

不同施肥措施对华北平原土壤有机碳的影响

齐中凯, 赵 诣, 黄智勇, 石小霞, 孟凡乔

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 选取河北省曲周县的长期定位试验, 于 2012 年 6 月采集不施肥(CK)、常规施化肥(CF)、低量 EM 堆肥(EML)和高量 EM 堆肥(EMH)4 种施肥处理的土壤, 结合物理分组、密度分组和粒径分组将土壤划分为大、中、小团聚体组分、颗粒有机碳组分(POM)和矿质组分, 探究 0—10, 10—20, 20—60, 60—100 cm 4 个土层中不同组分 SOC 的变化规律。结果表明: 经过 19 年的耕作, 在 0—10 cm 土层, 与 CK 处理相比, 3 个施肥处理(CF、EML、EMH)可以显著提高全土以及各个组分的 SOC 含量(33%~63%); 10 cm 以下土层, 仅 2 个有机肥处理可以提高 20%~67% 的 SOC 含量。对于 0—100 cm 土层, 与 CK 相比, EMH 处理对土壤有机碳密度的增加速率($1.17 \text{ t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)是化肥处理(CF)的 11.7 倍。0—10 cm 土层 3 个施肥处理(CF、EML、EMH)条件下, $<20 \mu\text{m}$ 矿质组分 SOC 饱和度(65%~82%)显著高于 CK 处理(64%), 10 cm 以下土层, CK、CF、EML 处理之间 SOC 饱和度($<50\%$)无显著差异, 但 EMH 处理 SOC 饱和度显著高于另 3 个处理。研究表明, 长期施肥条件下应关注 10 cm 以下土层 SOC 的变化; 对于土壤 SOC 水平较低的华北平原, 土壤固碳空间较大, 其中有机肥是较为有效的农田管理措施。

关键词: 华北平原; 土壤有机碳; 有机肥; 团聚体; 耕作层

中图分类号: S155.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0271-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.045

Impacts of Different Fertilization Measures on Soil Organic Carbon in the North China Plain

QI Zhongkai, ZHAO Yi, HUANG Zhiyong, SHI Xiaoxia, MENG Fanqiao

(College of Resources and Environmental Sciences, Beijing 100193)

Abstract: It is critically important to study the impacts of chemical and organic fertilizers on soil organic carbon (SOC), because regional carbon sequestration is influenced under long-term farming conditions. We chosed four treatments, i. e. no fertilizer (CK), conventional chemical fertilization (CF), low rate EM compost (EML) and high effective microorganisms compost (EMH) from the long-term experiment (19 a) located in Quzhou County, Hebei Province. Soil samples were taken and separated into different fractions using physical, density and particle size methods for the 0—10, 10—20, 20—60 and 60—100 cm soil layers, and the SOC contents of the whole soil and soil fractions were analyzed. The results indicated that in the 0—10 cm layer, compared with the CK, CF, EML, and EMH all significantly increased SOC content of the whole soil and all fractions by 33% to 63%. In the soil layers deeper than 10 cm, only EML and EMH treatments significantly increased SOC content of the whole soil and all fractions (by 20% to 67%). For the 0—100 cm soil layer, compared with the CK, the SOC stock increasing rate in EMH treatment ($1.17 \text{ t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) was 11.7 folds of that in CF treatment. In the 0—10 cm layer, SOC saturation of the $<20 \mu\text{m}$ mineral fraction for CF, EML and EMH treatments (65% to 82%) was significantly higher than that of the CK (64%). In the soil layer deeper than 10 cm, there was no significant difference in SOC saturation among the CK, CF and EML treatment, but EMH treatment had a significantly higher SOC saturation than the other three treatments. We concluded that under long-term fertilization conditions, SOC in soil layers depper than 10 cm should be given more consideration than before. For the North China Plain where has a low level of SOC, there is still much space to improve soil carbon level, and organic fertilizer is one of the most effective farming practices.

收稿日期: 2016-07-18

资助项目: 国家“948”重点项目(2011-G30); 国家科技支撑项目(2012BAD14B01); 国家自然科学基金项目(31261140367, 31370527)

第一作者: 齐中凯(1992—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: chxqzk@163.com

通信作者: 孟凡乔(1969—), 男, 山东临沂人, 副教授, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: mengfq@cau.edu.cn

Keywords: North China Plain; soil organic carbon; organic fertilizer; aggregate fractions; deeper soil

土壤有机碳(SOC)是土壤的重要组成部分,也是土壤肥力的重要指标之一,与土壤物理、化学、生物等诸多属性都存在直接或间接的关系^[1]。土壤有机碳是异质系统,不同形态或组分的有机碳对不同农田管理措施有不同的响应特征,因此仅凭有机碳总量变化难以全面评估农田管理措施的效应^[2-3]。除了气候等自然因素外,人类活动特别是农田管理措施,能加剧、减缓或补偿自然因素对于土壤有机碳的影响,且通过最小形态/组分的土壤有机碳而实现^[4],因此针对有机碳的分组研究显得尤为重要。Hassink 等^[5]研究表明,与<20 μm 矿质组分结合的碳与土壤质地呈一定的正相关关系,并基于此提出粉粒粘粒结合有机碳的保护能力,用碳负荷来评价<20 μm 矿质组分的有机碳负载能力和容量。

