

# 不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响

魏宇轩<sup>1</sup>, 蔡红光<sup>2</sup>, 张秀芝<sup>2</sup>, 张晋京<sup>1</sup>, 任军<sup>2</sup>, 王立春<sup>2</sup>

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118;

2. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130124)

**摘要:** 以吉林省农业科学院黑土有机培肥定位试验基地为平台, 研究了不同种类有机肥(堆腐肥、鸡粪、牛粪和猪粪)施用对土壤及不同粒级团聚体中有机碳和腐殖质组成的影响。结果表明: 与不施肥(CK)和单施化肥(NPK)相比, 有机肥配施化肥显著( $P < 0.05$ )增加了土壤有机碳、胡敏酸碳(HAC)和胡敏素碳(HUC)含量; 同时, 有机肥配施化肥也增加了不同粒级团聚体中有机碳和腐殖质碳含量, 其中施用堆腐肥显著增加了各粒级团聚体中有机碳、HAC 和 HUC 含量。不同种类有机肥相比, 施用堆腐肥处理的土壤有机碳、HAC 和 HUC 含量均高于其他有机肥处理, 并与牛粪处理之间差异显著; 施用堆腐肥和牛粪后,  $> 0.25$  mm 粒级团聚体有机碳含量高于其他有机肥处理, 且  $2 \sim 0.25$  mm 粒级团聚体有机碳含量显著高于鸡粪处理; 从不同粒级团聚体中腐殖质组分的分布来看, 施用堆腐肥后,  $2 \sim 0.25$  mm 粒级团聚体中 HAC 和 HUC 含量显著高于猪粪处理, 而  $0.25 \sim 0.053$ ,  $< 0.053$  mm 粒级团聚体中 HAC 含量显著低于鸡粪处理。上述结果说明, 有机肥配施化肥提高了土壤团聚体中有机碳和腐殖质碳含量, 但不同有机肥的效应不同。

**关键词:** 有机肥; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 腐殖质组成; 黑土

**中图分类号:** S153.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0258-03

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.039

## Effects of Different Organic Manures Application on Organic Carbon and Humus Composition of Aggregate Fractions in a Black Soil

WEI Yuxuan<sup>1</sup>, CAI Hongguang<sup>2</sup>, ZHANG Xiuzhi<sup>2</sup>, ZHANG Jinjing<sup>1</sup>, REN Jun<sup>2</sup>, WANG Lichun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Commodity Grain Bases of Jilin

Province, College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124)

**Abstract:** The effects of different kinds of organic manures (compost manure, chicken manure, cow manure, and pig manure) application on organic carbon (C) concentrations and humus composition in bulk soil and its different size aggregate fractions were studied based on field location experiment in a black soil with organic fertilization at the Jilin Academy of Agricultural Sciences. The results showed that, compared with no fertilizer (CK) and single application of chemical fertilizers (NPK), the application of organic manures in combination with chemical fertilizers increased significantly ( $P < 0.05$ ) the concentrations of organic C, humic acid C (HAC) and humin C (HUC) in bulk soil. Meanwhile, the concentrations of organic and humic C within different size aggregate fractions also increased after the combined application of organic manures with chemical fertilizers compared to CK and NPK treatments, with significant increase for organic C, HAC and HUC within different size aggregate fractions following compost manure application. Among the experimental organic manures, the concentrations of organic C, HAC and HUC were higher for compost manure than for other organic manures treatments, with significant difference between compost manure and cow manure treatments. With respect to other organic manures treatments,  $> 0.25$  mm aggregate-associated organic C concentration was higher after the application of compost manure and cow manure, with significant difference between compost manure and cow manure with chicken manure treatment for  $2 \sim 0.25$  mm aggregate fraction. Moreover, the concentrations of HAC and HUC in  $2 \sim 0.25$  mm aggregate fraction were significantly

收稿日期: 2017-12-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300608); 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B02); 吉林省科技发展计划项目(LFGC14301)

第一作者: 魏宇轩(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤有机质研究。E-mail: 762018438@qq.com

通信作者: 张晋京(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhangjinjing@126.com

任军(1960—), 男, 研究员, 主要从事农田生态研究。E-mail: renjun557@163.com

higher for compost manure than for pig manure treatment, whereas the concentrations of HAC 0.25~0.053, <0.053 mm aggregate fraction were significantly lower for compost manure than for chicken manure treatment. The above results indicated that the combined application of organic manure with chemical fertilizers increased the concentrations of organic and humus C within soil aggregates, but the effects of different organic manures were distinct.

