

无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响

刘振东¹, 李贵春², 周颖¹, 杨晓梅¹, 尹昌斌^{1*}, 南云不二男³

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 3.日本国际农林水产业研究中心)

摘要:为研究无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布、稳定性及对土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)保护性机制的影响,于2012年采自河北省徐水县试验站冬小麦-夏玉米定位试验田进行了试验。设置1个空白对照CK,1个单施化肥处理N10,4个粪肥与化肥配施处理M1N9、M2N8、M3N7、M5N5,采集0~20 cm耕层土样,测定土样团聚体稳定性和SOC含量。结果表明:单施化肥不能明显提升土壤中SOC含量;配施粪肥能显著地提高 $R_{0.25}$ 和大团聚体中OC(Organic carbon)的含量。M3N7处理能显著提高团聚体平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)和各级团聚体中OC的含量。M2N8、M3N7、M5N5处理中SOC主要分布在2~0.25 mm的大团聚体上,CK处理中SOC主要分布在微团聚体上,大团聚体含量较低,说明微团聚体比大团聚体形成的早,稳定性高于大团聚体,验证了微团聚体通过胶结作用形成大团聚体的层次性机制。该褐土的团聚体-SOC相互作用说明大团聚体的层次性形成和稳定性对SOC的保护具有关键作用。

关键词:褐土;团聚体稳定性;平均重量直径;几何平均直径;有机碳

中图分类号:S143.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)11-2239-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.11.019

The Effect of Fertilizer Management Practices on Distribution of Aggregates and SOC

LIU Zhen-dong¹, LI Gui-chun², ZHOU Ying¹, YANG Xiao-mei¹, YIN Chang-bin^{1*}, Fujio Nagumo³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 3. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, JIRCAS, Japan)

Abstract: The research is about influences of aggregate size distribution and stability and soil organic carbon protective mechanism in cinnamon soil in organic and chemical fertilizer management practices. Soil samples, which were collected from Xushui station long-term positioning experiment field in Hebei Province, includes 6 treatments: chemical fertilizer (N10), four fertilizer management practices which combined chemical fertilizer with manure, CK. The aggregate size classes were got by dry sieving methods. The results indicated that N10 didn't significantly increase the capacity of organic carbon in soil, Organic fertilizer could significantly improve the $R_{0.25}$ and organic carbon content in large-aggregate. The treat of M3N7 can significantly improve MWD, GMD and organic carbon content in all levels of aggregates, showing the significance of organic fertilizer on forming and maintaining soil aggregates. Organic carbon are mainly distributed in the 2~0.25 mm aggregate size classes and organic carbon content in CK treatment of micro-aggregate is highest. That the formation and stability of micro-aggregate is earlier than large-aggregate, verified the mechanism of large-aggregate forming from micro-aggregate through the cementation. The cinnamon soil aggregate-organic carbon interaction is the key factor that the large-aggregate stability and forming with stratification mechanism, which protect the organic carbon.

Keywords: cinnamon soil; aggregate stability; MWD; GMD; organic carbon

收稿日期:2013-03-27

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903011-B);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610122012004)

作者简介:刘振东,男,硕士,研究方向为农业生态学。E-mail: lzhd1006@163.com

*通信作者:尹昌斌

土壤有机质是陆地 C 库的主要组成部分,其微小的变化都会对生化 C 循环和温室效应产生深远的影响^[1]。土壤有机质含量又是衡量土壤肥力的重要标准,所以控制影响土壤稳定性的因子,保持土壤稳定性从而保证有机质的稳定尤为重要。土壤团聚体是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境^[2],不同粒级团聚体中 C、N 等养分的保持和供应机制^[3],决定了土壤有机质含量,影响土壤的肥力结构^[4]。影响土壤稳定性的机制包括有机质的难降解性、土壤内在的化学稳定性、土壤团聚体的物理稳定性、土壤生物的稳定机制^[5-6]等。土壤团聚体对于土壤水分和溶质的渗透,土壤侵蚀、压实和结块的抵抗作用,形成了对有机质的物理性保护作用^[7]。土壤有机质与团聚体间具有紧密的作用关系^[8],有机质粘合主要的矿物颗粒形成团聚体,稳定的团聚体又可以对其他可矿化有机质进行有效保护。土壤团聚体稳定性受到土壤有机碳含量、耕作方式、施肥等的影响,而团聚体稳定性关系到土壤质量及农业种植的可持续性^[9]。团聚体 $R_{0.25}$ 、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。大量研究表明,MWD 和 GMD 能更好地反映土壤团聚体稳定性特征,MWD 和 GMD 值越大表示团聚体平均直径团聚度越高,稳定性越强^[10]。