物理保护对土壤固碳和肥力有重要作用^[6-7],对短期农业措施比较敏感^[8]。物理分组利用土壤组成物的颗粒大小或密度差异将其分离,在尽量不破坏土壤有机质结构的前提下进行,分离的有机质组分能够反映原状有机质的结构和功能^[9-10]。该方法基于的假设是:有机质的功能和动态性取决于有机质和矿物的结合体(初级和次级有机矿质颗粒)及其三维结构^[9]。物理分组方法由于破坏性小而成为当前研究土壤有机碳组分的重要手段,目前常用的方法包括团聚体分组、密度分组和粒径分组^[9]。李海波等^[11]利用土壤团聚体粒径分组的方法,得出长期植被恢复和增施有机肥不仅可提高土壤碳库储量,并增强了土壤结构稳定性的结论;李鉴霖等^[12]采用密度分组技术研究表明,土壤有机碳及其组分中,细颗粒有机碳可作为评估土地利用变化对土壤有机碳库影响的良好指标;佟小刚等^[13]通过粒径分组方法得到砂粒、粗粉粒、细粉粒、粗黏粒及细黏粒,观测了不同颗粒有机碳含量和分布的状况,并且针对不同地区、不同处理土壤物理分组方法的应用越来越广泛^[14-15],对于土壤有机碳的影响机理进一步丰富和完善。但这些研究大多使用团聚体、密度和粒径分组的一种或两种方法,未能充分发挥不同分组方法联合使用的优势。华北平原是我国重要的粮食产区。随着农业产量的提高和农业产业结构的调整,化肥使用量持续增加,但有机肥使用量不断减少,对土壤结构、有机碳等质量指标有较大影响,进而影响粮食产量和土地生产的可持续性。尽管研究表明施用化肥也可以提升土壤有机碳^[16],但在华北平原,关于长期条件下化肥和有机肥对于土壤有机碳的影响还缺乏系统研究,特别是在微观组分土壤有机碳的影响过程缺乏了解^[17]。本研究

选择长期定位试验,通过对不同施肥措施下的土壤进行取样、分析,研究不同组分土壤有机碳的响应机制,探讨以粒径结合密度的物理分组方法在研究土壤有机碳固持机制的实用性,以期为华北平原农田土壤固碳和生产力改善提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点在中国农业大学曲周实验站(36°52'N, 115°01'E),位于河北省邯郸市东北部曲周县境内,处于华北平原、黄淮海平原中部黑龙港上游。海拔高度约 40 m,属于华北暖温带半湿润大陆性季风气候,光、水、热资源丰富。年平均日照时间 2 332 h;年平均降水量 556 mm,降水主要集中在 7—9 月份,其降水量占全年降水量的 1/3,年平均蒸发量 1 841 mm;多年平均气温 13.2 ℃,≥10 ℃积温达 4 472 ℃,无霜期年平均 201 d,土壤为盐碱地改良后的褐土化潮土^[18]。

1.2 试验设计

本研究长期定位施肥试验开始于 1993 年 6 月,种植体系皆为冬小麦—夏玉米。土样采集时间为 2012 年 6 月 4 日,即小麦收获后。试验开始前的栽培管理为当地常规方式(翻耕深度 15 cm,小麦秸秆还田,玉米秸秆清除不还田)。原试验设置了 6 个处理,3 个重复,本研究选择其中 4 个处理,3 次重复的 12 个小区,小区大小为 10.3 m×3 m。4 个处理的施肥和管理措施分别为:(1)高量 EM 堆肥处理(EMH):每公顷每季作物施 EM 堆肥 15 000 kg;(2)低量 EM 堆肥处理(EML):每公顷每季作物施 EM 堆肥 7 500 kg;(3)当地常规施肥(CF):指每年每公顷施 1 125 kg 碳铵,600 kg 尿素,1 125 kg 过磷酸钙;(4)对照不施肥处理(CK):不施肥,仅用 EM 稀释液浸种。所有处理的小麦秸秆还田量约为 6.74 t/(hm²·a)(干重),玉米秸秆还田量约为 10.00 t/(hm²·a)(干重)^[19]。

1.3 土壤理化性质

土壤理化性质的测定方法参照鲁如坤^[20]。农田剖面部分土壤理化性质见表 1。

表 1 农田剖面部分土壤理化性质

土层 深度/cm	砂粒/ %	粉粒/ %	粘粒/ %	土壤 质地	容重/ (g·cm ⁻³)	pH
0—20	42.0	46.4	11.60	壤土	1.42	7.47
20—40	56.5	32.9	10.60	砂壤土	1.59	7.35
40—60	61.2	29.4	9.41	砂壤土	1.46	7.45
60—80	54.3	36.0	9.70	砂壤土	1.44	7.54
80—100	53.9	36.9	9.16	砂壤土	1.44	7.64