**Keywords:** organic manure; soil aggregates; soil organic carbon; humus composition; black soil

在全球气候变化背景下,提高农田土壤有机碳储量对于减缓温室效应以及促进农业可持续发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。土壤有机碳储量与其稳定性密切相关,而团聚体物理保护是土壤有机碳稳定的重要机制,同时团聚体有机碳也是评价土壤固碳的主要指标<sup>[2]</sup>。腐殖物质作为土壤有机质的主体(约占土壤有机质的60%~80%),在促进团聚体的形成与稳定中发挥着重要作用,由腐殖物质参与形成团聚体也是土壤固碳的重要机制<sup>[3]</sup>;另一方面,与团聚体结合的腐殖物质具有更高的稳定性<sup>[4]</sup>。因此,土壤团聚体物理分组与腐殖物质化学分组相结合物理-化学分组方法,已经引起了研究者的关注<sup>[5-7]</sup>。通过研究土壤团聚体内腐殖物质组分的分布,有助于深入揭示土壤有机碳的稳定性及其机制,为减缓温室效应及促进农业可持续发展提供依据。

已有研究<sup>[1]</sup>表明,施用有机肥是提高土壤肥力的重要措施。有机肥施用不仅能提高土壤中有机碳及腐殖质碳含量<sup>[8]</sup>,而且也能增加土壤各级团聚体中有机碳及腐殖质碳含量<sup>[5-7,9]</sup>。另一方面,不同种类有机肥由于其组成和性质上的差异,必然导致施用后对土壤肥力的影响不同<sup>[10]</sup>。从已有研究<sup>[5-7]</sup>来看,目前大多数研究只是报道了施用单一有机肥对土壤团聚体中腐殖质组成的影响,而比较不同种类有机肥施用效果的研究相对较少。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,但随着开垦年限的延长以及不合理施肥,导致黑土肥力下降和生产能力降低。为此,本研究基于黑土有机培肥定位试验,探讨了不同种类有机肥施用对土壤及不同粒级团聚体中总有机碳和腐殖质组分碳的影响,以期有效利用黑土资源以及促进农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地点位于吉林省农业科学院有机培肥定位试验基地(124°88' E, 42°40' N),属温带大陆性季风气候,试验区的年平均气温为5.6℃,年降水量为600 mm。土壤类型为发育于第四纪黄土状沉积物的典型黑土,该土壤的pH为5.7,有机碳含量13.3 g/kg,全氮含量1.39 g/kg,碱解氮含量130.4 mg/kg,速效磷含量7.50 mg/kg,速效钾含量176.1 mg/kg。供试有机

肥料为牛粪、猪粪、鸡粪和堆腐肥,取自附近的畜禽养殖场,机肥料的基本性质见表1。

表1 供试有机肥料的基本性质

有机肥料	pH	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N
牛粪	8.90	327.8	20.3	5.27	9.75	16.1
猪粪	7.99	254.7	17.3	17.50	13.60	14.7
鸡粪	7.91	149.4	12.6	15.60	8.45	11.9
堆腐肥	9.22	159.5	12.0	3.09	16.40	13.3

定位试验开始于2011年,共设置6个处理,即无肥(CK)、单施化肥(NPK)、NPK+牛粪、NPK+猪粪、NPK+鸡粪和NPK+堆腐肥。小区面积333 m<sup>2</sup>(10.4 m × 32 m),随机区组排列,每个处理重复3次。各试验小区的施肥量见表2。

表2 各试验小区化肥和有机肥施用量

处理	单位:kg/hm <sup>2</sup>			
	尿素 (N)	重过磷酸钙 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	硫酸钾 (K <sub>2</sub> O)	有机肥
CK	0	0	0	0
NPK	225	82.5	82.5	0
NPK+牛粪	225	82.5	82.5	10000
NPK+猪粪	225	82.5	82.5	10000
NPK+鸡粪	225	82.5	82.5	10000
NPK+堆腐肥	225	82.5	82.5	10000

