

# 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响

梁尧<sup>1,2</sup>, 苑亚茹<sup>3</sup>, 韩晓增<sup>2\*</sup>, 李禄军<sup>2</sup>, 邹文秀<sup>2</sup>, 任军<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>

(1 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林长春 130124; 2 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室, 海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江哈尔滨 150081; 3 哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江哈尔滨 150025)

**摘要:** 【目的】团聚体的形成为土壤有机碳的稳定提供了重要的物理保护, 施用有机肥影响着土壤团聚体的形成, 量化有机肥施用剂量与团聚体有机碳稳定性之间的关系对于阐明农田土壤有机碳的固碳机制具有重要意义。【方法】以黑龙江省海伦市国家野外科学观测研究站为平台, 选择连续 10 年进行化肥配施不同剂量有机肥处理 [0、7.5、15、22.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)] 的黑土为研究对象, 将团聚体分组与腐殖酸提取相结合, 分析了不同粒径团聚体中有机碳和腐殖酸的含量与光学特性。【结果】1) 与单施化肥相比, 化肥配施有机肥增加了大团聚体 (> 0.25 mm) 的分配比例与团聚体的平均重量直径, 二者均随着有机肥剂量的增加而逐渐升高, 回归拟合分析表明, 团聚体的平均重量直径与有机肥剂量之间呈现显著的正相关关系 ( $P = 0.03$ )。2) 2~0.25 mm 团聚体是黑土有机碳的主要贮存场所, 约占有机碳总量的 64.8%~68.8%, 大团聚体中有机碳的含量与储量均随着有机肥剂量的增加而逐渐升高, < 0.053 mm 团聚体中有机碳含量与储量则维持在较稳定的水平。3) 各粒级团聚体中腐殖酸碳含量以 0.25~0.053 mm 团聚体最高, 各粒级团聚体中腐殖酸碳占有机碳百分比之间的差异不显著。化肥配施有机肥提高了各粒级团聚体中腐殖酸碳的含量, 使团聚体对有机碳的固持能力增加, 且各粒级团聚体中腐殖酸碳的含量随着有机肥剂量的增加逐渐升高。4) 化肥配施有机肥增加了各粒级团聚体中腐殖酸的 E4/E6 比值, 表明其分子结构简单化, 且以 > 2 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体中腐殖酸 E4/E6 比值的增加最显著。【结论】在黑土中, 长期连续进行化肥配施有机肥, 促进了团聚体的形成, 改善了耕层土壤结构, 增加了团聚体中有机碳的积累与固持能力, 并使各粒级团聚体中腐殖酸的结构“年轻化”, 这种促进作用在高剂量有机肥施用下更为显著。实际生产中, 在短期内可通过适当提高有机肥的施用量以提高黑土肥力及其固碳能力。

关键词: 黑土; 团聚体; 胶结剂; 有机碳; 腐殖酸

中图分类号: S153.6; S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)06-1586-09

## Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

LIANG Yao<sup>1,2</sup>, YUAN Ya-ru<sup>3</sup>, HAN Xiao-zeng<sup>2\*</sup>, LI Lu-jun<sup>2</sup>, ZOU Wen-xiu<sup>2</sup>, REN Jun<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jinlin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China; 2 Key Laboratory of Mollisols Agroecology, National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3 College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

**Abstract:** 【Objectives】Aggregates provide important physical protection for soil organic carbon. Organic amendments strongly influence aggregate formation and its organic carbon stability, quantifying the relationships between organic manure addition rate and stability of organic carbon in aggregates could provide valuable

收稿日期: 2015-11-11 接受日期: 2016-01-12 网络出版日期: 2016-06-03

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201303126, 201203030)资助。

作者简介: 梁尧(1984—), 女, 吉林省辽源人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤生物化学的研究。E-mail: liangyaosmart@163.com