目前,国内外对于团聚体的形成机制、稳定性因子、肥力结构等研究已取得一定进展^[1,3,7-8],但对粪肥无机肥配施对华北褐土土壤团聚体分布及 SOC 在各级团聚体中分布规律的定量化,有待进一步深入研究。本文从粪肥无机肥配施的不同处理入手,通过对褐土团聚体的分布、不同粒级团聚体中 SOC 的变化进行研究,从而进一步了解了华北褐土有机碳的物理稳定性机制和团聚体物理稳定性的特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和试验处理

试验地位于河北省徐水县留村乡荆塘铺村农业部行业科研专项试验站(37.8°N 114.7°E,海拔 50.1 m),该地属暖温带半湿润半干旱季风气候,年平均太阳辐射总量为 546.5 kJ·cm⁻²,年平均气温 12.2 °C,无

霜期 200 d 左右,全年平均降水量 536.8 mm。土壤为潮褐土,质地为轻壤土。供试土壤耕层容重 1.27 g·cm⁻³,pH 值 7.8,供试小麦为当地品种保麦 9 号。无机肥选用撒可富复合肥(N:P:K=22:8:10)和尿素(中化,46.7%),有机肥采用试验田附近的韦氏奶牛养殖基地的牛粪沤制,其含氮量为 22.8 g·kg⁻¹,含水量为 60.4%。

试验始于 2009 年 6 月,以冬小麦/玉米轮作为耕作制度。各小区长 5 m、宽 4 m、面积 20 m²,随机进行排列。小区间用塑料布隔开,地下 80 cm,地上 20 cm,试验开始前供试土壤具体性状如表 1 所示。试验设置 6 个处理,3 次重复,共计 18 个试验小区。施用化肥中的氮素用 N 表示,粪肥中的氮素用 M 表示,各处理中设定总氮量为 10 个单位(1 单位总氮量=33.3 kgN·hm⁻²),单施化肥处理用 N10 表示,不施肥的空白处理表示为 CK,粪肥与化肥配施处理分别表示为 M1N9、M2N8、M3N7、M5N5。春季小麦返青追施尿素量 300 kgN·hm⁻²,其他管理措施按当地习惯进行。

1.2 土样采集

2012 年 6 月冬小麦收获后对样地进行五点采样,采集耕层 0~20 cm 原状土样,在采集和运输过程中尽量避免对土样的扰动,以免破坏土壤团聚体。实验室自然风干,剔除植物残体和石块,过 8 mm 筛后装入密封袋中备用。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤团聚体分离

土壤团聚体的分离采用干筛法:取 100 g 风干土样置于套筛(孔径依次为 8、2、0.5、0.25 mm)顶部,以大约 30 次·min⁻¹的频率,手工上下左右振荡 5 min,将土样分离成 >2 mm、2~0.5 mm、0.5~0.25 mm、<0.25 mm 4 个粒级。制得样品在 50 °C 下烘干 24 h 称重^[11]。

1.3.2 土壤团聚体稳定性评价指标

团聚体的稳定性用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)^[11-12]来描述,分别按下列各式计算。

$$MWD = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} m_i \quad (1)$$

式中: r_i 是第 i 个筛子的孔径,mm; $r_0=r_i$, $r_n=r_{n+1}$, n 为筛子

表 1 供试褐土表层(0~20 cm)土壤基本性状

Table 1 The basic properties of cinnamon soil in top soil(0~20 cm)