2015年10月玉米收获后,分别采集各小区0-10,10-20,20-30,30-40 cm的原状土样,每个小区随机选取5个采样点,并将相同土层的样品混合均匀。采集的新鲜土样,沿自然裂隙轻轻掰开,使之全部通过10 mm孔径筛,然后风干。一部分样品用于土壤团聚体分析;其余样品进一步磨细过2,0.25 mm筛,用于土壤有机碳及其组分的测定。

### 1.2 测定方法

土壤有机碳采用重铬酸钾容量(外加热)法测定<sup>[11]</sup>;土壤腐殖质组成采用腐殖质组成修改法测定<sup>[12]</sup>,即先用蒸馏水提取水溶性组分(WSOC),然后用0.1 mol/L的NaOH+Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>混合液提取碱性腐殖质(HE),用0.05 mol/L的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液调节HE的pH为1,分离出胡敏酸(HA)和富里酸(FA),碱性不溶性残渣为胡敏素(HU)。土壤团聚体分级采用湿筛法,利用自动振荡筛将土壤分为大的大团聚体(>2,2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)<sup>[13]</sup>。

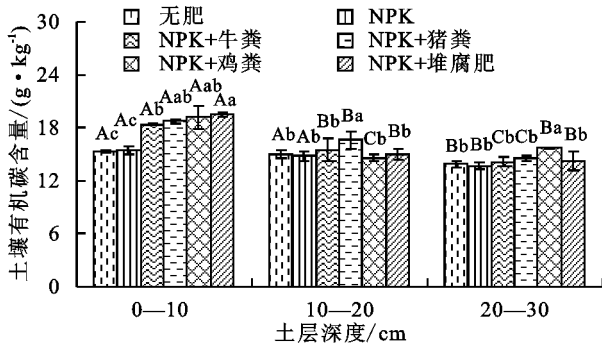
### 1.3 统计分析

数据整理与作图采用 Excel 2003 软件, 统计分析采用 DPS 7.5 软件。采用双因素方差分析考察不同土层深度、施肥处理及其交互作用对土壤有机碳含量的影响, 单因素方差分析考察同一土壤深度(0—10 cm)的不同施肥处理对土壤腐殖质碳含量以及各粒级团聚体有机碳和腐殖质碳含量的影响, 最小显著差(LSD)法进行多重比较(显著性水平为  $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

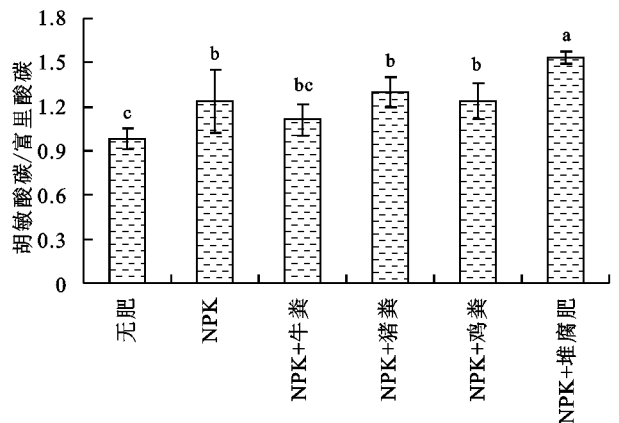
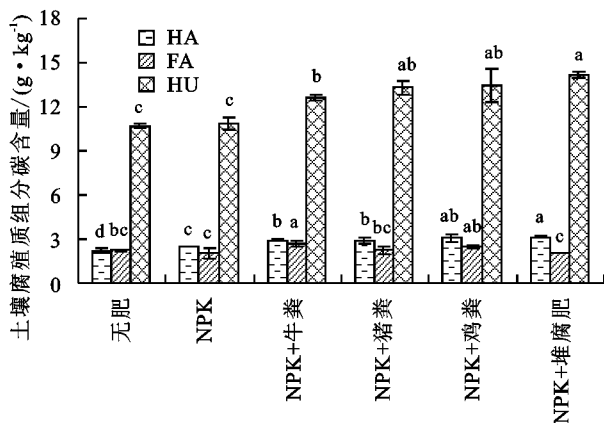
### 2.1 施用有机肥对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可知, 土壤有机碳含量随土层深度的增加逐渐降低。双因素方差分析结果表明, 不同施肥处理 ( $F=19.4, P=0.0001$ )、土层深度 ( $F=151.1, P=0.0001$ ) 以及两者的交互作用 ( $F=9.3, P=0.0001$ ) 对土壤有机碳含量都有显著的影响。