\* 通信作者 E-mail: xzhan@neigaehrb.ac.cn

information for better understanding in soil organic carbon sequestration mechanism. 【 **Methods** 】 This experiment was carried out based on a 10-year field experiment in National Observation Station of Hailun Agroecology System. Soils were selected from four treatments amended with different rate of organic manure [0, 7.5, 15, 22.5 t/ (hm<sup>2</sup>·a)] plus mineral fertilizer. Aggregate fractionation and humic acids extraction was used to analyze the distribution of soil organic carbon and content and optical characteristics of humic acid in different size of aggregate fractions. 【 **Results** 】 1) Compared with application of mineral fertilizer alone, addition of mineral fertilizers plus organic manure increased the proportion of macroaggregates (> 0.25 mm) and mean weight diameter which was gradually increased with the addition rate of organic manure. Significant linear correlation between the value of mean weight diameter and organic manure addition rate was observed ( $P = 0.03$ ). 2) Soil organic carbon was mainly distributed in 2–0.25 mm aggregates, accounting for about 64.8%–68.8%. Organic carbon content and stock in macroaggregates increased with the increasing organic manure rate. However, no significant differences were showed both in organic carbon content and stock in small microaggregates among treatments. 3) Humic carbon content in microaggregate (0.25–0.053 mm) was higher than other aggregates, but no significant difference in the percentage of humic carbon was found among different aggregate fractions. The content of humic carbon in each aggregate fraction increased significantly after application of organic manure plus mineral fertilizer, thus its capacity in organic C retention increased. The humic carbon content gradually increased with the increasing addition rate of organic manure. 4) Application of organic manure plus mineral fertilizer increased the E4/E6 ratio of humic acid in each aggregate fraction, particularly in the aggregate of > 2 mm and 0.25–0.053 mm, which indicated that the structure of humic acid tended to become simpler. 【 **Conclusions** 】 In black soil, continuous application of organic manure plus mineral fertilizers is effective to improve surface soil structure through promoting the formation of aggregates, increase carbon sequestration in aggregates, and simplify the structure of humic acid in aggregates, these beneficial effects are greater in soil amended with high rate of organic manure. Therefore, the addition rate of organic manure could be properly increased in order to improve soil fertility and carbon sequestration.

**Key words:** Mollisol; aggregates; binding agent; organic carbon; humic acid

在全球气候变化背景下, 研究如何提高农田土壤有机碳的储量与稳定性对于促进农业可持续发展及减缓全球温室效应具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。团聚体物理保护所产生的有机碳与微生物之间的空间“隔离”现象是土壤有机碳主要的稳定机制之一<sup>[3]</sup>。土壤有机碳与团聚体相互作用紧密, 有机碳与矿物颗粒形成稳定的团聚体, 同时, 团聚体对有机碳又发挥着物理保护作用。大团聚体是由多糖、作物根系和微生物菌丝体粘结微团聚体后形成的集合体, 而微团聚体主要由有机-矿质复合体组成<sup>[4-5]</sup>。土壤团聚体的形成过程决定了土壤有机碳的稳定性, 大团聚体 (> 0.25 mm) 中的有机碳以物理保护为主, 周转速度较快<sup>[6]</sup>, 而被禁锢在大团聚体内、与矿物粘粒结合的微团聚体 (< 0.25 mm) 是有机碳长期固定和稳定的场所, 这些微团聚体中的有机碳以化学保护为主, 其成分主要为微生物来源的腐殖物质, 具有较强的抗分解能力<sup>[5, 7]</sup>。土壤受到外界扰动时, 大团聚体粒级的有机碳首先发生变化, 微团聚体内的有机碳对外界环境

的响应具有一定的滞后性<sup>[8]</sup>。

腐殖物质是土壤有机质的主体, 在促进团聚体的形成与稳定中发挥着重要作用, 由于腐殖物质具有特殊的高分子结构, 不易被微生物分解利用, 因此, 腐殖物质被看作是维持团聚体稳定性的持久性有机质<sup>[9]</sup>, 腐殖酸和团聚体之间存在“双向分选”, 即不同粒级团聚体中腐殖酸的数量与结构特征不同, 腐殖酸性质上的差异又将会胶结形成不同粒级的团聚体<sup>[10-11]</sup>。腐殖物质的数量与结构特征体现了土壤有机碳的化学固定机制。根据团聚体层次模型, 与大团聚体相比, 微团聚体中应具有更高比例的腐殖酸含量<sup>[12]</sup>, 此外, < 0.053 mm 粒级中胡敏酸分子缩合度较高, 芳香性/脂族性比值较大, 结构更复杂<sup>[13]</sup>。

施用有机肥是土壤培育的重要措施。有机肥的输入促进了土壤团聚体的形成, 改变土壤有机碳在不同团聚体中的分配与组成特征, 从而影响着土壤有机碳的固持能力, 这种改变与有机肥的输入量密切相关。目前, 关于团聚体有机碳分布与有机肥输

入量之间的关系已开展了一定的研究,但由于土壤质地、有机碳背景值以及施肥量的差异导致所得结果不尽相同<sup>[14-15]</sup>。东北黑土是我国重要的商品粮生产土壤类型,以其土质肥沃和有机质含量高而闻名,由于有机物质输入不足,近些年来黑土有机碳的水平呈逐渐下降趋势<sup>[16]</sup>,因此,研究有机肥输入量与土壤有机碳稳定性之间的关系对于提高黑土肥力和固碳能力具有重要意义。本文以黑龙江省海伦市国家野外科学观测研究站的长期定位试验为平台,选择连续 10 年化肥配施不同剂量有机肥处理的黑土为研究对象,系统探讨了黑土团聚体有机碳分布及其中腐殖酸的含量与光学特征,以期阐明黑土有机碳的稳定机制与固碳潜力提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验土壤采集于黑龙江省海伦市国家野外科学观测研究站(N47°26', E126°38') 试验区内,地处我国东北黑土带的中心区域,属于温带大陆性季风气候,年均温为 1.5℃,年降雨量 500~600 mm,无霜期 130 d 左右,年有效积温( $\geq 10^\circ\text{C}$ ) 2450~2500℃。土壤为第四纪黄土状亚粘土发育而成的中厚黑土。