SOC/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	硝氮/mg·kg ⁻¹	铵氮/mg·kg ⁻¹	全 P/g·kg ⁻¹	有效 P/mg·kg ⁻¹	全 K/g·kg ⁻¹	有效 K/mg·kg ⁻¹
17.10	1.01	24.16	2.21	0.83	7.29	18.11	110.97

的数量; m_i 是第*i*个筛子上颗粒重量的百分比。

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum w_i \ln X_i}{\sum w_i}\right) \quad (2)$$

式中: w_i 为土壤不同粒级团聚体的重量,g; $\ln X_i$ 为土壤粒级平均直径的自然对数。

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{T<0.25}}{M_T} \quad (3)$$

式中: M_T 为团聚体总质量。

1.3.3 SOC、N的测定

土壤原土及各粒级团聚体烘干称重后磨细过0.15 mm筛,进行C、N的测定。SOC用 $H_2SO_4-K_2CrO_7$ 外加热法测定,全氮用凯氏定氮法测定^[13]。

1.4 统计分析

数据采用SPSS 17.0软件进行方差分析和相关性分析,多重比较采用Duncan检验,并用不同字母表现显著性差异,差异水平 $P<0.05$ 。

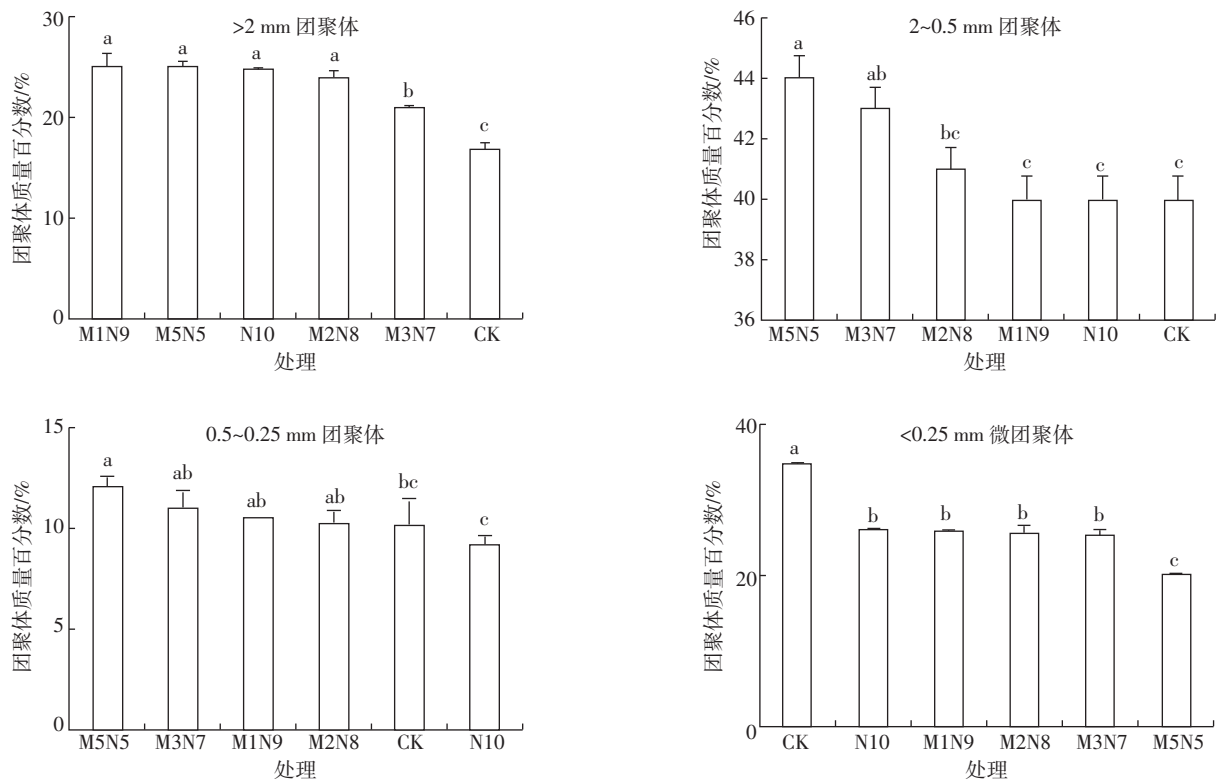
2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对大小团聚体分布的影响