注:土壤粒级质地根据美国制划分;土壤 pH 测定的土水比为 1:2.5。

1.4 土壤分组方法

采用的方法根据 Steffens 等^[21]和武天云等^[22]的方法改进。即先用干筛进行团聚体分组,得到大团聚体(cASC)、中团聚体(mASC)、小团聚体组分(fASC);之后针对分组后团聚体再进行密度分组和粒径分组,得到自由态颗粒有机碳组分(fPOM)、闭蓄态颗粒有机碳组分(oPOM,>20 μm)、<20 μm 闭蓄态颗粒有机碳组分(oPOMsmall,<20 μm)和砂粒(Sand)、粉粒(Silt)、粘粒(Clay)不同的矿质组分。以上所得组分均需经过称重并进行土壤有机碳分析测定,之后计算得到不同组分总库(ASC、POM、矿质颗粒)有机碳含量。

1.5 全土和组分有机碳含量的测定

全土土壤和各个组分有机碳(SOC)含量,测定方法为:取上述风干的全土土壤样品和获得的土壤组分,置于离心管中,加入 0.5 mol/L 的盐酸溶液 20 ml,置于摇床上(200 rpm)振荡 30 min 后静置过夜。第二天取上清液,并加入去离子水以 3 000 rpm 的速度离心 3 min,洗去溶液中的酸,直至上清液为中性(一般 3 次左右)为止。将样品置于 60 ℃下烘干至恒重,再研磨过 0.15 mm 筛,并于 105 ℃下烘干 2 h 后装于自封袋中即可,取 50~60 mg,用锡囊包裹,用碳氮分析仪(Flash 2000 NC Soil Analyzer)进行燃烧测定,根据酸化后土壤重量,对有机碳含量进行矫正。土壤有机碳密度计算依据公式为:

SOCS=1/10 * sum(SOC_i * BD_i * T_i) (1)

式中:SOCS 为一定深度土壤有机碳密度(t/hm²);SOC_i为第 i 层土壤有机碳含量(g/kg);BD_i为第 i 层土壤容重(g/cm³);T_i为第 i 层土壤深度(cm);n 为土层数;1/10 为单位系数。

根据 Hassink^[5]的经验公式,<20 μm 矿质组分有机碳理论负荷计算公式为:

C_potential = a + b * W<20 μm (2)

式中:C_{potential}表示<20 μm 矿质组分的有机碳理论负荷(g/kg);a 和 b 是根据对全球样品研究确定的经验常数,分别是 4.09 和 0.37;W<20 μm 表示<20 μm 的矿物组分含量(%),本研究中<20 μm 的矿物组分分别是 mSilt、fSilt、cClay 和 fClay 4 个矿物组分。

土壤有机碳饱和度 W_{potential} 计算公式为:

W_potential = C_current / C_potential * 100% (3)

式中:土壤有机碳浓度 C_{current}、C_{potential}和土壤有机碳饱和度 W_{potential}的单位分别为 g/kg 全土、g/kg 全土和%。

1.6 数据分析

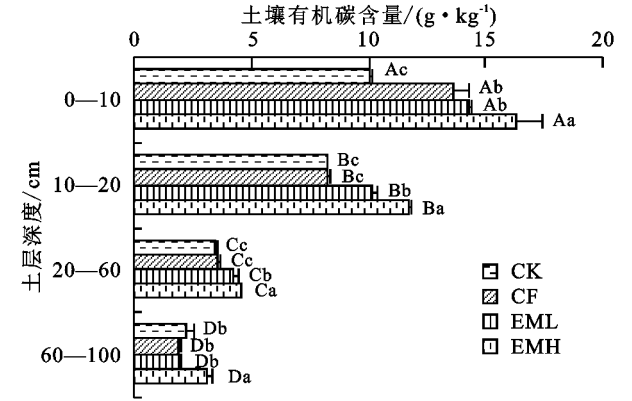
方差分析和相关性分析用 SPSS 20.0 软件计算,

处理之间的显著性差异分析均设为 p=0.05 水平,且平均值比较采用最小显著差异法(least significant difference,LSD),图表采用 Excel 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 施肥措施对土壤有机碳含量和密度的影响

长期试验条件下,与不施肥处理(CK,10.0 g/kg)相比,CF、EML、EMH 都可以显著增加 0—10 cm 全土中的的 SOC 含量,增加比例分别为 35.8%,42.8%和 62.8%(图 1)。10 cm 以下土层,与 CK 处理相比,CF 都没有体现出对 SOC 含量的显著增加,而有机肥的 2 个处理(EML 和 EMH)增加显著。与 CF 相比,2 个有机肥处理都能增加 SOC 含量,其中 EML 仅在 10—20,20—60 cm 显著,而 EMH 在整个土层对 SOC 含量的增加都达到显著水平,EMH 比 EML 也体现出显著增加 SOC 含量的规律。不同土层间,相同施肥措施条件下,所有处理均表现为 SOC 含量从表层到深层土的逐级递减,而且差异显著。



