

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*

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

(¹ 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830000; ² 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施肥重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要 采用物理分组方法分析了长期(1990—2007年)不同施肥条件下灰漠土各粒径矿物颗粒结合有机碳含量和分布差异及其随施肥时间的演变特征。结果表明:与不施肥相比,配施有机肥对增加各有机碳组分的效果最显著,并以砂粒有机碳含量的增速($0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)最高,对施肥最敏感,撂荒地可以显著增加不同黏粉粒结合有机碳含量,秸秆还田仅能维持各级矿物颗粒结合有机碳的含量,长期施用化肥不利于各级颗粒结合有机碳含量的增加。从分配比例来看,以粗粉粒(27.9%)和粗黏粒(27.1%)有机碳所占比例最高,是固持有机碳的重要组分,配施有机肥使砂粒有机碳比例显著提高119.4%,细粉粒和粗黏粒有机碳比例却分别降低了40.3%和37.9%,从而提高了颗粒有机碳含量(W_{POC})与矿物结合有机碳含量(W_{MOC})的比值,改良了土壤有机碳性质。长期配施有机肥是增加灰漠土各级矿物颗粒结合有机碳积累和提升灰漠土肥力的最佳方式。

关键词 长期施肥 灰漠土 矿物颗粒结合有机碳 演变特征

文章编号 1001-9332(2010)01-0084-07 中图分类号 S153.6+21 文献标识码 A

Content and evolution characteristics of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization. LIU Hua¹, TONG Xiao-gang², MA Xing-wang¹, WANG Xi-he¹, ZHANG Wen-ju², XU Yong-mei¹, XU Ming-gang²(¹Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, China; ²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2010 21(1):84-90.

Abstract: Physical fractionation technique was used to analyze the content, distribution, and temporal evolution of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term (1990-2007) fertilization. Compared with no fertilization, a combined application of manure and chemical fertilizers increased the organic carbon associated with particle-size fractions significantly, with the highest increment ($0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) in sand. Fallowing also increased the organic carbon associated with clay and silt significantly. Straw return to cropland only maintained the organic carbon content in different particle-size fractions, while long-term application of chemical fertilizers was not beneficial to the organic carbon increase in particle-size fractions. Coarse silt and coarse clay had the highest distribution rates of organic carbon (27.9% and 27.1%, respectively), being the important fractions in sequestering organic carbon. When manure was applied with chemical fertilizers, the organic carbon in sand was significantly increased by 119.4%, while that in fine silt and coarse clay was significantly decreased by 40.3% and 37.9%, respectively, which resulted in the increase in the ratio of particulate organic carbon content (W_{POC}) to mineral-associated organic carbon content (W_{MOC}), and improved soil carbon property. Long-term application of manure combined with chemical fertilizers was the best mode to increase the organic carbon content in particle-size fractions and improve the fertility of grey desert soil.

Key words: long-term fertilization; gray desert soil; organic carbon associated with particle-size fractions; evolution characteristics.

* 国家自然科学基金项目(40871148)和国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD05B09, 2006BAD02A14和2007BAC15B01)资助。

** 通讯作者。E-mail: mgxu@caas.ac.cn

2009-06-02 收稿, 2009-11-05 接受。

土壤有机碳对于改良土壤物理、化学和生物学性质、改善养分循环和供应以及提高作物产量等都具有重要作用^[1-2],通过合理农业措施(如施肥、免耕、与牧草轮作、秸秆还田等)的实施都可实现农田土壤碳汇的功能^[3-4],并且其中施肥是提高土壤有机碳含量最具潜力的农业措施^[5].研究农田土壤有机碳在不同农业措施下的变化特征和累积效应,对土壤培肥措施选择、土壤质量改善、生产力的提高及减少大气 CO₂ 排放等具有非常重要的指导意义.