注: 不同大写字母表示相同处理不同土层有机碳含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示相同土层不同处理有机碳含量差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 施用有机肥对土壤有机碳含量的影响



注: 不同小写字母表示不同处理土壤腐殖质碳含量和胡敏酸碳/富里酸碳值差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 施用有机肥对土壤腐殖质碳含量及胡敏酸碳/富里酸碳值的影响

### 2.3 施用有机肥对团聚体有机碳含量的影响

由图 3 可知, 与 CK 相比, 单施化肥显著增加了  $>2$  mm 粒级团聚体有机碳含量, 而有机肥配施化肥后各粒级团聚体有机碳含量均显著增加。与单施化肥相比, 有机肥配施化肥也增加了各粒级团聚体有机碳含量, 其中  $>2, 2 \sim 0.25$  mm 粒级团聚体中,

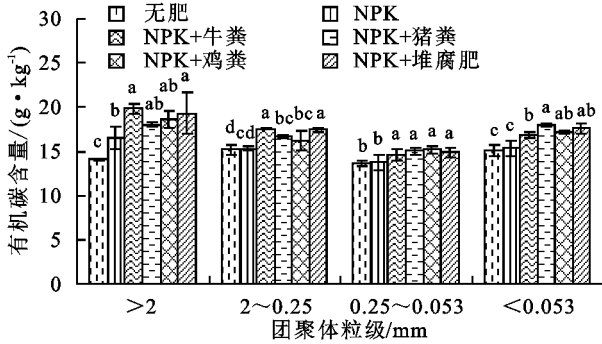
在 0—10 cm 土层, 与 CK 相比, 单施化肥对土壤有机碳含量没有显著的影响, 但有机肥配施化肥后土壤有机碳含量显著增加, 增加幅度分别为堆腐肥 (27.6%)  $>$  鸡粪 (25.6%)  $>$  猪粪 (22.5%)  $>$  牛粪 (20.2%), 其中堆腐肥与牛粪处理间差异显著; 同时, 有机肥配施化肥后, 土壤有机碳含量也显著高于单施化肥的处理。在 10—20 cm 土层, 施用猪粪后土壤有机碳含量显著高于其他处理; 而在 20—30 cm 土层, 施用鸡粪后土壤有机碳含量显著高于其他处理。

### 2.2 施用有机肥对土壤腐殖质碳含量的影响

由图 2 可知, 与 CK 相比, 单施化肥后胡敏酸碳 (HAC) 含量显著增加, 但富里酸碳 (FAC) 和胡敏素碳 (HUC) 含量没有显著的变化; 有机肥配施化肥后, HAC 和 HUC 含量显著增加。与单施化肥相比, 有机肥配施化肥后 HAC 和 HUC 含量显著增加。不同种类有机肥相比, HAC 含量的顺序为堆腐肥  $>$  鸡粪  $>$  牛粪  $>$  猪粪, 其中堆腐肥与牛粪、猪粪处理间差异显著; FAC 含量的顺序为牛粪  $>$  鸡粪  $>$  猪粪  $>$  堆腐肥, 其中牛粪与猪粪、堆腐肥处理间差异显著, 同时鸡粪与堆腐肥处理间也存在显著的差异; HUC 含量的顺序与 HAC 基本相同, 也为堆腐肥  $>$  鸡粪  $>$  猪粪  $>$  牛粪, 其中堆腐肥与牛粪处理间差异显著。与 CK 相比, 单施化肥后 HAC/FAC 值显著增加; 除牛粪外, 有机肥配施化肥后 HAC/FAC 值也显著增加。与单施化肥相比, 堆腐肥配施化肥后 HAC/FAC 值显著增加。不同种类有机肥相比, 施用堆腐肥后 HAC/FAC 值显著高于施用其他有机肥的处理。

