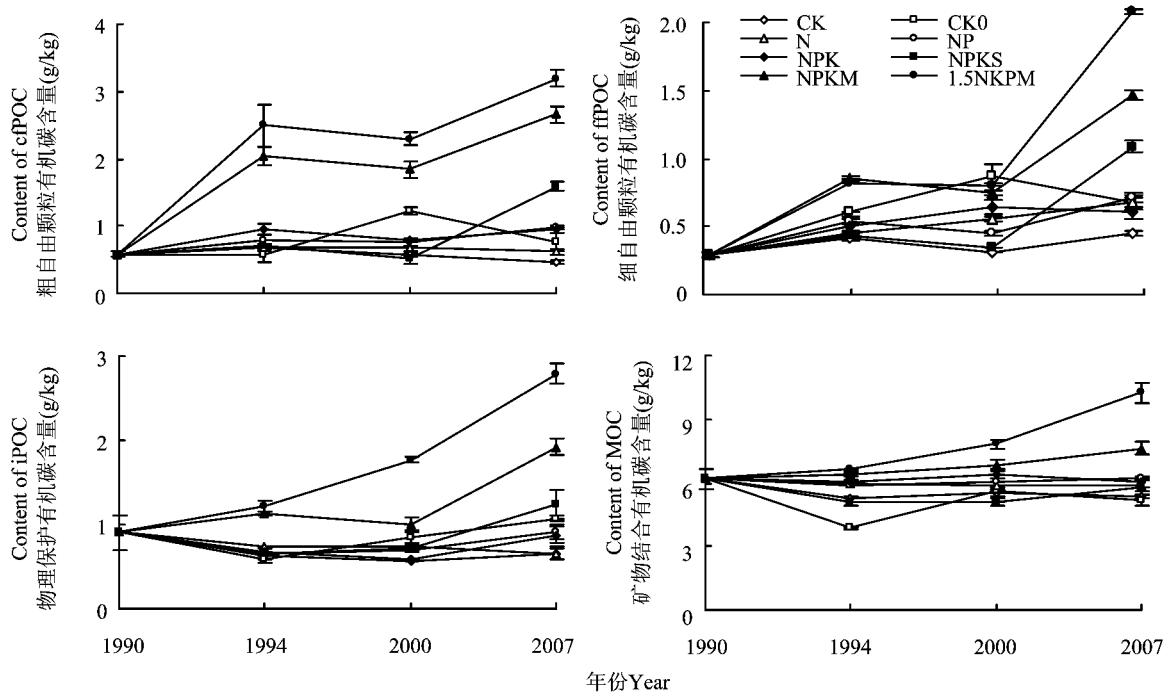


图2 长期不同施肥下灰漠土有机碳组分含量变化特征

Fig. 2 Evolution characteristics of organic carbon fractions in grey desert soil under different long-term fertilization

表1 长期施肥灰漠土有机碳组分含量与时间(年)的线性关系(1990~2007a)

Table 1 Linear relationship between organic carbon fractions content and time(year) in grey desert soil under long-term fertilization

处理 Treatments	粗自由颗粒有机碳 cfPOC		细自由颗粒有机碳 ffPOC		物理保护有机碳 iPOC		矿物结合有机碳 MOC	
	回归方程 决定系数 (R^2)	年变化 Annual change [g/(kg·a)]	回归方程 决定系数 (R^2)	年变化 Annual change [g/(kg·a)]	回归方程 决定系数 (R^2)	年变化 Annual change [g/(kg·a)]	回归方程 决定系数 (R^2)	年变化 Annual change [g/(kg·a)]
CK0	0.217	0.02	0.471	0.02	0.330	0.01	0.006	0.01
CK	0.518	0.01	0.376	—	0.397	-0.01	0.420	-0.04
N	0.068	—	0.964**	0.02	0.724*	-0.01	0.869*	-0.02
NP	0.815*	0.02	0.701*	0.02	0.037	—	0.126	0.01
NPK	0.418	0.02	0.662	0.01	0.002	—	0.019	—
NPKS	0.620*	0.05	0.710*	0.03	0.379	0.02	0.006	0.01
NPKM	0.730*	0.10	0.826*	0.05	0.728*	0.05	0.979**	0.09
1.5 NPKM	0.711*	0.13	0.863*	0.07	0.979**	0.11	0.958**	0.24

注(Note): cfPOC—Coarse free particulate organic carbon; ffPOC—Fine free particulate organic carbon; iPOC—Intra-microaggregate particulate organic carbon; MOC—Mineral-associated organic carbon. R^2 为回归方程的决定系数 Coefficient of determination of linear regression equation, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