### 1.2 试验设计

试验起始于 2001 年,本研究选择了 4 个施肥处理,分别为: 1) OM0, 化肥 NPK, 不施有机肥; 2) OM1, NPK+有机肥 I [7.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)]; 3) OM2, NPK+有机肥 II [15 t/(hm<sup>2</sup>·a)]; 4) OM3, NPK+有机肥 III [22.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)], 每个处理 3 次重复,小区面积为 12 m × 5.6 m, 随机区组排列。作物种植方式采用小麦-玉米-大豆轮作,一年一熟制,每年化肥用量为小麦 N 75 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 30 kg/hm<sup>2</sup>,玉米 N 120 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 30 kg/hm<sup>2</sup>,大豆 N 20 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 52 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 30 kg/hm<sup>2</sup>。有机肥为腐熟的猪粪,每年所施猪粪碳氮含量的平均值分别为 265 ± 15.1 g/kg 和 21 ± 1.8 g/kg,有机肥于每年秋收后撒施于地表。

### 1.3 样品采集与分析

土壤样品于 2011 年 4 月采集(2010 年种植大豆)。每个试验小区按“梅花形”采样法共布设 5 个取样点,采集 0—20 cm 表层土样,将 5 个样点的重复样品混合成 1 个样品。采样完毕后,尽量减少运输过程中对土样的扰动,以免破坏土壤结构。将土样带回实验室,用手把大土块沿自然破碎面轻轻掰开,

剔除土样中砾石、侵入体及有机体,待土壤样品完全风干后,备用。供试土壤理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

处理 Treatment	总有机碳 TOC (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	pH (H <sub>2</sub> O)
OM0	27.50 ± 0.20	2.05 ± 0.05	0.80 ± 0.01	5.84 ± 0.09
OM1	29.23 ± 0.24	2.23 ± 0.09	1.07 ± 0.01	5.94 ± 0.10
OM2	30.00 ± 0.52	2.34 ± 0.08	1.01 ± 0.02	6.03 ± 0.11
OM3	31.91 ± 0.70	2.50 ± 0.12	1.10 ± 0.03	6.13 ± 0.12

注 (Note): 表中数据为平均值 ± 标准差 Values are the mean ± standard deviation.

土壤团聚体分级采用 Six<sup>[6]</sup> 和 Puget<sup>[17]</sup> 的湿筛法并加以改进,具体方法如下: 100 g 风干土缓慢湿润 5 min,再浸入蒸馏水中糊化 5 min,然后转移到筛组(5、2、1、0.5 和 0.25 mm)上,振幅 3.8 cm, 32 r/min,湿筛 10 min,将 >5 mm 和 2~5 mm 组分合并得到 >2 mm 团聚体,将 1~2 mm 和 1~0.25 mm 组分合并得到 2~0.25 mm 团聚体, <0.25 mm 团聚体再过 0.053 mm 筛,分离得到 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 团聚体。将所有团聚体组分转移到 50 mL 小烧杯,50℃ 烘干、称重。各粒级团聚体中碳含量通过元素分析仪 (Elementar, Germany) 测定。土壤团聚体平均重量直径采用以下公式计算:

$$MWD = \sum W_i \times M_i$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  个粒级团聚体的平均直径,  $M_i$  为第  $i$  个筛子上团聚体的百分比。

腐殖物质的分组采用腐殖质组成修改法<sup>[18]</sup>,腐殖酸的含量采用重铬酸钾氧化法测定。E4/E6 比值为腐殖酸溶液在波长 465 nm 和 665 nm 光密度的比值。

### 1.4 统计分析

所有试验数据采用 Excel 和 Origin 8.5 进行整理分析、绘图制作,利用 SPSS17.0 软件进行方差分析 (ANOVA),用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 化肥配施不同剂量有机肥下土壤团聚体的粒级分布

化肥配施不同剂量有机肥对各粒级团聚体的分布有着显著影响(表 2)。>2 mm 和 2~0.25 mm 粒级团聚体的分配比例均随着有机肥剂量的增加逐渐升

高; 相反, 0.25~0.053 mm 团聚体所占比例随着有机肥剂量的增加而逐渐降低, 与 OM0 相比, OM1、OM2 和 OM3 处理的降低幅度分别为 2%、18% 和 24%; < 0.053 mm 团聚体所占比例并未随着有机肥剂量的增加而发生显著变化。总体看来, 土壤团聚体集中分布在 2~0.25 mm 粒级, 其次为 0.25~0.053 mm 和 > 2 mm 粒级, < 0.053 mm 粒级所占比例最低, 各处