土壤中矿物颗粒对有机碳的吸附作用被认为是土壤固持有机碳的重要机制之一,故有机碳研究一直与矿物颗粒结合在一起^[6].采用超声分散和离心的方法^[7-8]得到的不同大小矿物颗粒结合的有机碳在性质和组成上存在显著差异,因此对农业措施的响应也不同^[9].一般认为,砂粒与有机碳结合非常弱,功能上属于活性有机碳库,也被称为颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)^[10],而粉粒和黏粒具有较大的表面积,并通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附有机碳,这部分有机碳属于惰性有机碳库^[11],又称为矿物结合有机碳(mineral-associated organic carbon, MOC).Diekow 等^[11]研究表明,玉米与燕麦或豆类作物轮作均能显著增加土壤不同大小矿物颗粒结合的有机碳含量;Schulten 等^[9]和 Wu 等^[12]研究结果表明,施用有机肥后,各级矿物颗粒有机碳含量均显著增加,施化肥(特别是单施氮肥)则影响较小.轮作和施有机肥都使有机碳在砂粒和粉粒上的分布比例显著增加,在黏粒上的分布比例降低.多数研究还认为,土壤有机碳主要集中于黏粒上,特别是粗黏粒上^[9,11-12].可见,矿物颗粒结合有机碳已成为碳变化研究的热点之一.但国内对不同农业措施下土壤矿物颗粒结合有机碳差异的研究还较薄弱,相关研究主要集中于土壤总有机碳、各级团聚体中有机碳的变化上^[13-14],且试验研究土样多仅限于当年,对于时间序列上矿物颗粒结合有机碳组分动态变化的研究鲜见报道.因此,本文利用灰漠土长期(1990—2007年)肥料定位试验历史保存土样和2007年采集样品,采用超声分散和离心的物理分组方法,测定分析了长期施用化肥、有机肥、秸秆还田条件下灰漠土不同大小矿物颗粒结合有机碳组分库的时序变化和分布状况,旨在了解长期施肥下灰漠土有机碳周转和固存机制,为提升灰漠土肥力提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为灰漠土,采自位于新疆乌鲁木齐市

的国家灰漠土肥力与肥料效益重点野外科学观测试验站(43°57' N, 87°46' E),该土壤是我国干旱半干旱荒漠区的主要土壤类型之一,其成土母质以黄土状洪积-冲积物母质为主,土壤质地为砂质壤土^[15].该肥料试验始于1990年,起始时土壤有机碳 8.8 g·kg⁻¹、全氮 0.87 g·kg⁻¹、全磷 0.67 g·kg⁻¹、全钾 19.8 g·kg⁻¹、有效氮 55.2 mg·kg⁻¹、速效磷 3.4 mg·kg⁻¹、速效钾 288 mg·kg⁻¹、缓效钾 1567 mg·kg⁻¹、pH 8.1、阳离子交换量(CEC)16.2 cmol·kg⁻¹、土壤容重 1.25 g·cm⁻³.土壤矿物颗粒组成为:砂粒 30.0%、粗粉粒 40.2%、细粉粒 9.8%、粗黏粒 16.2%和细黏粒 3.8%.

1.2 试验设置

本文选择长期肥料试验中的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(1.5NPKM),即氮磷钾和有机肥施用量均是处理6的1.5倍8)常量氮磷钾+秸秆还田(NPKS).每处理小区面积468 m²,不设重复.施肥量为每年施 N 242 kg·hm⁻²、P₂O₅ 138 kg·hm⁻²、K₂O 60 kg·hm⁻².施肥时40%的化学氮肥作追肥,60%的化学氮肥及全部磷、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,常量有机肥用量为30000 kg·hm⁻²,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.

2007年5月采集表层0~20 cm的土样.由于每小区面积较大,取样时人为将小区分为3个假设重复以弥补没有重复的不足,每个假设重复小区内选择5个点取样,然后混合(约500 g土样)作为该处理的待测土样.土样采集后于室内风干、磨碎、过2 mm筛,备用.在研磨过程中弃去大于2 mm的有机物和砂砾.并分别测定分析了1990年、1994年和2000年保存的风干土壤样品.