与1990年相比,长期秸秆还田下 cfPOC 和 ffPOC 含量分别增加了1.73和2.1倍,二者含量随秸秆配施时间延长呈显著增加趋势,增加速率分别达到0.05和0.03 g/(kg·a),而 iPOC 和 MOC 年均变化速率未达显著水平,因此秸秆配施投入的碳源仅能维持 iPOC 和 MOC 碳库的周转。长期撂荒和不施肥处理各有机碳组分未随处理时间延长而表出显著的变化,表明撂荒和不施肥土壤18年中有机碳矿化和腐殖化过程处于平衡状态,使得土壤有机碳能够维持稳定。

长期施用化肥对各有机碳组分含量时序变化影响较小,仅 NP 配施处理使 cfPOC 和 ffPOC 分别比1990年提高了0.6和1.1倍,年均增加速率均为0.02 g/kg。但长期单施氮肥使灰漠土 iPOC 和 MOC 分别以0.01和0.02 g/(kg·a)的速率降低,说明长期单独施用单一化肥不利于土壤有机碳的积累。

2.3 不同有机碳组分与总有机碳的关系

简单相关分析表明,不同有机碳组分与总有机碳之间呈极显著正相关关系(表2),说明它们都是灰漠土总有机碳库的稳定组成,对总有机碳增加具有促进作用。进一步偏相关分析看出,不同有机碳组分中,仅矿物结合有机碳(MOC)与总有机碳极显著正相关,且该组分有机碳占总有机碳的56.9%~77.8%,说明它是灰漠土固存有机碳的重要组分。C/N 越低代表腐殖化程度越高,不同有机碳组分 C/N 表现出自由颗粒有机碳(17.5) > 物理保护有机碳(8.6) > 矿物结合有机碳(7.2)(图3),说明从自由颗粒有机碳库到物理保护有机碳库再到矿物结合有机碳库之间是有机碳在土壤中逐渐腐殖化并积累的一个过程。

表2 土壤不同有机碳组分与总有机碳的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between different organic carbon fractions and TOC in soil

项目 Items	cfPOC	ffPOC	iPOC	MOC
cfPOC	1.000			
ffPOC	0.846**	1.000		
iPOC	0.882**	0.854**	1.000	
MOC	0.752**	0.698**	0.586**	1.000
TOC	0.614**	0.598**	0.659**	0.652**
PCA	0.140	0.145	0.402	0.465*

注(Note): cfPOC—Coarse free particulate organic carbon; ffPOC—Fine free particulate organic carbon; iPOC—Intra-microaggregate particulate organic carbon; MOC—Mineral-associated organic carbon; TOC—Total organic carbon; PCA—TOC 偏相关分析 Partial correlation analysis of TOC. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

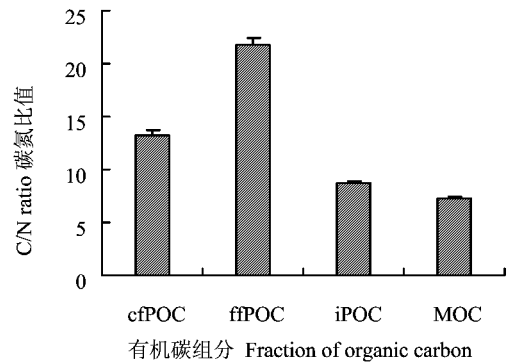


图3 不同有机碳组分 C/N 比值

Fig. 3 Ratio of C/N in different organic carbon fractions

[注(Note): cfPOC—Coarse free particulate organic carbon; ffPOC—Fine free particulate organic carbon; iPOC—Intra-microaggregate particulate organic carbon; MOC—Mineral-associated organic carbon.]

3 讨论

长期施肥下灰漠土中粗和细自由颗粒有机碳分别占到总有机碳的6.7%~19.8%和5.9%~9.5%,这与 Sleutel 等^[11]报道的长期施用化肥和有机肥下粗、细自由颗粒有机碳占到总有机碳的5%~14%和10%~13%的结果基本接近。这两种有机碳组分与颗粒有机碳(POC)和轻组有机碳(LFOC)组成相近,主要来自作物根系残茬、植物残体,同时又是微生物分解的首选^[15],属于高活性有机碳,因此对农业措施响应敏感,也常被视作有机碳变化的指示物^[16]。本研究中粗和细自由颗粒有机碳也表现出显著的增加趋势,尤其是长期配施有机肥,使得它们比不施肥分别增加6.5和3.2倍,增幅显著高于其它组分。佟小刚等^[13]对河南潮土和徐江兵等^[17]对南方红壤的研究中也得出自由颗粒有机碳或轻组有机碳在配施有机肥下增加效果最显著。这与有机肥直接输入有机物质直接相关。同样输入有机物的配施秸秆处理也能显著增加灰漠土中自由颗粒有机碳,这与徐江兵等^[17]得出南方红壤长期配施秸秆并不能增加土壤轻组有机碳的结论不一致,这可能与南方高温高湿条件下秸秆矿化分解迅速有关;同时也说明北方低温低湿的气候条件有利于颗粒有机碳的积累。