理下不同粒级团聚体分配比例之间的差异显著。平均重量直径 (MWD) 是评价土壤团聚体稳定性的指标。MWD 值随着有机肥剂量的增加逐渐升高, 与 OM0 处理相比, OM1 处理下 MWD 值变化不显著, 但 OM2 和 OM3 处理使 MWD 值显著增加。回归拟合表明, 有机肥施用量与团聚体 MWD 值之间呈现显著的正相关关系 ( $r = 0.9706$ ,  $P = 0.03$ )。

表 2 化肥配施不同剂量有机肥处理土壤团聚体的粒径分布比例(%) 及其平均重量直径 (MWD)

Table 2 Percentage of aggregates in different size and their mean weight diameters (MWD) in soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate size distribution (mm)				MWD (mm)
	>2	2~0.25	0.25~0.053	<0.053	
OM0	8.08 ± 0.50 bc	65.6 ± 3.93 cA	14.5 ± 2.40 aB	5.12 ± 0.91 aD	1.04 b
OM1	8.28 ± 1.82 bc	66.4 ± 1.80 cA	14.1 ± 2.40 aB	5.18 ± 0.63 aD	1.06 b
OM2	9.11 ± 1.54 aC	70.1 ± 2.10 bA	11.9 ± 1.30 bB	4.83 ± 0.69 aD	1.13 a
OM3	8.99 ± 0.93 aC	72.8 ± 3.04 aA	11.0 ± 2.98 bB	4.95 ± 1.20 aD	1.15 a

注 (Note): 表中数据为平均值 ± 标准差 Values are the mean ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in one column indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 同行数值后不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital letters in one row indicate significant difference among aggregates in the same treatment at 0.05 level.

## 2.2 化肥配施不同剂量有机肥下土壤团聚体中有机碳含量及其储量的变化

化肥配施不同剂量有机肥显著改变了各粒级团聚体中有机碳的含量 (图 1)。不同处理下, > 2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 各粒级团聚体中有机碳含量的变化趋势一致, 均随着有机肥剂量的增加逐渐升高, 从 < 0.053 mm 团聚体中有机碳含量来看, 各处理之间的差异未达到显著水平。同一处理下, 各粒级团聚体中有机碳含量以 0.25~0.053 mm 和 > 2 mm 粒级最高, 其次为 2~0.25 mm 粒级, 而 < 0.053 mm 粒级中有机碳的含量显著低于其他粒级。

化肥配施不同剂量有机肥对各粒级团聚体中有机碳的储存能力有着显著影响 (表 3)。> 2 mm 和 2~0.25 mm 粒级中有机碳储量均随着有机肥剂量的增加而逐渐升高, 且不同处理 2~0.25 mm 粒级有机碳储量之间差异显著, 但 0.25~0.053 mm 和 < 0.053 mm 粒级中有机碳储量在不同处理之间的差异并不显著。从各粒级团聚体有机碳的分配比例来看, 与 OM0 相比, 有机肥施用增加了大团聚体 (> 0.25 mm) 有机碳的比例, 但降低了微团聚体 (< 0.25 mm) 中有机碳的比例。土壤有机碳主要储存于 2~0.25 mm 粒级中, 约占总有机碳的 65.5%; 其次为 0.25~0.053 mm 和 > 2 mm 粒级, 约占总有机碳的 13.5% 和 8.7%;

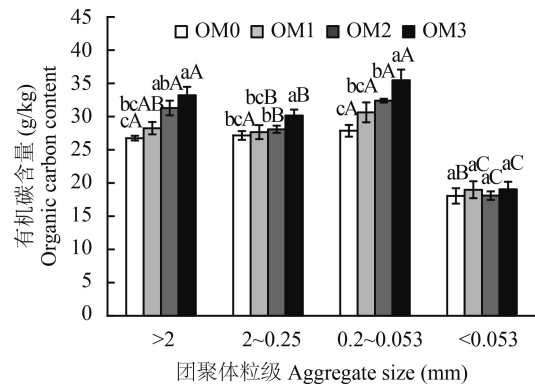


图 1 化肥配施不同剂量有机肥处理土壤团聚体中有机碳含量

Fig. 1 Content of organic carbon in different size of aggregates in soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 柱上不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters above the bars indicate significant difference among different sizes of aggregates in the same treatment at 0.05 level.]