不同施肥处理对华北褐土团聚体分布具有显著影响(图1)。总体上,2~0.5 mm的大土壤团聚体分布

是最多的,所占比率达39.1%~42.7%。与未施肥的CK相比,所有施肥处理在>2 mm和2~0.5 mm大团聚体上都有增加趋势;在0.5~0.25 mm粒级上,N10处理出现了下降趋势,但并未与CK产生显著性差异;在<0.25 mm微团聚体粒级上,施肥导致了该粒级分布的降低,M5N5、M3N7处理显著低于空白对照67.0%、33.1%。

在>2 mm土壤团聚体粒级上,高粪肥配施处理M5N5团聚体含量高于化肥处理N10,与CK形成显著性差异,与其他配施处理未达到显著性差异;在2~0.5 mm粒级上,高粪肥配施处理M5N5团聚体含量与低粪肥配施处理M2N8、M1N9及化肥处理N10相比显著性升高,升高比例依次为5.3%、7.5%、12.5%,呈现了随粪肥配施量增加土壤团聚体含量增加的趋势;在0.5~0.25 mm粒级团聚体中,土壤团聚体含量仍然随粪肥配施量增加而升高,但增加趋势有所减弱,未出现显著性差异;在<0.25 mm微团聚体粒级上,随粪肥配施量的增加,微团聚体含量下降,差异达显著性水平,其他施肥处理与粪肥配施量最高的M5N5处理亦达到显著性差异。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图1 不同施肥处理对表层土壤(0~20 cm)团聚体分布的影响

Figure 1 The influence of fertilizer management practices on the distribution of aggregate size classes(fractions) in top soil(0~20 cm)

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

如表 2 所示, 土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均是随粪肥配施量的减少而逐渐降低的。土壤团聚体 MWD 显示, 配施粪肥处理 M5N5、M3N7、M2N8 处理与 CK 存在显著性差异, 低量配施粪肥处理 M1N9 和化肥处理 N10 未与 CK 产生显著性差异, 高量配施粪肥处理 M5N5 与化肥处理 N10 存在显著性差异, 其他粪肥处理 M3N7、M2N8、M1N9 与 N10 未出现显著性差异。土壤团聚体 GMD 显示, 各粪肥处理随施用量减少, GMD 值不断降低, 但降低水平未达显著性。配施粪肥处理 M5N5、M3N7 与 CK 处理产生显著性差异, 配施粪肥处理 M5N5、M3N7 与化肥处理 N10 出现明显升高趋势, 增长分别达到 20.2%、17.1% ($P < 0.05$), 但 M2N8、M1N9 配施处理与化肥处理 N10 未产生显著性差异, 化肥处理 N10 和 CK 比较仅升高 5.0%, 未出现显著性差异。

表 2 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

Table 2 The influences of fertilizer management practices on stability of aggregate size classes

处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}$ /mm
M5N5	0.88±0.07a	1.21±0.57a	0.80±0.01a
M3N7	0.86±0.06ab	1.19±0.56a	0.75±0.01ab
M2N8	0.85±0.08ab	1.09±0.55ab	0.74±0.02b
M1N9	0.85±0.04abc	1.08±0.57ab	0.74±0.04b
N10	0.82±0.03bc	1.01±0.56b	0.74±0.03b
CK	0.80±0.04c	0.96±0.54b	0.65±0.01c

注: 同一列中的不同字母代表各处理在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。

Note: Different letters in the same column mean significantly different at $P < 0.05$ level.