注:小写字母表示同一土壤层次下不同处理间的差异达到显著性水平(p<0.05);大写字母表示同一处理不同土层间的差异达到显著性水平(p<0.05)。下同。

图 1 施肥措施对不同深度土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳密度(SOCS)和含量表现出相同的趋势。在 0—10 cm 层,与 CK 处理相比,所有施肥处理都可以显著增加 SOCS(表 2),EMH、EML 和 CF 处理分别增加 50.8%,35.6%和 26.5%。在 0—20,0—60,0—100 cm 土层,CF 处理的增加效应未达显著性水平,但有机肥的 2 个处理都达到显著性水平,且 EMH 处理显著高于 EML 处理。对于 0—100 cm 土层,与 CK 处理相比(59.3 t/hm²),EMH 和 EML 处理的 SOCS 分别增加了 37.4%和 16.5%,与 CF 处理相比,EMH 和 EML 处理的 SOCS 分别增加 33.3%和 13.0%。与 CK 处理相比,EMH 处理对土壤有机碳密度(储量)的增加速率为 1.17 t C/(hm²·a),化肥处理(CF)的速率为 0.1 t C/(hm²·a),但 10 cm 土层以下的土壤 SOC 仅对有机肥处理有显著响应,对化肥没有相应。

表 2 施肥对剖面土壤有机碳密度的影响

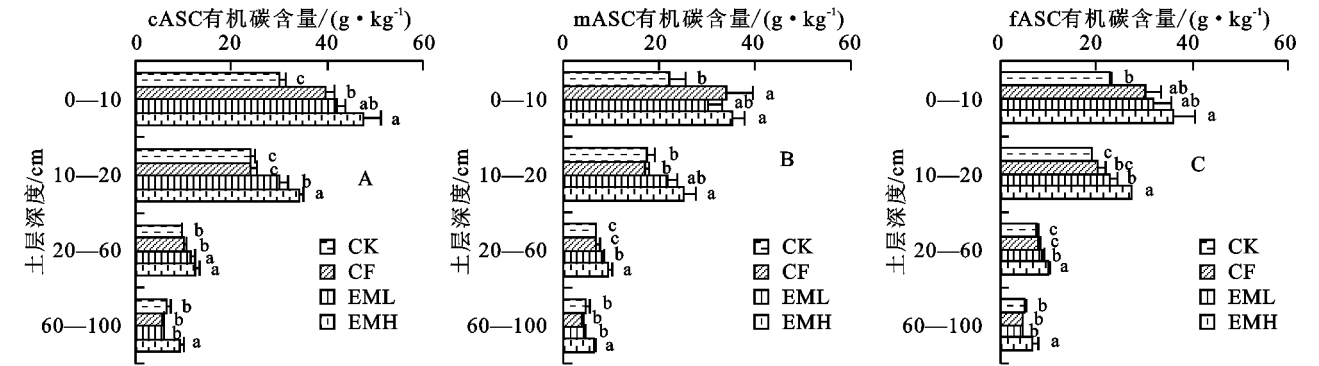
施肥措施	土壤有机碳密度/(t·hm ⁻²)			
	0—10 cm	0—20 cm	0—60 cm	0—100 cm
CK	13.2±0.9c	25.2±2.0c	46.5±2.3d	59.3±3.2c
CF	16.7±2.0b	28.4±2.7c	50.3±2.6c	61.2±1.9c
EML	17.9±0.7ab	31.9±1.4b	57.6±0.8b	69.1±0.4b
EMH	19.9±2.0a	35.4±1.3a	63.3±1.5a	81.6±2.9a

注:表中数据为平均值±标准偏差;同一列小写字母表示同一土壤层次下不同处理间的显著性差异水平($p<0.05$)。下同。

2.2 施肥措施对土壤团聚体组分有机碳含量的影响

不同施肥措施对土壤 cASC、mASC 及 fASC 团聚体组分 SOC 含量的影响基本一致,即有机肥措施下各团聚

体 SOC 含量的增加量(与 CK 相比)高于化肥处理,各团聚体中有机碳含量随土层深度的增加而降低(图 2)。0—10 cm 土层,与 CK 处理相比,施肥处理的 cASC 和 mASC 团聚体中 SOC 含量显著增加(33.4%~60.8%),但 fASC 组分仅在 EMH 处理下显著增加(59.0%);10—20 cm 土层,与 CK 处理相比,有机肥处理的 3 个团聚体组分 SOC 含量均显著增加(19.8%~43.9%);20—60 cm 土层的规律和 10—20 cm 相似;60—100 cm 土层,与其他处理相比,EMH 处理能够显著增加 3 个团聚体组分的 SOC 含量。



注:cASC为大团聚体组分;mASC为中团聚体组分;fASC为小团聚体组分。

图 2 施肥措施对剖面大团聚体(A)、中团聚体(B)和小团聚体(C)有机碳含量的影响

2.3 施肥措施对土壤颗粒有机碳含量的影响

本研究还对 cASC、mASC、fASC 团聚体组分中的颗粒(oPOM、fPOM 和 oPOM_{small}) SOC 含量进行了分析(图 3)。cASC 团聚体中的 oPOM 有机碳含量高于 fASC 和 mASC 团聚体,mASC、fASC 中 fPOM 有机碳含量高于 cASC 组分,oPOM_{small} 在 3 个团聚体中的含量在同一水平(5~20 g/kg)。