1.3 不同大小矿物颗粒结合有机碳的分离与测定

采用 Anderson 等^[7]和武天云等^[8]的方法对灰漠土中不同大小矿物颗粒结合有机碳进行分离,具体步骤如下:称取10 g风干土样于250 ml烧杯,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,留在53 μm上的即为砂粒组分(53~2000 μm, S).根据 Stokes 定律计算过53 μm筛

的黏粉粒中每个粒级颗粒分离的离心时间,基于此,分离得到粗粉粒(5~53 μm,CS)、细粉粒(2~5 μm,FS)、粗黏粒(0.2~2 μm,CC)和细黏粒(<0.2 μm,FC)。离心过程中粗粉粒和粗黏粒为离心管底部沉淀,直接转移至铝盒;细粉粒和细黏粒为悬液,采用0.2 mol·L⁻¹ CaCl₂絮凝,再离心收集。以上砂粒、粉粒及黏粒的分级以美国农业部为准^[16]。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;烘干后各组分分磨细过0.25 mm筛,采用重铬酸钾法测定有机碳含量。

1.4 数据处理

W_{POC}/W_{MOC} 值为砂粒有机碳含量(W_{POC} ,即颗粒有机碳含量)与矿物结合有机碳含量(W_{MOC} ,即粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒有机碳含量之和)的比值。采用SPSS软件,对不同施肥处理矿物颗粒结合有机碳含量和分布比例采用邓肯法进行差异显著性检验($P < 0.05$);采用线性回归模拟方程分析各级矿物颗粒结合有机碳随施肥时间的演变特征。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥条件下不同大小矿物颗粒结合有机碳含量的差异

长期(18 a)施肥后,与不施肥相比,2007年氮磷配施(NP)处理使细黏粒有机碳含量显著增加了11.2%;氮磷钾平衡施用(NPK)处理使砂粒有机碳含量显著增加了66.9%;秸秆还田(NPKS)下细粉粒和细黏粒有机碳分别显著增加了31.2%和9.4%,而砂粒、粗粉粒及粗黏粒的有机碳含量并不受秸秆还田影响;撂荒(CK₀)处理下粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒的有机碳含量均有显著增加,增幅分别为50.8%、43.2%、19.1%和21.1%(表1);

表1 长期施肥下灰漠土不同大小矿物颗粒结合有机碳含量

Tab.1 Content of organic carbon associated with particle-size fractions in grey desert soil under long-term fertilization (mean ± SD, g·kg⁻¹, 2007)

处理 Treatment	砂粒有机碳 Sand organic carbon	粗粉粒有机碳 Coarse silt organic carbon	细粉粒有机碳 Fine silt organic carbon	粗黏粒有机碳 Coarse clay organic carbon	细黏粒有机碳 Fine clay organic carbon
CK	1.60 ± 0.17d	2.47 ± 0.29d	1.67 ± 0.12c	2.88 ± 0.20d	0.64 ± 0.06e
N	1.55 ± 0.29d	2.68 ± 0.25d	1.69 ± 0.14c	2.81 ± 0.23d	0.56 ± 0.05e
NP	2.04 ± 0.03cd	2.86 ± 0.16d	1.76 ± 0.09c	3.05 ± 0.23d	0.71 ± 0.03cd
NPK	2.68 ± 0.10c	2.56 ± 0.12d	1.45 ± 0.12c	2.69 ± 0.17d	0.47 ± 0.02e
NPKS	1.05 ± 0.04d	2.76 ± 0.18d	2.19 ± 0.11a	3.10 ± 0.05cd	0.70 ± 0.06cd
NPKM	5.23 ± 0.39b	5.01 ± 0.40b	1.97 ± 0.16b	3.74 ± 0.20ab	0.85 ± 0.06ab
1.5NPKM	10.73 ± 0.61a	6.00 ± 0.18a	2.37 ± 0.07a	3.91 ± 0.21ab	0.93 ± 0.05a
CK ₀	1.58 ± 0.14d	3.72 ± 0.33c	2.39 ± 0.11a	3.43 ± 0.19bc	0.77 ± 0.11bc

同列数据后不同字母表示不同处理间的差异显著($P < 0.05$) Different small letters within the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

配施有机肥(NPKM和1.5NPKM)处理使各级矿物颗粒结合有机碳含量增加的效果最显著,砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒有机碳含量的平均增幅分别达到397.5%、122.9%、29.7%、33.0%和39.8%,其中砂粒中有机碳含量的增幅最大,说明该有机碳组分对配施有机肥的响应最敏感。