< 0.053 mm 粒级的碳储量最低, 仅占有有机碳总量的 3.2%。各处理不同粒级团聚体有机碳储量之间的差异均达到显著水平。



表 3 化肥配施不同剂量有机肥处理土壤各粒级团聚体有机碳的储量与分配比例

Table 3 Organic carbon storage in different size of aggregates and the proportion in total organic carbon of soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

处理 Treatment	>2 mm		2~0.25 mm		0.25~0.053 mm		<0.053 mm	
	有机碳储量 (g/kg) Organic C storage	占比 (%) Proportion	有机碳储量 (g/kg) Organic C storage	占比 (%) Proportion	有机碳储量 (g/kg) Organic C storage	占比 (%) Proportion	有机碳储量 (g/kg) Organic C storage	占比 (%) Proportion
OM0	2.16 ± 0.03 bC	7.86	17.8 ± 0.54 dA	64.81	4.03 ± 0.17 aB	14.66	0.93 ± 0.06 aD	3.36
OM1	2.34 ± 0.08 bC	8.00	18.3 ± 0.75 cA	64.88	4.19 ± 0.35 aB	14.32	0.98 ± 0.08 aD	3.36
OM2	2.85 ± 0.14 aC	9.51	19.7 ± 0.70 bA	65.71	3.86 ± 0.13 aB	12.88	0.88 ± 0.03 aD	2.92
OM3	2.98 ± 0.29 aC	9.35	21.9 ± 1.54 aA	68.75	3.90 ± 0.18 aB	12.22	0.94 ± 0.06 aD	2.95

注 (Note): 表中数据为平均值 ± 标准差 Values are the mean ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in one column indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 同行数值后不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital letters in one row indicate significant difference among aggregates in the same treatment at 0.05 level.

### 2.3 化肥配施不同剂量有机肥下团聚体中腐殖酸的含量

化肥配施不同剂量有机肥处理后各粒级团聚体中腐殖酸碳 (HC) 的含量将发生明显变化 (图 2)。与 OM0 相比, 有机肥施用后 > 2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体中 HC 的含量均明显增加, 且随着有机肥剂量的增加逐渐升高; 不同处理之间在 > 2 mm 和 2~0.25 mm 粒级中 HC 含量上的差异显著, 但在 0.25~0.053 mm 粒级 HC 含量上的差异不显著; < 0.053 mm 粒级中 HC 的含量以 OM2 和 OM3 处理较高, 二者间差异不显著, 其次为 OM1 和 OM0。总体来看, 各粒级团聚体中 HC 含量以 0.25~0.053 mm 最高, 其次是 > 2 mm 和 2~0.25 mm, < 0.053 mm 中 HC 含量最低。

从团聚体中 HC 占有有机碳的比例来看 (表 4), 与 OM0 相比, 有机肥处理对 > 2 mm 粒级中 HC 所占比例的影响并不显著, 虽增加了 2~0.25 mm 粒级中 HC 的比例, 但各处理间的差异未达到显著水平; 0.25~0.053 mm 粒级中 HC 的比例随着有机肥剂量的增加逐渐下降; 有机肥施用增加了 < 0.053 mm 粒级中 HC 的比例, 但 OM1 与 OM0 之间的差异不显著, OM2 和 OM3 处理显著高于前两者。此外, 同一处理各粒级团聚体之间在 HC/OC 比例上的差异均未达到显著水平。

### 2.4 化肥配施不同剂量有机肥处理下团聚体中腐殖酸的光学特征

团聚体中腐殖酸的 E4/E6 比值对不同剂量有机肥处理的响应有所差异 (图 3)。与 OM0 处理相比, 有机肥施用增加了各粒级团聚体中腐殖酸的 E4/E6

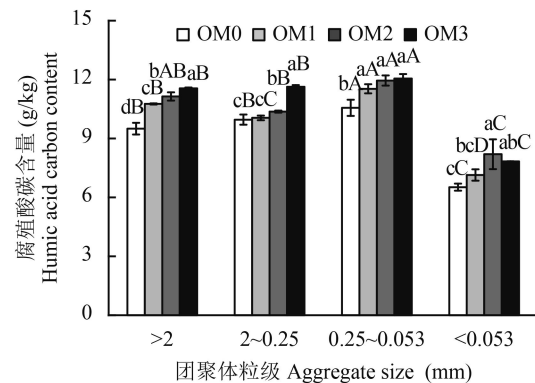


图 2 化肥配施不同剂量有机肥处理团聚体中腐殖酸的含量

Fig. 2 Humic carbon content in different size of aggregates of soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 柱上不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters above the bars indicate significant difference among different sizes of aggregates in the same treatment at 0.05 level.]