粪肥的施用能有效促进土壤团聚体的形成, 并且当施用量达到 M5N5 的峰值时, 土壤团聚体就会产生显著性的变化。土壤团聚体 $R_{0.25}$ 显示, 随粪肥配施量的减少 $R_{0.25}$ 值在逐渐降低, 高量配施粪肥处理 M5N5、M3N7 分别显著高于 CK 处理 23.2%、15.1%, 低量配施粪肥处理 M2N8、M1N9 显著高于 CK 处理 14.3%。高量配施粪肥处理 M5N5 与化肥处理 N10 比较出现增长, 增幅达 8.2% 的显著性水平, 其他粪肥处理未与化肥处理产生显著性差异, 化肥处理 N10 与 CK 处理出现 14.4% 的显著性差异。化肥的施用同样有助于土壤大团聚体的形成, 但随粪肥配施量的增加, 土壤的大团聚体含量比例在显著地增加, 当粪肥配施量达到 M5N5 的峰值时, 就会与化肥处理 N10 产生显著性差异, 从而比单施化肥更有助于土壤大团聚体的形成。

2.3 不同施肥处理对土壤总 SOC 含量的影响

与空白 CK 对照比较, 随粪肥配施量的增加, 土壤中 SOC 含量呈现增长趋势, 当配施量达到 M5N5 处理时, 出现显著性差异。M5N5 处理与单施化肥处理 N10 比较, 增加了 28.4%, 达到显著性水平。M3N7、M2N8、M1N9 处理 SOC 含量基本保持在同一水平, 未出现统计学意义的显著性; 化肥处理 N10 的 SOC 含量有一定增加, 但趋势不明显(图 2)。

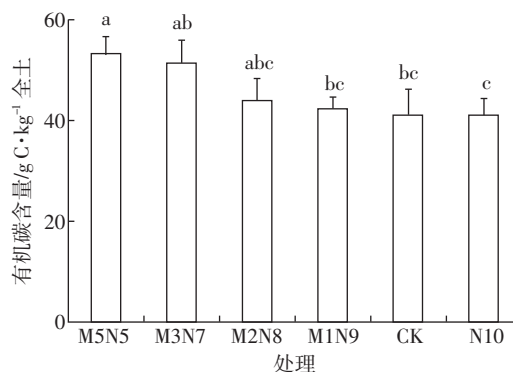


图 2 不同施肥处理对土壤 SOC 的影响

Figure 2 The influences of fertilizer management practices on soil organic carbon

2.4 施肥对不同大小团聚体上 OC 含量及分配的影响

2.4.1 不同大小团聚体上 OC 的含量

同一处理的不同粒径间比较, 各处理均是 < 0.25 mm 微团聚体粒级 OC 含量最低。配施粪肥各处理与 CK、化肥处理 N10 比较, 都明显提高了大团聚体上 OC 的含量, M5N5、M3N7 差异达显著水平, 但并未显著提高微团聚体 OC 含量。大团聚体与微团聚体比较, 随着粪肥配施量的增加 OC 含量在逐渐升高, 并且在 M3N7 粪肥配施量时, 2~0.5 mm 粒级 OC 含量高 < 0.25 mm 微团聚体达到 23.2% (图 3)。大团聚体中 OC 含量在 M5N5、M3N7、M2N8 粪肥配施量时 2~0.5 mm 粒级最高, 在 M1N9 粪肥配施量时出现下降, 完全施用化肥的 N10 处理 OC 含量显著降低。

2.4.2 OC 在不同大小团聚体上的分配

将团聚体 OC 含量分别乘以团聚体占土壤的百分含量获得团聚体占原土 OC 的含量, 从而可以获得原土中 OC 在各团聚体上的分配或各团聚体对原土 SOC 的贡献(图 4)。总体上来看, SOC 主要分布在 2~0.25 mm 粒级的大团聚体上, 微团聚体及黏砂粒中 SOC 含量较低。配施粪肥处理与 CK 比较, 随粪肥配施量的增加, 各粒级团聚体中 SOC 含量都在明显增加, 当粪肥量到 M3N7、M5N5 的用量时, 所有粒级