长期不同施肥条件下,灰漠土总有机碳在各粒径矿物颗粒中的平均分布比例总体表现为粗粉粒(27.9%)、粗黏粒(27.1%)>砂粒(22.6%)>细粉粒(16.5%)>细黏粒(5.9%),图1,可见粗粉粒和粗黏粒上集中的有机碳最多,说明两者是灰漠土中固持有机碳的重要组分。长期施肥对总有机碳分布比例的影响因颗粒大小不同而差异较大。与不施肥相比,有机无机肥配施(NPKM和1.5NPKM)使砂粒中有机碳比例平均提高了119.4%,但分配到细粉粒和粗黏粒中的有机碳比例却分别平均显著下降了

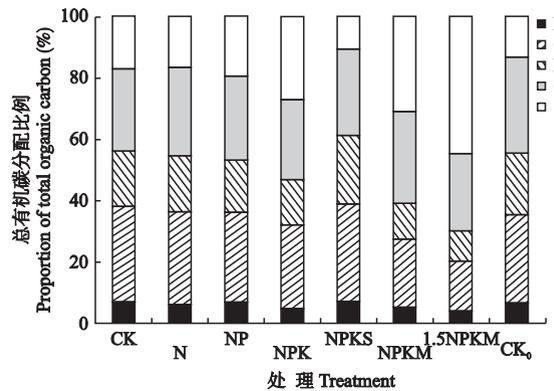


图1 长期施肥下灰漠土总有机碳在不同大小颗粒中的分布
Fig.1 Distribution of total organic carbon in different particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization (2007).

CS:粗粉粒 Coarse silt;FS:细粉粒 Fine silt;CC:粗黏粒 Coarse clay;FC:细黏粒 Fine clay;S:砂粒 Sand.