比值, 其中, 有机肥处理下 > 2 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体中腐殖酸 E4/E6 比值与 OM0 处理间的差异显著, 但各有机肥处理之间的差异不显著; 各处理间 2~0.25 mm 粒级中腐殖酸 E4/E6 比值的差异不显著; OM3 处理下 < 0.053 mm 粒级中腐殖酸的 E4/E6 比值显著高于其他处理。从同一处理不同粒级团聚体中腐殖酸的 E4/E6 比值来看, 在 OM0、OM1 和 OM2 处理下, 各粒级团聚体之间在腐殖酸 E4/E6 比值的差异并不显著, 但 OM3 处理下, 2~0.25 mm 团聚体中腐殖酸 E4/E6 比值显著低于其他粒级。

表 4 化肥配施不同剂量有机肥处理团聚体中腐殖酸碳占有有机碳的比例 (%)

Table 4 Proportion of humic carbon in organic carbon of different size of aggregates in soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

处理 Treatment	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
OM0	35.52 ± 0.87 aA	36.06 ± 0.55 aA	37.93 ± 1.29 aA	36.26 ± 3.35 bA
OM1	38.12 ± 1.25 aA	37.12 ± 1.25 aA	37.77 ± 2.83 abA	37.77 ± 3.52 bA
OM2	35.66 ± 1.61 aA	37.00 ± 1.61 aA	36.87 ± 1.62 abA	40.25 ± 2.72 aA
OM3	35.01 ± 3.35 aA	39.74 ± 3.35 aA	34.02 ± 2.16 bA	41.21 ± 2.54 aA

注 (Note): 表中数据为平均值 ± 标准差 Values are the mean ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in one column indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 同行数值后不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital letters in one row indicate significant difference among aggregates in the same treatment at 0.05 level.

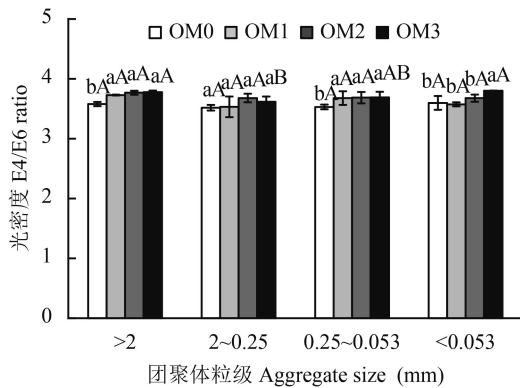


图 3 化肥配施不同剂量有机肥处理下团聚体中腐殖酸的 E4/E6 比值

Fig. 3 E4/E6 ratio in different size of aggregate in soils amended with different rates of organic manure plus mineral fertilizer

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same size of aggregate at 0.05 level; 不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters above the bars indicate significant difference among aggregates in the same treatment at 0.05 level.]

### 3 讨论

土壤团聚体的形成与有机质的含量密切相关。本研究表明, 连续 10 年化肥配施有机肥增加了土壤总有机碳的含量, 有利于大团聚体的形成, 且随着有机肥施用量的增加, 大团聚体的数量与团聚体的平均重量直径呈现逐渐上升的趋势, 这与短期施用不同数量有机肥下黄绵土团聚体的变化规律相一致<sup>[19]</sup>。根系、真菌菌丝体和不稳定碳水化合物是形成大团聚体的胶结物质<sup>[20]</sup>。施用有机肥对于土壤团聚体形成与稳定的促进作用主要在于: 一方面, 施用有机肥增加了土壤肥力, 有利于作物根系的生长, 产

生更多的根系分泌物, 根系的穿插缠绕及根系分泌物的胶结作用有助于团聚体的形成和稳定<sup>[21]</sup>; 另一方面, 土壤的胶结物质得以增加, 加快了土壤大团聚体的团聚作用<sup>[22, 23]</sup>。与之相反, 有研究表明, 在有机质含量较高的潮棕壤上, 连续 8 年过量施用有机肥 [50 t/(hm<sup>2</sup>·a)] 减少了 > 2 mm 团聚体的分布<sup>[24]</sup>, 连续 26 年施用有机肥 9 t/(hm<sup>2</sup>·a) 降低了黑土团聚体的稳定性<sup>[25]</sup>, 产生这种负面作用的原因可能在于有机肥的输入降低了土壤容重、增加了土壤孔隙度, 导致微生物活性增加, 加快了大团聚内土壤有机碳的分解。本研究中施用有机肥的数量或是施肥年限远低于上述试验, 因此, 并未出现施用有机肥抑制大团聚体形成的现象。

长期定位试验研究表明, 化肥配施有机肥不仅可以增加团聚体的数量, 并且相应地增加了各粒级团聚体中有机碳的含量<sup>[26]</sup>。本研究指出, > 2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒级中有机碳含量随着有机肥剂量的增加而逐渐升高, 但 < 0.053 mm 粒级中有机碳的含量虽有增加, 但变化并不显著。Gulde 等<sup>[27]</sup> 和 Stewart 等<sup>[28]</sup> 通过试验提出土壤有机碳的等级饱和模型, 即土壤有机碳浓度与碳输入量呈非线性相关, 随着碳输入量的增加, 小粒级的团聚体首先饱和, 大粒级的团聚体后饱和, 最终土壤碳库达到饱和。本研究中 < 0.053 mm 团聚体中有机碳含量维持在较稳定的水平, 是否由于小粒级团聚体已达到或接近饱和水平所导致的, 仍需要进一步的研究来证明。通常大团聚体是由微团聚体通过有机质胶结而形成的, 因此其有机碳含量高于微团聚体, 但值得注意的是, 本研究中由于团聚体有机碳的浓缩效应<sup>[29]</sup>, 导致黑土中 0.25~0.053 mm 团聚体