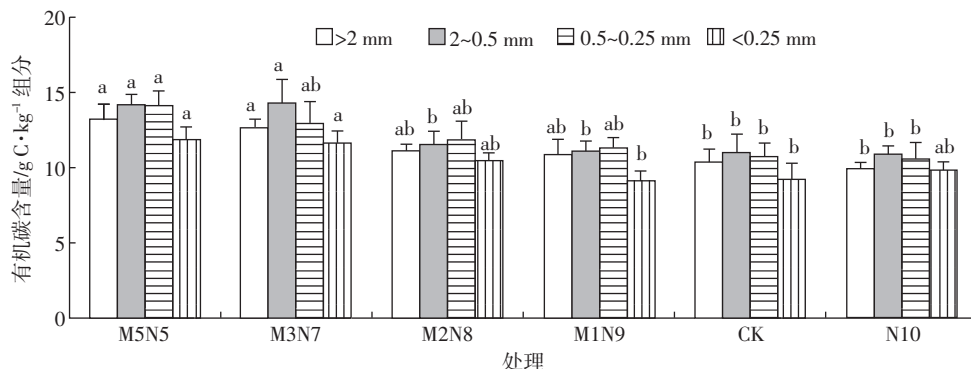


图3 不同施肥处理对团聚体 OC 含量的影响

Figure 3 The influences of fertilizer management on organic carbon concentrations in aggregate size classes

SOC 含量都出现了显著性的差异。在 >2 mm 和 $2\sim0.5$ mm 粒级上, M5N5、M3N7 处理 OC 含量较 N10 均出现显著性增高, 在 $0.5\sim0.25$ mm 粒级上则出现显著性差异, M2N8、M1N9 粪肥配施处理在大团聚体上, 增加量未达到显著性。在 >0.25 mm 大团聚体上, OC 含量 N10 高于 CK, 在微团聚体粒级上 CK 呈现增高趋势, 但增高未达到显著性。在 $2\sim0.5$ mm 粒级上配施粪肥处理间, 仅 M3N7 处理与低配施粪肥处理产生显著性差异。总体来说, 配施粪肥能有效提升土壤中 OC 含量, 并且能显著提高 >0.25 mm 大团聚体中 OC 含量。

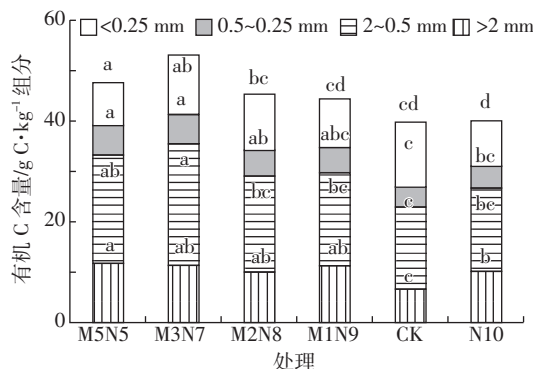


图4 不同施肥处理对 OC 分配的影响

Figure 4 The influences of fertilizer management practice on distribution of organic carbon

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布及稳定性的影响

本研究表明, 不同的施肥模式对土壤的团聚体特性产生明显的影响(表 2), 与欧阳竹等^[14]研究有机无机肥配施能显著增加潮土土壤团聚体的稳定性的结论一致, 但不排除短时间大量外源有机物质输入对土壤团聚体稳定性产生扰动作用^[15]。在土壤团聚体形成

过程中胶结物质^[16-17](有机胶结物质、无机胶结物质、有机无机复合体)起着十分重要的作用, 单施化肥处理对华北褐土土壤团聚体的稳定性和有机质的积累无显著作用。在本试验中施用化肥处理提高了 $R_{0.25}$ 值, 但在 GMD 和 MWD 中与空白对照未产生显著性差异。由于本地区农民习惯施用 N 肥, 通常认为 N 肥对土壤存在激发效应^[18], 加强了土壤微生物的活动, 加速了有机物质的分解; 有研究^[19]表明, 土壤团聚体的形成主要依赖于土壤中的有机物质, 而少量粪肥大量 N 肥的配施比例, 有可能加速有机物质的分解, 从而影响团聚作用。这可能是低粪肥配施量对团聚体稳定性无明显促进作用的原因。但是本研究中 M5N5 处理施入大量粪肥, 促进了土壤中有有机物质的累积, 增加了有机胶结物在团聚过程中的作用, 从而促进了团聚体的形成进而影响团聚体的稳定性。所以, 长时间的外源有机物质施入能有效保持土壤团聚体的稳定性, 从而保护土壤结构, 保持肥力^[20]。