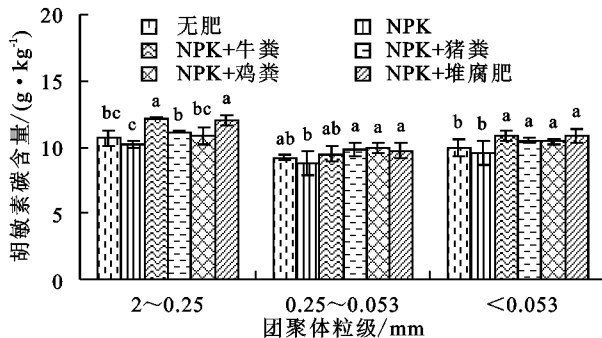
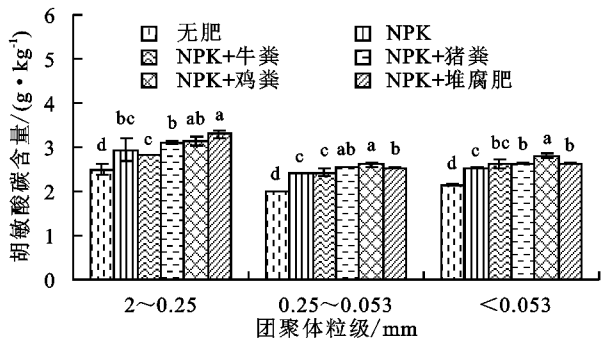
NPK 与牛粪和堆腐肥处理间差异显著; 而  $0.25 \sim 0.025, < 0.053$  mm 粒级团聚体中, NPK 与各有机肥处理间差异均达到了显著性水平。不同种类有机肥相比,  $>2, 0.25 \sim 0.053$  mm 粒级团聚体中, 有机碳含量没有显著的差异;  $2 \sim 0.25$  mm 粒级团聚体中, 牛粪和堆腐肥处理的有机碳含量显著高于鸡粪处

理;而 $<0.053$  mm 粒级团聚体中,猪粪处理的有机碳含量显著高于牛粪处理。



注:不同小写字母表示不同处理土壤团聚体有机碳含量差异显著( $P < 0.05$ )。

图 3 施用有机肥对不同粒级团聚体中有机碳含量的影响



注:不同小写字母表示不同处理土壤团聚体腐殖质组分碳含量和胡敏酸碳/富里酸碳比值差异显著( $P < 0.05$ )。

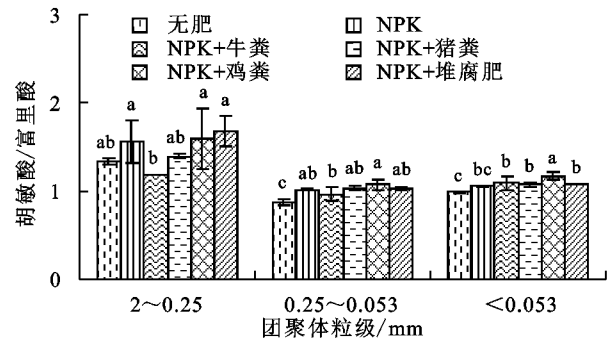
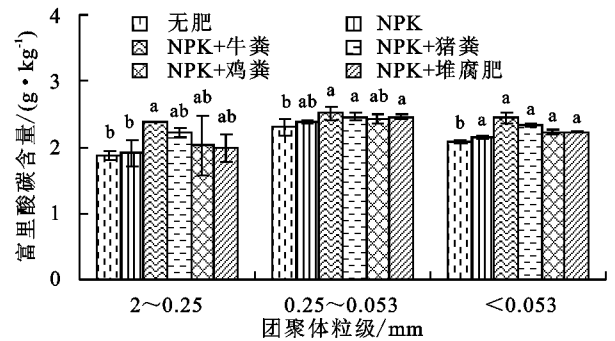
图 4 施用有机肥对土壤团聚体中腐殖质组分碳含量及胡敏酸碳/富里酸碳的影响

与单施化肥相比,有机肥配施化肥后各粒级团聚体中 HAC、FAC 和 HUC 含量通常都增加。2~0.25 mm 粒级团聚体中,堆腐肥处理的 HAC 含量显著增加,牛粪处理的 FAC 含量显著增加,牛粪、猪粪和堆腐肥处理的 HUC 含量显著增加;而 0.25~0.053,  $<0.053$  mm 粒级团聚体中,猪粪、鸡粪、堆腐肥处理的 HAC 和 HUC 含量均显著增加。