中有机碳的含量与大团聚中有机碳含量之间的差异并不显著。

在耕作土壤中,大团聚体是最易受到扰动的部分,这部分团聚体的周转与土壤有机碳的存储密切相关。本研究中,随着有机肥剂量的增加,大团聚体( $> 0.25$  mm)中有机碳的储量逐渐升高,微团聚体( $< 0.25$  mm)中有机碳的储量并未发生显著变化,说明增施有机肥促进了土壤新碳在大团聚体中的积累。此外,对于黑土而言,2~0.25 mm 团聚体是土壤有机碳的主要贮存场所,占土壤总有机碳含量的55.6%~72.7%,这与李海波等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。而刘中良等<sup>[24]</sup>指出潮棕壤下0.25~0.053 mm 团聚体是土壤有机碳的主要贮存场所,占有有机碳储量的40%~54%,产生这一差异的原因可能在于土壤有机质背景值与土壤质地的不同。

腐殖物质是土壤团聚体形成的重要胶结物质,以腐殖酸形式存在的碳素具有更强的稳定性,其含量升高预示着土壤对碳有着更强的固持能力。本研究中化肥配施有机肥增加了各粒级团聚体中腐殖酸碳的含量,且高量有机肥对团聚体中腐殖酸碳的提升效果更为突出,说明增施有机肥提高了团聚体对有机碳的固持能力。团聚体层次模型指出<sup>[31]</sup>,持久性有机物即腐殖质与原生颗粒复合形成微团聚体,而临时性(根系和真菌)和瞬时性有机物(根系和微生物分泌物)发挥着促进微团聚体聚合形成大团聚体的作用。与之相反,一些研究表明在农田土壤中,大团聚体中腐殖酸的含量及其占有有机碳的比例显著高于微团聚体,认为经过农干干扰之后,土壤腐殖酸从某种程度上可以被看做是一种临时性的团聚体胶结物质<sup>[32-33]</sup>,本研究的结果也证明了这一论点,即 $< 0.053$  mm 团聚体中腐殖酸碳的含量显著低于其他粒级,同时各粒级团聚体中腐殖酸碳占有有机碳比例之间的差异并不显著。

腐殖物质胶结作用的发挥不仅与其数量相关,同时也取决于其结构特征。外源有机物质进入土壤后,将积极地参与土壤腐殖酸的形成与转化,随着施肥年限的增加,这些物质一部分通过矿化而损失,仅有一些抗分解组分长期积累于土壤腐殖物质中<sup>[34-35]</sup>。腐解化程度较高的有机物质形成具有高分子量的腐殖酸,而分子量较低的腐殖酸则来源于新鲜的有机物质。通常 E4/E6 比值与腐殖酸的分子量和芳构化程度成反比,即 E4/E6 比值越高,腐殖酸的分子量小,分子结构趋于简单化<sup>[36]</sup>。本研究中10年连续化肥配施有机肥导致各粒级团聚体中腐殖酸的

E4/E6 比值增加,表明腐殖酸的分子量减小,结构简单化,且高量有机肥的作用效果更为明显。新鲜有机物频繁地参与到大团聚体的形成过程中,使得大团聚体内的腐殖质“年轻化”,分子结构相对简单,但由于长时间的储存和较少干扰,微团聚体中的腐殖质结构比大团聚体“老”<sup>[13]</sup>。本研究中各粒级团聚体之间在 E4/E6 比值上并未表现出显著的差异性,究其原因可能在于长期耕作的扰动,使耕层土壤各粒级团聚体中腐殖酸的结构表现出“趋同现象”。

## 4 结论

1) 连续10年化肥配施有机肥增加了土壤中大团聚体的分配比例,提高了土壤团聚体的稳定性,有利于土壤良好团粒结构的形成,且随着有机肥剂量的增加,大团聚体的比例与团聚体平均重量直径呈现逐渐增加的趋势。

2) 2~0.25 mm 团聚体是黑土有机碳的主要贮存场所,占土壤有机碳总量的64.8%~68.8%。连续10年化肥配施有机肥增加了 $> 2$  mm 和2~0.25 mm 团聚体中有机碳的含量与储量,且二者随着有机肥剂量的增加呈现逐渐升高的趋势。