与其他措施相比较,有机肥措施,特别是 EMH 能够提高各颗粒 SOC 含量,增加幅度相近,且主要体现在 0—10,10—20 cm 两个土层。与不施肥相比,化肥对于各 SOC 含量提高仅在 0—10 cm 层次显现;颗粒 SOC 含量随土层深度的增加而降低。

2.4 施肥措施对土壤矿质组分有机碳含量的影响

土壤矿质组分的 SOC 含量呈现不同规律。砂粒组分的 SOC 含量呈现出随团聚体(ASC)粒径减小而增加的趋势,粉粒组分的 SOC 含量随团聚体粒径减小而减小,而粘粒在 3 个组分中 SOC 含量接近,所有矿质组分 SOC 含量均呈现出随土层深度增加而减少的趋势(图 4)。与不施肥相比,化肥仅在 0—10 cm 土层对各矿质组分 SOC 含量有显著增加。有机肥对各矿质组分 SOC 含量的增加比化肥更显著,且在 0—10,10—20 cm 两个层次都显现,而高量有机肥处理(EMH)在各个层次都显著增加各矿质组分 SOC 含量。

2.5 <20 μm 矿质组分的土壤有机碳负荷

不同施肥措施对土层中<20 μm 矿质组分的实际有机碳负荷和理论有机碳负荷均无显著影响(图

5)。本研究中由表层到深层,<20 μm 矿质组分的实际碳负荷依次为 6.66~8.84,4.53~5.99,1.78~2.11,0.88~1.39 g/kg;不同处理所有土层中的理论碳负荷约维持在 10.4 g/kg。

不同施肥处理对<20 μm 矿质组分 SOC 饱和度的影响达到显著水平(表 3),其中所有土层中 EMH 处理有机碳饱和度显著高于其他处理,且表现出 EMH>CF>EML>CK,各处理饱和度水平在 64.0%~82.1%。10 cm 以下土层,CK、CF、EML 处理之间有机碳饱和度均未达到显著水平,随土层深度的增加,所有处理有机碳饱和度呈现减小趋势。