团聚体物理保护的有机碳库在灰漠土中占到总有机碳的9.6%~15.6%,这与 Sleutel^[11]等报道的蔽蓄于团聚体中的有机碳比例为7.3%~12.0%的结果基本一致。物理保护有机碳对配施有机肥有积极的响应^[13],但受施用化肥和秸秆还田影响较小。土壤物理保护有机碳主要通过团聚体的蔽蓄以阻止

微生物分解起作用^[4],而施用化肥直接为微生物提供了有效氮源,显著促进土壤微生物活动,进而加强对物理保护有机碳分解,使其矿化损失量等于或大于归还量,如单施氮肥还引起物理保护有机碳以 0.01 g/(kg·a) 的速率显著下降。秸秆还田虽然投入大量植物残体,但由于北方低温低湿的气候原因,有机残体分解慢,而物理保护有机碳主要是有机物分解的中间产物^[15],因此秸秆还田还未能表现出积极作用。

惰性的矿物结合有机碳在灰漠土各有机碳组分中含量最高,占到总有机碳的 56.9%~77.8%,是土壤有机碳存在的主要形式。各处理中配施有机肥使该组分碳库表现出显著增加的特征。一方面因为有机肥中的多聚糖、脂肪酸及芳香族化合物与土壤矿物颗粒结合形成矿物结合有机碳^[18];另一方面有机肥作为外加碳源,其归还碳量显著大于土壤本身矿化损失碳量。其余处理对矿物结合有机碳影响较小。由于矿物结合有机碳主要由腐殖质组成^[19],因此撂荒、秸秆还田和化肥施用输入的有机质分解形成的腐殖质可能还不足以显著增加矿物结合有机碳。土壤中自由颗粒有机碳主要是新输入的有机质,它们分解后进而向物理保护有机碳转化,最后成为腐殖化程度较高的矿物结合有机碳,相对稳定地固存于土壤^[11,13]。本研究不同有机碳组分 C/N 依次按自由颗粒有机碳、物理保护有机碳和矿物结合有机碳逐渐降低,也说明这 3 种有机碳组分腐殖化程度依次提高,可较好地反映出有机碳在土壤中转化和累积的过程。

参 考 文 献:

- [1] 徐明岗,梁国庆,张夫道. 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. Variation of soil fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,2006.
- [2] 杨景成,韩兴国,黄建辉. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报,2003,23(4): 787-796.
Yang J C, Han X G, Huang J H. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. Acta. Ecol. Sin.,2003,23(4): 787-796.
- [3] Oades J. The retention of organic matter in soils[J]. Biogeochemistry,1988,5: 35-70.
- [4] 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: 155-176.
- [5] Bremer E, Ellert B H, Janzen H H. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1995,59: 1398-1403.
- [6] 李江涛,张斌,彭新华. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机质形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报,2004,41(6): 912-913.
Li J T, Zhang B, Peng X H. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil[J]. Acta. Pedol. Sin.,2004,41(6): 912-913.
- [7] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4): 459-465.
Xu M G, Yu R, Sun X F *et al.* Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index(CMI) of the typical soils of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2006,12(4): 459-465.
- [8] 孙天聪,李世清,邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(9): 1841-1848.
Sun T C, Li S Q, Shao M A. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates[J]. Sci. Agric. Sin.,2005,38(9): 1841-1848.
- [9] 周萍,张旭辉,潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(6): 765-771.
Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2006,12(6): 765-771.
- [10] 王讲利,刘骅,桂贞. 灰漠土长期定位施肥试验研究 II. 长期定位施肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(增刊): 87-91.
Wang J L, Liu H, Gui Z. Research of long-term fertilization experiment on gray soil in Xinjiang II. Effect of long-term fertilization on soil fertility[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2002,8(Suppl.): 87-91.
- [11] Sleutel S, Neve S D, 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]. Eur. J. Agron.,2006,25: 280-288.
- [12] Six J, Paustian K, Elliott E X *et al.* Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,2000,64: 681-689.
- [13] 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,2009,15(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 Nutr. Fert. Sci.,2009,15(4): 831-836.
- [14] 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,1999.

- Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] Six J, Guggenberger G, Paustian K *et al.* Sources and composition of soil organic matter fractions between and within aggregates [J]. *Eur. J. Soil Sci.*, 2001, 52: 607–618.
- [16] Carter M R, Angers D A, Gregorich E G. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions[J]. *Can. J. Soil Sci.*, 2003, 83: 11–23.
- [17] 徐江兵, 李成亮, 何园球. 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. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil[J]. *Acta. Pedol. Sin.*, 2007, 44(4): 675–682.
- [18] Tisdall J M, Oades J M. The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth[J]. *Aust. J. Soil Res.*, 1980, 18: 415–422.
- [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.