不同种类有机肥相比,2~0.25 mm 粒级团聚体中,牛粪处理的 HAC 含量显著低于其他有机肥处理,另外猪粪处理的 HAC 含量显著低于堆腐肥处理;牛粪和堆腐肥处理的 HUC 含量显著高于猪粪和鸡粪处理。0.25~0.053 mm 粒级团聚体中,牛粪处理的 HAC 含量显著低于其他有机肥处理,另外鸡粪处理的 HAC 含量显著高于堆腐肥处理。 $<0.053$  mm 粒级团聚体中,牛粪处理的 HAC 含量显著低于

## 2.4 施用有机肥对团聚体腐殖质碳含量的影响

由图 4 可知,与 CK 相比,单施化肥后各粒级团聚体中 HAC 含量均显著增加,同时也显著增加了 $<0.053$  mm 粒级团聚体中 FAC 含量,但对各粒级团聚体中 HUC 含量都没有显著的影响。有机肥配施化肥后,各粒级团聚体中 HAC、FAC 和 HUC 含量都增加,其中 2~0.25 mm 粒级团聚体中,各有机肥处理的 HAC 含量均显著增加,牛粪处理的 FAC 含量显著增加,牛粪和堆腐肥处理的 HUC 含量显著增加;0.25~0.053 mm 粒级团聚体中,各有机肥处理的 HAC 含量均显著增加,牛粪、猪粪和堆腐肥处理的 FAC 含量显著增加; $<0.053$  mm 粒级团聚体中,各有机肥处理的 HAC、FAC 和 HUC 含量均显著增加。



鸡粪处理。从 HAC/FAC 值的变化来看,与 CK 相比,单施化肥后各粒级团聚体的 HAC/FAC 值均增加,且在 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中差异达到了显著水平;有机肥配施化肥后各粒级团聚体的 HAC/FAC 值通常也增加,且在 0.25~0.053,  $<0.053$  mm 粒级团聚体中达到了显著性水平。与单施化肥相比,有机肥配施化肥后,牛粪处理显著降低了 2~0.25 mm 粒级团聚体的 HAC/FAC 值,而鸡粪处理则显著增加了 $<0.053$  mm 粒级团聚体的 HAC/FAC 值。不同种类有机肥相比,2~0.25 mm 粒级团聚体中,鸡粪和堆腐肥处理的 HAC/FAC 值显著大于牛粪处理;0.25~0.053 mm 粒级团聚体中,鸡粪处理的 HAC/FAC 值显著大于牛粪处理;而 $<0.053$  mm 粒级中,鸡粪处理的 HAC/FAC 值显著大于其他有机肥处理。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机碳含量

本研究结果表明,土壤有机碳含量随土层深度的增加而降低(图 1)。这是由于施入的有机肥料和作物残茬大多进入表层土壤,因此显著提高了表层土壤有机碳的含量<sup>[14]</sup>。以往对于黑土的研究<sup>[14-15]</sup>表明,单施化肥对土壤有机碳含量不会产生显著的影响,这与我们的研究结果(图 1)是一致的。Yang 等<sup>[15]</sup>认为,在缺少地上作物秸秆还田的条件下,单施化肥不足以维持黑土耕层土壤的有机碳含量。有机肥配施化肥后,土壤有机碳含量显著增加(图 1),这一方面是由于有机肥本身含有一定数量的有机碳,因此施用后增加了土壤有机碳含量;另一方面,有机肥与化肥配施能提高作物产量,作物根茬的进入也有利于土壤有机碳的积累<sup>[16-17]</sup>。

#### 3.2 土壤腐殖质碳含量

本试验中,有机肥配施化肥后土壤腐殖质组分的碳含量通常增加(图 2),温延臣<sup>[8]</sup>对潮土长期定位监测试研究也表明,与不施肥处理相比,长期施肥(化肥、有机肥或有机肥配施化肥)显著增加了耕层土壤 HAC 和 FAC 的含量。这是因为,有机肥中含有一定数量的类腐殖质组分<sup>[18]</sup>,同时有机肥分解过程中会形成一定数量的腐殖质<sup>[19]</sup>,从而使得施用有机肥后土壤腐殖质组分的碳含量增加。HAC/FAC 值可以作为评价土壤腐殖化程度的指标,该值越大说明土壤的腐殖质程度越高<sup>[12]</sup>。与 CK 相比,单施化肥以及有机肥配施化肥条件下,HAC/FAC 值均增加,说明施肥有利于土壤腐殖质程度的提高。