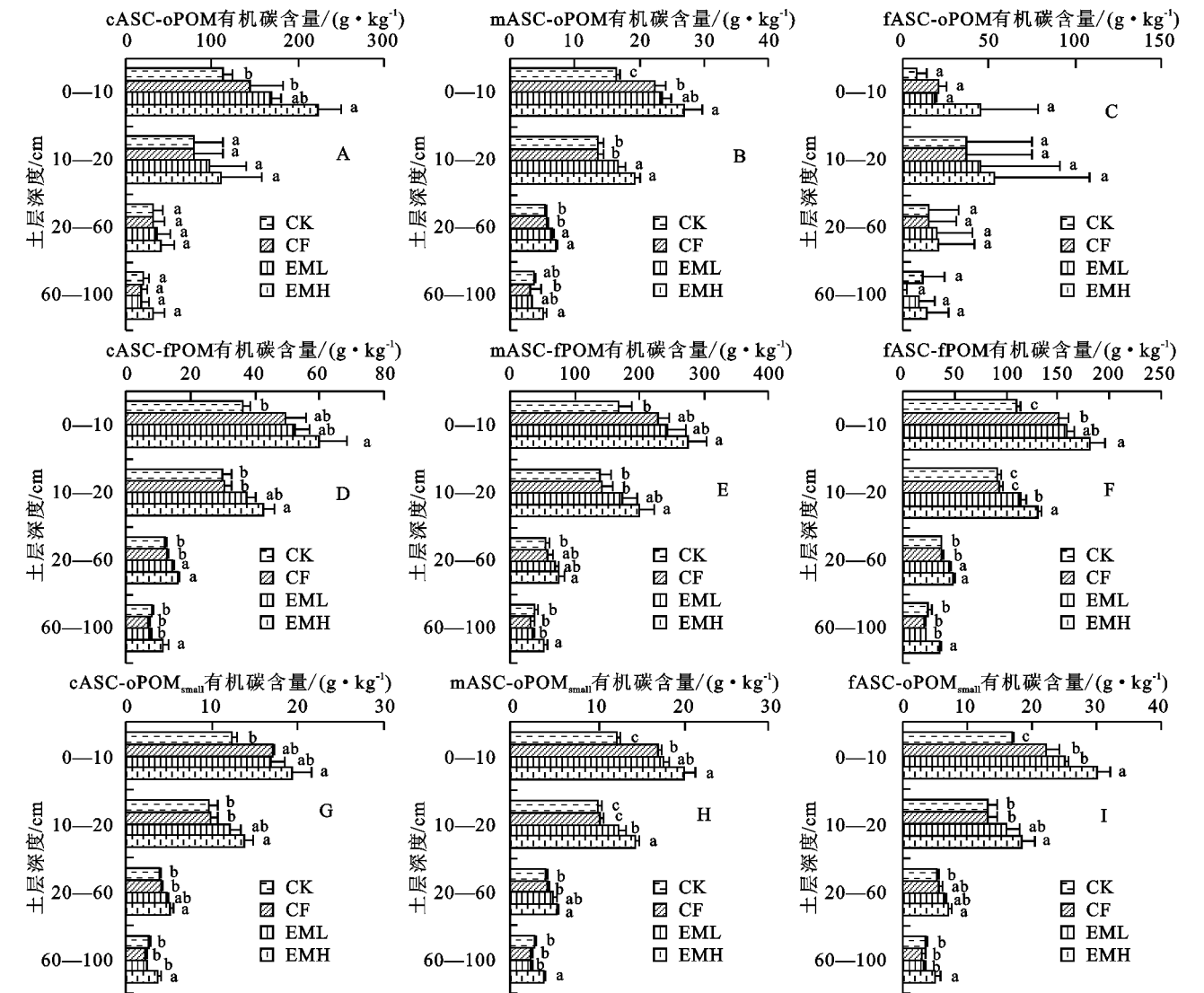
3 讨论

3.1 施肥措施对土壤有机碳的影响

施肥措施对 SOC 的影响主要包括对作物地下部生物量、根分泌物、微生物活性以及有机物质如有机肥的直接输入等^[23]。本研究中,经过 19 年的长期定位试验,所有施肥处理都会显著增加表层(0—10 cm)中有机碳含量,高量有机肥处理(EMH)在 0—100 cm 对 SOC 的增加都达到显著水平,但化肥处理仅表现在 0—10 cm 土层,这说明长期耕作条件下,施肥特别是施加有机肥对于土壤 SOC 的影响可以到达较深层次土壤,研究中应特别予以关注。其他研究中也得到类似现象,如姜学兵等^[24]研究表明施用有机肥对深层 SOC 的积累有促进作用;李平儒^[25]研究表明连续施用化肥处理较不施肥处理显著增加表层土壤(0—10 cm)SOC 的含量,但是 30—60 cm 土层 SOC 含量明显降

低;有机肥与化肥配施对 SOC 的影响深度更大。本研究认为,有机肥之所以能够增加深层土壤 SOC,除了促进根系在深层土壤的生长外,由于灌溉和降雨造成的有机质淋溶也是可能的原因^[26]。相比化肥,有机肥对 SOC 增加效

果更好的原因,在于发酵好的 EM 有机肥自身就是腐殖化程度较高的有机质,使用后直接增加土壤 SOC^[27],另外有机肥含有丰富的微生物种群,为有机碳的固持提供了团聚体形成必需胶结剂的微生物来源^[28-29]。



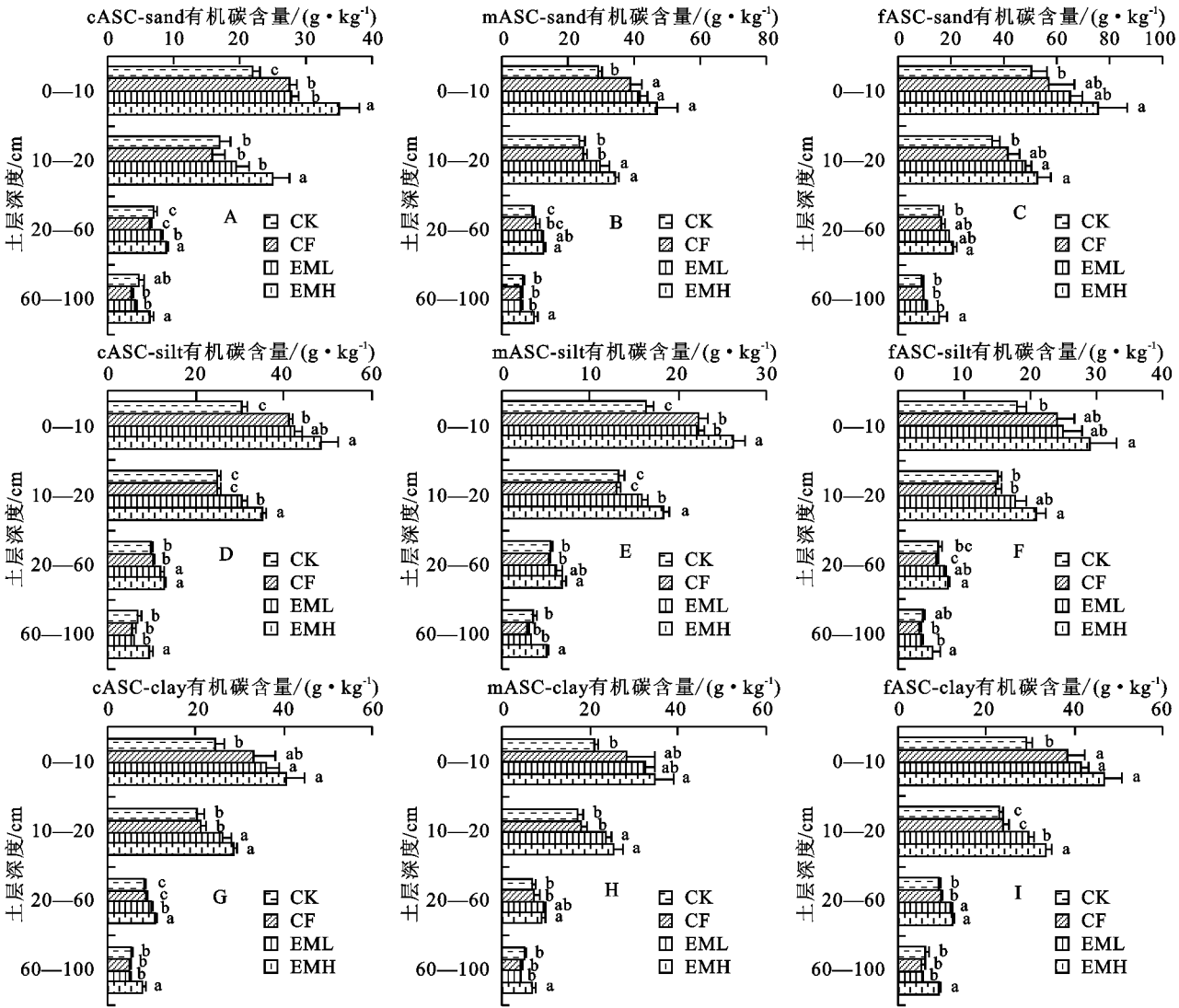
注:fPOM 为自由态颗粒有机质;oPOM 为闭蓄态颗粒有机质;oPOM_{small} 为<20 μm 闭蓄态颗粒有机质。A、B、C 分别为 cASC、mASC、fASC 中 oPOM 组分;D、E、F 分别为 cASC、mASC、fASC 中 fPOM 组分;G、H、I 分别为 cASC、mASC、fASC 中 oPOM_{small} 组分。