3) 连续10年化肥配施有机肥提高了各粒级团聚体中腐殖酸碳的含量,使各粒级团聚体对有机碳的固持能力增加,且各粒级团聚体中腐殖酸碳的含量随着有机肥剂量的增加逐渐升高。从各粒级团聚体腐殖酸碳占有有机碳比例来看, $< 0.053$  mm 团聚体中腐殖酸碳含量显著低于其他粒级,且各粒级团聚体中腐殖酸碳占有有机碳的比例之间差异并不显著,从某种程度上说明腐殖酸并非形成微团聚体的主要胶结物质。

4) 连续10年化肥配施有机肥使各粒级团聚体中腐殖酸的分子量减小,结构趋于简单,有利于土壤肥力的提升,且高量有机肥[22.5 t/(hm<sup>2</sup>·a)]的效果更明显。

## 参 考 文 献:

- [1] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129: 344-348.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [3] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79:7-31.
- [4] Wei C F, Gao M, Shao J G, *et al.* Soil aggregate and its response to land management practices[J]. *China Particology*, 2006, 4 (5):

- 211–219.
- [5] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil structure and soil organic matter: distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2000, 64: 681–689.
- [6] Six J, Elliot E T, Paustian K, *et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1998, 62: 1367–1377.
- [7] Karolien D, Zotarelli L, Boddey R M, *et al.* Microaggregate associated carbon as a diagnostic fraction for management induced changes in soil organic carbon in two Oxisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1165–1172.
- [8] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (2): 378–386.
- Li J, Wu HJ, Wu XP, *et al.* Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon content[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (2): 378–386.
- [9] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al.* SOM fraction methods: relevance to functional pools and stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 2183–2207.
- [10] Bossuyt H, Denef K, Six J, *et al.* Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 195–208.
- [11] 李凯, 窦森, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 579–583.
- Li K, Dou S, Han X Z, *et al.* Effect of long-term fertilization composition of humic substances in black soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 579–583.
- [12] 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: 2099–2103.
- [13] 郝翔翔, 窦森, 韩晓增, 等. 典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体中胡敏酸的结构特征[J]. *土壤学报*, 2014, 52 (4): 824–833.
- Hao X X, Dou S, Han X Z, *et al.* Structure of humic acid in soil aggregates under different ecosystems in typical black soil region of northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 52 (4): 824–833.
- [14] Yousefi M, Hajabasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101: 57–61.
- [15] Leon M C C, Stone A, Dick R P. Organic soil amendments: Impacts on snap bean common root rot (*Aphanomyces euteiches*) and soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31: 199–210.
- [16] Ding X L, Han X Z, Liang Y, *et al.* Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 36–41.
- [17] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595–605.
- [18] 窦森, 于水强, 张晋京. 不同CO<sub>2</sub>浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44 (3): 458–466.
- Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (3): 458–466.
- [19] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (3): 100–106.
- Gao F, Jia Z K, Han Q F, *et al.* Effects of different organic fertilizer treatments on distribution and stability of soil aggregates in the semiarid area of South Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (3): 100–106.
- [20] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1081–1088.
- [21] 孙彩丽, 薛蕙, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (3): 550–561.
- Sun C L, Xue S, Liu G B, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (3): 550–561.
- [22] 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]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 280–288.
- [23] Liu S, Yan C R, He W Q, *et al.* Effects of different tillage practices on soil water-stable aggregation and organic carbon distribution in dryland farming in Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35: 65–69.
- [24] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机猪粪输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1149–1157.
- Liu Z L, Yu W T, Zhou H, *et al.* Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1149–1157.
- [25] Chen Y, Zhang Y D, He H B, *et al.* Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10 (6): 1018–1026.
- [26] Huang S, Peng X X, Huang Q R, *et al.* Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154: 364–369.
- [27] Gulde S, Chung H, Amelung W, *et al.* Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (3): 605–612.
- [28] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, *et al.* Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 357–366.
- [29] Li H B, Han X Z, Wang F, *et al.* Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38: 1673–1690.
- [30] 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.
- Li H B, Han X Z, You M Y. Particulate organic carbon distribution in aggregates differing in land use and long-term fertilization in Black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (1):



- 184–189.
- [31] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water stable aggregates in soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141–161.
- [32] Bongiovanni M D, Lobartini J C. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro and microaggregates as affected by cultivation[J]. *Geoderma*, 2006, 136: 660–665.
- [33] Lugato E, Simonetti G, Morari F, *et al.* Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment[J]. *Geoderma*, 2010, 157: 80–85.
- [34] Plaza C, Hernández D, Fernández J M, *et al.* Long-term effects of amendment with liquid swine manure on proton binding behavior of soil humic substances[J]. *Chemosphere*, 2006, 65 (8): 1321–1329.
- [35] Senesia N, Plaza C, Brunetti G, *et al.* Comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1244–1262.
- [36] Brunetti G, Plaza C, Clapp C E, *et al.* Compositional and functional features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1355–1365.