不同种类有机肥相比,施用堆腐肥后 HAC 和 HUC 含量高于其他有机肥处理,而 FAC 含量低于其他有机肥处理(图 2),导致堆腐肥处理的 HAC/FAC 值显著高于其他有机肥处理。这是因为,堆肥过程促进了 FA 的分解<sup>[20]</sup>,同时部分新形成的 FA 能被微生物转化为 HA<sup>[21]</sup>,即堆肥过程有利于 HA 的形成,这导致堆肥施用增加了土壤的腐殖化程度<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 不同粒径团聚体有机碳含量

由于大团聚体是由微团聚体通过有机质胶结而形成的,因此大团聚体( $>0.25$  mm)中有机碳含量高于微团聚体( $<0.25$  mm)(图 3),说明大团聚体在土壤有机碳的储存和固持方面起着重要作用<sup>[22]</sup>。一般认为,有机碳主要分配在  $2\sim 0.25$  mm 的大团聚体上<sup>[6,23]</sup>,但本研究中以  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径团聚体的有机碳含量最低(图 3),这可能是由于 $<0.053$  mm 的粉黏粒颗粒较小、比表面积较大,能固定更多的有机碳,导致其有机碳含量高于  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径团聚体<sup>[24]</sup>。

本研究中,与 CK 处理相比,无论单施化肥还是有机肥配施化肥,均不同程度提高了各粒径团聚体中

有机碳含量,同时有机肥配施化肥比单施化肥的提高幅度更大(图 3)。岳会锦<sup>[24]</sup>通过对灌耕灰漠土定位试验研究表明,施肥能增加各粒径团聚体有机碳含量,而且有机肥配施化肥处理的增加幅度高于单施化肥处理,这与本研究结果一致。不同粒径团聚体之间,大团聚体( $>0.25$  mm)有机碳含量的增加幅度高于微团聚体( $<0.25$  mm)(图 3),说明新增的有机碳主要富集在大团聚体中。刘恩科等<sup>[22]</sup>研究也表明,长期有机肥配施化肥增加了各粒径团聚体有机碳含量,且大团聚体( $>0.25$  mm)有机碳含量的增加最为显著。另外,本研究还表明,不同粒径团聚体有机碳含量的增加幅度取决于所施用有机肥的种类,施用牛粪和堆腐肥主要增加了大团聚体( $>0.25$  mm)有机碳含量,施用鸡粪主要增加了  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径团聚体的有机碳含量,而施用猪粪则主要增加了 $<0.053$  mm 团聚体的有机碳含量(图 3)。已有研究<sup>[22,25]</sup>也表明,施用厩肥(牛厩肥或猪厩肥)显著增加了水稳性大团聚体有机碳含量。从几种供试有机肥料本身的性质来看,牛粪属于冷性肥料,而猪粪和鸡粪属于热性肥料,这可能导致有机肥料分解时土壤微生物活性和区系的不同,进而影响到有机碳在不同粒径团聚体中的分布。已有研究<sup>[25]</sup>认为,土壤微生物活性较低会抑制有机胶结物质的释放,从而无法较快地促进微团聚体胶结形成大团聚体。但具体的原因尚有待进一步探讨。

#### 3.4 不同粒径团聚体腐殖质碳含量

施用有机肥后,HAC 和 HUC 含量以大团聚体中最高而微团聚体中最低(图 4)。Bongiovanni 等<sup>[4]</sup>对森林和耕地土壤的研究表明,大团聚体内 HAC 含量高于微团聚体;关松等<sup>[7]</sup>对黑土的研究也表明,施用玉米秸秆后  $2\sim 0.25$  mm 大团聚体内 HAC 含量高于其他粒径团聚体,这些与本研究结果都是一致的。按照土壤团聚体的多级形成理论<sup>[26]</sup>,大团聚体是由更小粒径的微团聚体通过各种有机胶结剂结合而成。腐殖物质本身就是参与团聚体形成的一种重要的胶结物质<sup>[27]</sup>,因此大团聚体内的腐殖质含量要高于微团聚体,这与团聚体形成的层次性机制是相吻合的。