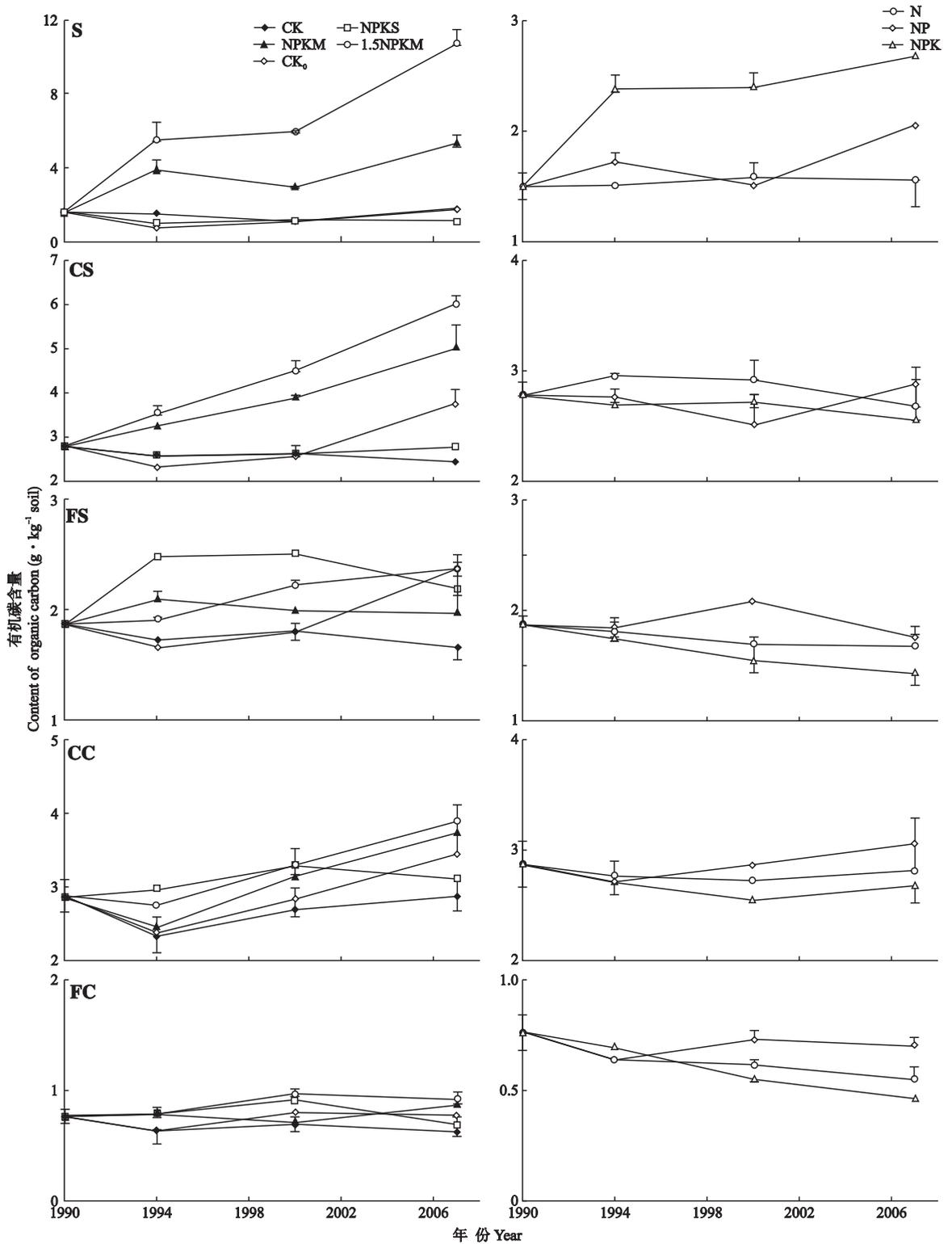


图 2 长期不同施肥方式下灰漠土不同大小矿物颗粒结合有机碳含量的变化

Fig. 2 Change of content of organic carbon associated with particle-size fractions in grey desert soil under different long-term fertilization (mean \pm SD , 1990–2007).

40.3% 和 37.9% ;平衡施用化肥 (NPK) 处理使砂粒有机碳比例显著增加了 57.2% ,而偏施化肥 (N、NP) 条件下各级矿物颗粒有机碳比例基本接近 ,说

明偏施化肥并不能改变总有机碳在各级矿物颗粒中的分布比例 秸秆还田 (NPKS) 和撂荒 (CK₀) 处理分别使砂粒有机碳比例下降了 38.2% 和 23.1% ,其他

粒级矿物颗粒有机碳的比例并无显著变化。

2.2 长期不同施肥条件下不同大小矿物颗粒结合有机碳的时序变化

灰漠土各级矿物颗粒结合有机碳随施肥时间变化的差异较大。由图 2 可以看出,长期不施肥或不平衡施用化肥(N、NP)处理仅能维持不同大小矿物颗粒结合有机碳含量的初始水平;平衡施用化肥(NPK)处理使砂粒有机碳含量以 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率显著上升,但粗粉粒、细粉粒、细黏粒有机碳含量分别以 0.01 、 0.03 和 $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈显著下降趋势;秸秆还田(NPKS)处理下各级矿物颗粒结合有机碳含量的变化速率并不显著,说明秸秆有机物的输入仅能平衡灰漠土有机碳的损耗;在撂荒(CK_0)状态下,细粉粒和粗黏粒有机碳含量分别以 0.03 和 $0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率显著增加。随常量配施有机肥(NPKM)处理时间的延长,砂粒、粗粉粒、粗黏粒有机碳含量均呈显著增加趋势,其增速分别为 0.18 、 0.13 、 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;而增量配施有机肥(1.5NPKM)处理下,各级矿物颗粒结合有机碳含量均呈显著增加趋势,砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒和细黏粒有机碳含量的增速分别为 0.49 、 0.19 、 0.03 、 0.07 、 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,其中砂粒有机碳含量的增加速率最高,是其他矿物颗粒的 $2.6 \sim 49.0$ 倍,分别是常量有机肥配施和平衡化肥施用处理下砂粒有机碳含量增加速率的 2.7 和 8.2 倍,可见增量配施有机肥可显著增加灰漠土有机碳含量,同时说明砂粒有机碳是反映灰漠土有机碳库变化的敏感组分。

2.3 长期不同施肥方式对 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值的影响

土壤中活性砂粒有机碳含量与惰性矿物结合有

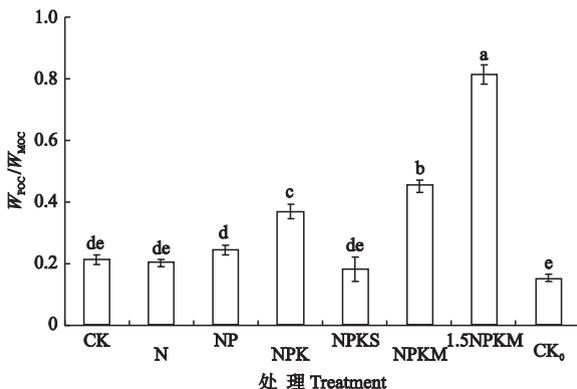


图 3 长期不同施肥方式下土壤颗粒有机碳含量(W_{POC})与矿物结合有机碳含量(W_{MOC})的比值($W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$)

Fig. 3 Ratio of W_{POC} to W_{MOC} in soil under different long-term fertilization (mean \pm SD, 2007).