图 3 施肥措施对不同团聚体中 fPOM、oPOM 和 oPOM_{small} 有机碳含量的影响

3.2 施肥措施对剖面土壤团聚体和颗粒组分有机碳的影响

本研究中,不同团聚体组分有机碳含量主要表现出 cASC>mASC≈fASC,这可能与团聚体形成机制有关:Six 等^[6-7]提出模型认为,大团聚体内形成的微团聚体固定了细颗粒有机质,而稳定的微团聚体被释放后又会建立新的大团聚体,即大团聚体包含了 SOC 含量较高的小团聚体,因而大团聚体的 SOC 含量较高。另外,随着团聚体粒级的降低有机碳降解程度及腐殖化程度提高,而且 C/N 比会随着团聚体粒级的降低而降低,小团聚体有机质比大团聚体降解程度更大^[11]。土壤颗粒有机碳库的大小是由碳投入和不同碳成分的分解率共同决定的,受土壤的湿度、温度、生物抗性和氮的利用情况等微生物活性相关因素影响,也会受饱和行为的影响^[6-7]。

研究中,cASC 团聚体中的 oPOM 有机碳含量高于 fASC 和 mASC 团聚体中 oPOM 有机碳含量,可能是由于 oPOM 受物理保护,再加上大团聚体内形成的微团聚体固定了细颗粒有机质,而稳定的微团聚体被释放后又会建立新的大团聚体^[6-7],从而促进了 cASC 中 oPOM 有机碳的累积。fPOM 主要是颗粒较大的没有分解或半分解的动植物和根系残体,且 fPOM 为非保护态颗粒有机碳容易受到人为(耕作、施肥等)因素的影响^[6-7],而 mASC、fASC 团聚体粒径小于 cASC 因此受人为因素的影响要小于 cASC 团聚体。



注：A、B、C 分别为 cASC、mASC、fASC 中 sand 组分；D、E、F 分别为 cASC、mASC、fASC 中 silt 组分；G、H、I 分别为 cASC、mASC、fASC 中 clay 组分。

图 4 施肥措施对团聚体中砂粒、粉粒和粘粒矿质有机碳的影响

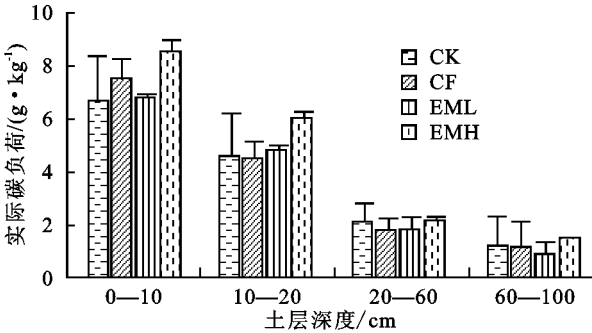


图 5 施肥措施对 <20 μm 矿质组分有机碳负荷的影响

不同粒径颗粒由于其表面化学性质不同,其结合 SOC 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。砂粒的 SOC 并没有与砂粒相结合,主要是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡的有机碳,对于农业管理措施十分敏感^[30],同时团聚体随粒径减小而对农业管理措施的响应减小,这可能是砂粒有机碳在团聚体组分中含量呈现出随团聚体粒径减小而增加的原因。粉