与 CK 相比,有机肥配施化肥后,均提高了各级团聚体中腐殖质组分碳含量(图 4)。Lugato 等<sup>[5]</sup>研究也表明,与不施肥和单施化肥相比,有机肥(猪粪或堆肥)配施化肥能增加土壤不同粒径团聚体中腐殖质组分的碳含量。从不同种类有机肥来看,堆腐肥施用更有利于大团聚体( $2\sim 0.25$  mm)中 HA 的形成,鸡粪施用更有利于微团聚体( $<0.25$  mm)中 HA 的形成,而牛粪则通常有利于各粒径团聚体中 FA 的积累(图 4),这说明腐殖物质组分在团聚体中的分配特征与有机肥种类密切相关。梁尧<sup>[6]</sup>通过长期定位试验的研究也表明,有机肥种类决定着腐殖物质组分在团

聚体中的分配特征,猪粪配施化肥显著增加了各粒级团聚体中 HA 和 HU 的含量,而秸秆配施化肥则更有利于各粒级团聚体中 FA 的积累。

## 4 结论

(1)与不施肥和单施化肥相比,有机肥配施化肥后土壤有机碳、HAC 和 HUC 含量显著增加;同时,不同粒级团聚体中有机碳和腐殖质碳含量也增加,其中施用堆腐肥显著增加了各粒级团聚体中有机碳、HAC 和 HUC 含量。

(2)不同种类有机肥相比,施用堆腐肥后土壤有机碳及 $>0.25$  mm 粒级团聚体有机碳含量均高于其他有机肥处理;同时,施用堆腐肥后 $2\sim 0.25$  mm 粒级团聚体中 HAC 和 HUC 含量显著高于猪粪处理,而 $0.25\sim 0.053$ , $<0.053$  mm 粒级团聚体中 HAC 含量显著低于鸡粪处理。

(3)有机肥配施化肥提高了土壤团聚体中有机碳和腐殖质碳含量,但不同有机肥的效应不同。

### 参考文献:

- [1] Pan G X, Smith P, Pan W N. 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] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils [J]. *Geoderma*, 2015, S243/244: 205-213.
- [3] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418.
- [4] 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(3/4): 660-665.
- [5] 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(3): 80-85.
- [6] 梁尧. 有机培肥对黑土有机质消长及其组分与结构的影响[D]. 哈尔滨:中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2012.
- [7] 关松,郭绮雯,刘金华,等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体胡敏酸数量和质量的的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(4): 437-444.
- [8] 温延臣. 不同施肥制度潮土养分库容特征及环境效应[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.
- [9] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828-838.
- [10] He Z, Pagliari P H, Waldrip H M. Applied and environmental chemistry of animal manure: A review [J]. *Pedosphere*, 2016, 26(6): 779-816.
- [11] 鲁如坤. 土壤农化分析手册[M]. 3版. 北京:农业出版社, 2000.
- [12] Zhang J, Hu F, Li H, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 51(6): 1-8.
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in Aggregates from cultivated and grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1071-1076.
- [14] 解丽娟,王伯仁,徐明岗,等. 长期不同施肥下黑土与灰漠土有机碳储量的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 98-105.
- [15] Yang X, Zhang X, Fang H, et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: Roth C model simulations [J]. *Environmental Management*, 2003, 32(4): 459-465.
- [16] 李平儒,任卫东,李志军,等. 长期施肥管理对壤土全碳和易氧化有机碳的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 194-201.
- [17] 张艺,尹力初,戴齐. 后续施肥措施改变对红壤性水稻土团聚体有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 278-283.
- [18] Senesi N, Plaza C, Brunetti G, et al. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendment and effects on native soil humic substances [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(6): 1244-1262.
- [19] 龚伟,颜晓元,王景燕,等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1245-1252.
- [20] 王玉军,窦森,张晋京,等. 农业废弃物堆肥过程中腐殖质组成变化[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(8): 79-81.
- [21] 唐璐. 不同堆肥条件对堆肥过程中碳素损失及腐殖质形成的影响研究[D]. 杭州:杭州师范大学, 2016.
- [22] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [23] 徐文静,丛耀辉,张玉玲,等. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 210-215.
- [24] 岳会锦. 滴灌农田施用有机肥对土壤有机碳组分与土壤团聚体的影响[D]. 新疆 石河子:石河子大学, 2014.
- [25] 刘振东,李贵春,周颖,等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2239-2245.
- [26] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. *Geoderma*, 2011, 161(3): 182-193.
- [27] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1): 3-22.