机碳含量的比值($W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$)可在一定程度上反映土壤有机碳的质量和稳定程度^[17]。 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值较大,表明土壤有机碳较易矿化、周转期较短或活性较高,其值较小则说明土壤有机碳较稳定、不易被生物所利用^[18-19]。与不施肥处理相比,配施有机肥(NPKM和1.5NPKM)和氮磷钾(NPK)平衡施用下,灰漠土中 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值显著增加(图3),其增幅分别达到1.14~2.86倍和0.76倍,说明这2种施肥方式可显著提高土壤有机碳的活性、改善土壤有机碳的质量;其他施肥条件下的 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值均未显著增加,说明灰漠土有机碳的消耗主要是活性有机碳的损失。

3 讨 论

由于土壤中不同大小矿物颗粒的表面化学性质不同,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^[9,20],而这些矿物颗粒结合有机碳不同特性的综合作用使各级土壤矿物颗粒结合的有机碳对耕作、施肥等农业措施的反应不同^[21]。砂粒中的有机碳主要源于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时或过渡的有机碳^[19,22],属于易分解碳库,因此对施肥的响应敏感于其余较细颗粒^[14]。本试验结果显示,直接输入有机物的配施有机肥处理显著增加了砂粒有机碳,其年均增加速率是其他颗粒的 $2.6 \sim 49.0$ 倍,因此可将砂粒有机碳作为反映长期施肥下灰漠土碳库变化的指示碳库,这也在国外许多研究中得到证实^[10,20]。但同样输入有机残体的秸秆还田处理并没有显示出显著增加砂粒有机碳的趋势,Leinweber等^[23]亦发现秸秆还田配施化肥与单施化肥处理的砂粒有机碳含量并无差异,撂荒及不平衡施用化肥(N、NP)处理也仅能维持砂粒有机碳含量,这可能与灰漠土地处西北干旱半干旱地区,其土壤有机质矿化强烈、损耗迅速有关,而内在原因还需进一步研究。

黏粉粒中吸附的有机碳主要是半腐殖化和完全腐殖化的有机碳,基本属于惰性有机碳组分,对于土壤固碳起着重要的作用^[24-25]。配施有机肥处理直接外源输入有机碳,使灰漠土不同大小黏粉粒结合有机碳含量均显著增加,且高量配施有机肥处理的各级黏粉粒结合有机碳含量的增加速率达到最高,秸秆还田和撂荒处理部分颗粒结合有机碳含量也显著增加。佟小刚等^[17]对长期施肥下红壤与潮土不同大小黏粉粒结合有机碳含量的研究也得出类似结果^[17]。但长期施用化肥对各级颗粒结合有机碳含量

的增加效果并不显著,其中平衡施用化肥还使粗粉粒、细粉粒、细黏粒有机碳含量分别以 0.01、0.03 和 0.02 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈显著下降趋势,说明长期施用化肥并不利于灰漠土矿物颗粒结合有机碳含量的增加。

不同黏粉粒间相比,长期施肥条件下,细黏粒有机碳含量和分布比例最低,这可能与细黏粒本身含量只占土壤的 3.8% 有关。本研究 8 种施肥处理下,在砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒有机碳平均分布比例中,以粗粉粒(27.9%)和粗黏粒(27.1%)最高,这与 Schulten 等^[9]和 Diekow 等^[11]的研究结果一致,说明长期施肥下灰漠土有机碳主要集中在这两个粒级矿物颗粒上,是土壤固碳的重要组分。配施有机肥、秸秆还田及撂荒能够显著改变灰漠土中活性的砂粒有机碳的比例,而惰性有机碳的黏粉粒有机碳比例整体相对受施肥影响较小,仅配施有机肥处理显著降低该组分有机碳比例,从而导致 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值因施肥而发生显著变化,如配施有机肥处理显著提高了 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值使土壤有机碳性质得到改良^[17],而撂荒、秸秆还田及不平衡施化肥处理的 $W_{\text{POC}}/W_{\text{MOC}}$ 值并无显著变化,说明灰漠土中以砂粒有机碳的损耗为主,有机物输入土壤后先进入砂粒有机碳组分,然后在矿化和腐殖化过程中转移进入其他矿物颗粒中^[26-27]。