3.2 不同施肥处理对土壤 SOC 含量的影响

本试验得到的结果与多数研究者在成土类型、气候条件和不同种植模式前提下得出的结果一致^[19-20], 即有机无机肥配施能显著提高土壤 SOC 含量, 均衡施用化肥对土壤 SOC 的形成有一定的促进作用, 低量粪肥配施对土壤 SOC 形成无显著促进意义。有分析认为有机物投入量太低^[8], 或者试验地区微生物活性不够^[21], 将限制有机胶结物质和有机无机复合物质的释放, 无法较快地促进微团聚体向大团聚体的胶结组合, 不能对 SOC 提供有效的物理保护。

3.3 不同施肥处理对团聚体上 OC 分配的影响

Oades 等^[22]认为大团聚体是较低层次的团聚体加上有机物等胶结剂形成的, 所以 OC 含量会随着团聚体粒径的增大而增加。在本研究中 OC 主要集中在 $2\sim$

0.25 mm 粒级的团聚体和>2 mm 粒级的大团聚体上, 化肥处理促进了大团聚体固存 C 的能力, 粪肥配施化肥处理>0.25 mm 大团聚体 OC 含量显著高于化肥处理, 微团聚体 OC 含量较低。有研究^[23]表明, 施用化肥提高了大团聚体中有机碳的含量, 有机肥配施无机肥对大团聚体中有机碳含量的提升作用则更为有效。本试验配施粪肥处理中大团聚体 OC 含量较高, 微团聚体较低的结论, 与团聚体形成过程中表现出的层次性机制现象较吻合^[1,8]。本研究发发现粪肥配施处理 M3N7 在>0.25 mm 大团聚体上 OC 含量显著增高, 高于最高粪肥配施量 M5N5 处理, 在稳定性方面仅比 M5N5 减弱 1.0%~3.0%(表 2), 微团聚体 OC 含量也高于 M5N5 处理(图 4)。有分析^[24]认为, 过量有机肥的施用, 造成部分速效 N 淋溶并提前参与了土壤的激发效应, 加强了微生物活动, 造成了有机物质的加速分解, 从而降低了土壤中有机碳的固存, 出现了上述现象。所以, 粪肥配施无机肥能有效提升土壤大团聚体中有机碳的含量, 改善土壤肥力结构^[25]。然而土壤有机质对管理措施的反应时间较长, 本研究存在试验时间短及偶然因素影响等不足, 故对长期过量有机肥施入造成团聚体分布和有机碳含量相关影响机制有待进一步研究。

4 结论

单施化肥能对土壤 SOC 含量的提高起到促进作用, 但作用不明显; 施用有机肥能提高大团聚体所占比例和大团聚体中 OC 的含量。100 kgN·hm⁻²(M3N7) 的粪肥配施量能显著提高土壤中大团聚体所占比例, 显著提升团聚体的稳定性和各级团聚体中 OC 的含量, 提升土壤 0~20 cm 耕层中 SOC 的含量, 显示了有机粪肥对形成和维持土壤水稳性团聚体的作用。OC 主要分布在 2~0.25 mm 的大团聚体上, CK 处理中微团聚体 OC 含量最高, 支持了微团聚体比大团聚体形成得早, 稳定性要高于大团聚体理论。本研究验证了微团聚体通过有机、无机胶结剂的胶结作用形成大团聚体的层次性机制。褐土的团聚体-有机碳相互作用说明大团聚体的层次性形成和稳定性作用对 SOC 的保护最为关键。

参考文献:

- [1] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异[J]. 土壤, 2004, 36(3): 292-297.
- LI Z P. The density and variations of organic carbon of red soil in