粒的有机碳含量随团聚体粒径减小而减小,而粘粒在 3 个组分中 SOC 含量接近。

表 3 施肥措施对 <20 μm 矿质组分土壤有机碳饱和度的影响

处理	0—10 cm	10—20 cm	20—60 cm	60—100 cm
CK	64.0±6.0c	44.2±3.7b	20.3±0.3ab	12.2±2.2ab
CF	71.7±3.1b	43.5±1.4b	17.1±0.7b	11.0±1.4b
EML	64.9±1.8b	46.4±0.5b	17.3±2.7ab	8.5±0.5b
EMH	82.1±1.5a	57.5±3.7a	20.4±1.6a	13.4±0.4a

此外,对于图 3,图 4 和图 5 的分析表明,整体上施肥措施对于不同团聚体、不同颗粒和不同矿物组分的 SOC 含量呈现出相似的规律,即不同组分之间并没有显现出不同的 SOC 增加速率。这意味本研究所采用的土壤干筛(筛孔径为 2 000,630 μm)的物理分组方法,并没有把不同结合形态或着化学形态的有机质分离开。原因可能是:(1)干筛方法是土壤风干后,进行大小土壤颗粒分离,这个过程对于较小形态比如 <53 μm 或 <2 μm 的组分造成了混合,而这两

者恰恰是土壤有机质的基本组分构成单元;(2)干筛后的分离过程采用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜,再次把 $53\ \mu\text{m}$ 或 $2\ \mu\text{m}$ 大小范围的有机质组分混合,即筛孔径选择不太合适,造成 $<53\ \mu\text{m}$ 或 $<2\ \mu\text{m}$ 的组分造成了混合,继而影响组分有机质含量。因此,土壤有机质研究中,粒径分离法的关键是滤膜或筛子的孔径,太大或者太小都不利于不同形态有机质组分的有效分离。

3.3 $<20\ \mu\text{m}$ 矿质组分的土壤有机碳负荷

农业土壤 SOC 的实际负荷取决于气候等自然条件和农业管理活动,而理论碳负荷的确定主要取决于土壤质地。本研究中不同施肥处理对土层中 $<20\ \mu\text{m}$ 矿质组分的实际负荷无显著影响,即不同施肥措施对 SOC 的显著影响还没有到 $<20\ \mu\text{m}$ 矿质颗粒层次。尽管如此,施肥措施对于 $<20\ \mu\text{m}$ 矿质组分土壤有机碳饱和度的影响达到了显著水平,所有土层中 EMH 处理的有机碳饱和度显著高于其他处理,并且 $0-10\ \text{cm}$ 土层中有机碳饱和度表现出 $\text{EMH} > \text{CF} > \text{EML} > \text{CK}$ 。这意味着对于土壤有机碳水平较低的华北平原($0-20\ \text{cm}$ 土层土壤有机质普遍 $<20\ \text{g/kg}$)^[31],土壤固碳空间还较大,其中有机肥是较为有效的农田管理措施。

4 结论

(1)长期田间试验条件下,与不施肥相比,施肥处理可以显著增加 $0-10\ \text{cm}$ 土层的 SOC 含量, $10\ \text{cm}$ 土层以下仅有高量有机肥措施可以显著提高 SOC。说明化肥使用对于土壤 SOC 的增加仅在表层土壤体现,施用有机肥可以显著增加深层($100\ \text{cm}$)土壤的 SOC 水平。对于各个土壤组分 SOC 含量的增加也呈现出同样的层次规律。

(2) $0-10\ \text{cm}$ 土层,施肥处理 $<20\ \mu\text{m}$ 矿质组分 SOC 饱和度显著高于不施肥处理,在 $10\ \text{cm}$ 以下土层,高量有机肥处理 SOC 饱和度显著高于其他农田个处理。对于土壤有机碳水平较低的华北农田,土壤固碳空间还较大,其中有机肥是较为有效的农田管理措施。

参考文献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Samuel A, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [2] Pinheiro E F M, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 79-84.
- [3] Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe[J]. *Geoderma*, 2013, 192(1): 189-201.
- [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(6): 42-51.

- [5] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [6] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [7] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [8] 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.
- [9] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2011, 34(4): 82-87.
- [11] 李海波, 韩晓增, 尤孟阳. 不同土地利用与施肥管理下黑土团聚体颗粒有机碳分配变化[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 184-189.
- [12] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [13] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 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.
- [14] 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.
- [15] 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): 869-876.
- [16] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, 2010(6): 38-42.
- [17] Minasny B, Sulaeman Y, Mcbratney A B. Is soil carbon disappearing? The dynamics of soil organic carbon in Java[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1917-1924.
- [18] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1733-1739.
- [19] 白运兵, 徐相云, 宋荷芬. 曲周县农作物秸秆综合利用情况分析[J]. *河北农业科学*, 2012, 16(11): 79-80.
- [20] 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.
- [21] Steffens M, Kölbl A, Schörk E, et al. Distribution of soil organic matter between fractions and aggregate size classes in grazed semiarid steppe soil profiles[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1): 63-81.