参考文献

- [1] Rasool R, Kukal SS, Hira GS. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system. *Soil and Tillage Research*, 2008, **101**: 31-36
- [2] Manna MC, Swarup A, Wanjari RH, et al. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, **94**: 397-409
- [3] Rudrappa L, Purakayastha TJ, Singh D, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid subtropical India. *Soil and Tillage Research*, 2006, **88**: 180-192
- [4] Triberti L, Nistri A, Giordani G, et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? *European Journal of Agronomy*, 2008, **29**: 13-20
- [5] Lal R. Why carbon sequestration in soils// Kimble J, ed. *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002: 21-30
- [6] Hassink J. The capacity of soil to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 1997, **191**: 77-87
- [7] Anderson DW, Sagar S, Bettany JR, 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. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**: 767-772
- [8] Wu T-Y (武天云), Schoenau JJ, Li F-M (李凤民), et al. Soil particle size fractionation with centrifugation method. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(3): 477-481 (in Chinese)
- [9] Schulten HR, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, **12**: 81-88
- [10] Cambardella CA, Elliott ET. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 777-783
- [11] Diekow J, Meilniczuk J, Knicker H, et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of subtropical Acrisol as influenced by long-term cropping systems and N fertilization. *Plant and Soil*, 2005, **268**: 319-328
- [12] Wu TY, Schoenau JJ, Li FM, et al. Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the Loess Plateau of China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, **168**: 100-107
- [13] Yuan Y-H (袁颖红), Li H-X (李辉信), Huang Q-R (黄欠如). Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2004, **24**(12): 2961-2966 (in Chinese)
- [14] Li J-T (李江涛), Zhang B (张斌), Peng X-H (彭新华). Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2004, **41**(6): 912-913 (in Chinese)
- [15] Wang J-L (王讲利), Liu H (刘骅), Gui Z (桂贞). Research of long-term fertilization experiment on gray soil in Xinjiang. II. Effect of long-term fertilization on soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报)*, 2002, **8**(suppl.): 87-91 (in Chinese)
- [16] Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [17] Tong X-G (佟小刚), Xu M-G (徐明岗), Zhang W-J (张文菊), et al. 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. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008 , **41** (11) : 3664–3671 (in Chinese)
- [18] Hassink J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal* , 1995 , **59** : 1631–1635
- [19] Yu J-G (于建光) , Li H-X (李辉信) , Hu F (胡锋) , *et al.* Effects of straw application and earthworm inoculation on soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon. *Ecology and Environment* (生态环境) , 2006 , **15** (3) : 606–610 (in Chinese)
- [20] Chan KY , Heenan DP , Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil and Tillage Research* , 2002 , **63** : 133–139
- [21] Christensen BT. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science* , 2001 , **52** : 345–353
- [22] Mrabeta R , Saber N , Elbrahli 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. *Soil and Tillage Research* , 2001 , **57** : 225–235
- [23] Leinweber P , Reuter G. The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biology and Fertility of Soils* , 1992 , **13** : 119–124
- [24] Six J , Conant RT , Paul EA , *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter : Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* , 2002 , **241** : 155–176
- [25] Aoyama M , Angers DA , N 'Dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Canadian Journal of Soil Science* , 1999 , **79** : 295–302
- [26] Amelung W , Zech W , Zhang X , *et al.* Carbon , nitrogen , sulfur pools in particle-size fractions as influence by climate. *Soil Science Society of America Journal* , 1998 , **62** : 172–181
- [27] Balesdent J , Besnard E , Arrouays D , *et al.* The dynamic of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and Soil* , 1998 , **201** : 45–57

作者简介 刘 骅 ,女 ,1961 年生 ,副研究员。主要从事土壤肥力研究 ,发表论文 19 篇。E-mail : liuhualh@sohu.com

责任编辑 杨 弘