- low hill[J]. *Soil*, 2004, 36(3): 292-297.
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25.
- CHEN E F, ZHOU L K, WU G Y. To protecting fertilizer of micro-aggregate and composition in the evaluation of soil fertility level of significance[J]. *Acta Pedol Sin*, 1994, 31(1): 18-25.
- [3] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11: 199-238.
- [4] 解宏图, 付时丰, 王 晶. 土壤有机质稳定性特征与影响因子研究综述[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 460-463.
- XIE H T, FU S F, WANG J. Research on stability of soil organic matter characteristics and impact factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 460-463.
- [5] Sollins P, Homnn P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls[J]. *Geoderma*, 1996, 74: 65-105.
- [6] Puleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from Jong-term pasture and arable soil[J]. *Geoderma*, 2004, 82: 273-282.
- [7] 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. The research progress of the relationship of soil organic carbon pool and soil structure stability[J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, 41(4): 618-623.
- [8] 陈正发, 史东梅. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721-2729.
- CHENG Z F, SHI D M. Purple soil drought hill soil aggregate stability characteristics impact on erosion processes[J]. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(13): 2721-2729
- [9] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 79: 123-145.
- [10] 史 奕, 陈 欣. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498.
- SHI Y, CHEN X. The theoretical model and mechanism of organic carbonmenting form soil aggregate[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(11): 1495-1498.
- [11] 周 虎, 吕贻忠. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1970-1979.
- ZHOU H, LÜ Y Z. The impact of conservation tillage to the characteristics of soil aggregate in the North China plain[J]. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(9): 1970-1979.
- [12] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2354-2359.
- LI J T, ZHONG X L, ZHAO Q G. The research to cultivation and fertilization influential factors of soil aggregate stability[J]. *Ecol and Envi Sin*, 2009, 18(6): 2354-2359.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- BAO S D. Chemistry analysis of soil agricultural[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.
- [14] 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.

- YANG C M, OUYANG Z, DONG Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization[J]. *Chin J Ecol*, 2005, 24(8):887-892.
- [15] Gülser C. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions[J]. *Geoderma*, 2006, 131:33-44.
- [16] 李保国. 理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤, 1994, 22(1): 1-10.
- LI B G. Theory in soil science and its prospect in application[J]. *Soil*, 1994, 22(1):1-10.
- [17] 李江涛, 张 斌, 彭新华. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(6):913-917.
- LI J T, ZHANG B, PENG X H. Fertilization for red soil paddy soil particles in organic form and the effect on the stability of the aggregate[J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, 41(6):913-917.
- [18] 马成泽, 周 勤. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J]. 土壤学报, 1994, 31(1):34-44.
- MA C Z, ZHOU Q. The profit and loss of distribution of soil organic carbon with different fertilizer application[J]. *Acta Pedol Sin*, 1994, 31(1):34-44.
- [19] 张负申. 不同施肥处理对壤土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(1):80-84.
- ZHANG F S. The influence of oxidation stability with different fertilizer on Lou soil and yellow spongy soils [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 1996, 30(1):80-84.
- [20] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3):75-79.
- SHI D M, LU X P, LIU L Z. The research of soil and water conservation in purple soil of Three Gorges to mulberry hedgerow effect[J]. *J Soil Water Conserva*, 2005, 19(3):75-79.
- [21] 郭菊花, 陈小云, 李辉信, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5):789-793.
- GUO J H, CHEN X Y, LI H X, et al. Organic carbon fractions and aggregate stability in paddy soil under different fertilization[J]. *Soils*, 2007, 39(5):789-793.
- [22] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Soil Res*, 1991, 29:815-828.
- [23] Freixo A A, Machado P L, Santos H P. Soil organic carbon and fractions of a rhodic ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in Southern Brazil[J]. *Soil Till Res*, 2002, 64:221-230.
- [24] Franco C M M, Michelson P P, Oades J M. Amelioration of water repellency: Application of slow-release fertilizers to stimulate microbial breakdown of waxes[J]. *J Hydrol*, 2000, 231-232:342-351.
- [25] Hallett P D, Young I M. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity[J]. *Euro J Soil Sci*, 1999, 50:35-40.