

DOI: 10.5846/stxb201802220376

苑亚茹, 邹文秀, 郝翔翔, 李娜, 尤孟阳, 韩晓增. 黑土团聚体结合碳对不同有机肥施用量的响应. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Yuan Y R, Zou W X, Hao X X, Li N, You M Y, Han X Z. Response of aggregate-associated carbon in Mollisols to application rate of organic manure. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

黑土团聚体结合碳对不同有机肥施用量的响应

苑亚茹^{1,2}, 邹文秀², 郝翔翔², 李娜², 尤孟阳², 韩晓增^{2,*}

1 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

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, 哈尔滨 150081

摘要:以连续 11 年化肥配施不同剂量有机肥的黑土为研究对象, 采用团聚体分组与闭蓄态微团聚体分离技术, 研究土壤团聚体及其内部组分有机碳对不同有机肥施用量的响应, 以期从团聚体尺度揭示黑土有机碳的物理稳定性机制。试验设置 4 个处理: OM0, 仅施化肥; OM1, 低量有机肥 ($7.5 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) + 化肥; OM2, 中量有机肥 ($15 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) + 化肥; OM3, 高量有机肥 ($22.5 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) + 化肥, 各处理化肥用量相同。结果显示, 与单施化肥相比, 有机培肥处理土壤有机碳水平均有显著提升, 低量、中量和高量有机肥处理分别提高了 7.1%、12.4% 和 15.7%。有机培肥促进了土壤的团聚化作用, 随着有机肥施用量的增加, 250—2000 μm 团聚体含量增加, 粉粘粒含量降低, 土壤团聚体的稳定性增强, 但与中量有机肥相比, 高量有机肥输入对土壤团聚化的作用并不明显。有机培肥加速了土壤大团聚体的周转, 大团聚体周转速率随着有机肥施用量的增加而加快。有机肥输入并未影响粉粘粒结合有机碳浓度, 表明在无有机肥投入的传统管理措施下, 黑土粉粘粒已接近或达到碳饱和水平。随着有机肥输入的增加, 微团聚体有机碳小幅增加, 大团聚体有机碳增加趋势明显, 而当有机肥用量最大时, 微团聚体有机碳无显著变化, 仅大团聚体有机碳仍继续增加, 表明高量有机肥投入下微团聚体有机碳库已达到饱和, 而更多的新增碳流向大团聚体。对大团聚体内部组分解析发现, 高量有机肥处理下大团聚体有机碳的增加主要归因于粗颗粒有机质的增加。这些结果表明, 黑土团聚体对有机碳的固持存在由小到大的等级饱和和机制, 随着有机肥输入的增加, 粉粘粒最先达到饱和, 然后是微团聚体, 而更多的新增碳向周转不断加速的大团聚体富集, 固持在活性相对较强的有机碳库—粗颗粒有机质之中。

关键词:碳饱和; 水稳性团聚体; 有机肥施用量; 长期定位试验; 黑土

Response of aggregate-associated carbon in Mollisols to application rate of organic manure

YUAN Yaru^{1,2}, ZOU Wenxiu², HAO Xiangxiang², LI Na², YOU Mengyang², HAN Xiaozeng^{2,*}

1 College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China

Abstract: This study used fractionation of aggregates and microaggregate-within-macroaggregate techniques to determine the organic carbon (C) content in aggregates and subfractions within aggregates of Mollisols after 11 years of continuous manuring in combination with mineral fertilizers. We aimed to explore the physical protection mechanisms of organic C stabilization of Mollisols at the soil aggregate level. The following four treatments were selected: OM0, only mineral fertilizers with no manure application; OM1, organic manure at the lowest level (7.5 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers; OM2, organic manure at the medium level (15 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers; and OM3, organic manure at the highest level (22.5 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers. Chemical fertilizers were applied at the same rate in each

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41601316); 黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2018184); 哈尔滨师范大学科技创新能力计划项目(xkb201309); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300802)

收稿日期: 2018-02-22; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzhan@iga.ac.cn

treatment. We found that organic manuring at various rates in combination with mineral fertilizers significantly enhanced the soil organic C (SOC) content. The SOC content in the OM1, OM2, and OM3-treated Mollisols was increased by 7.1%, 12.4%, and 15.7%, respectively, compared to that with OM0 treatment. Organic fertilization greatly facilitated the macroaggregation processes and enhanced the aggregate stability compared with OM0 treatment. The proportion of small macroaggregates (250—2000 μm) increased, whereas the proportion of the silt-plus-clay fraction decreased in response to an increase in the organic manure addition rates. However, there was no significant difference between the OM2 and OM3 treatments in the weight proportion of aggregates or their mean weight diameters. The turnover rate of macroaggregates increased with an increase in the application rates of organic manure. Organic manuring did not affect the C concentration of the silt-plus-clay fraction, which indicated that the silt and clay particles had approached or reached the C saturation level under the traditional management practices without organic manure input. An increase in the organic manure input slightly increased microaggregate C and significantly increased macroaggregate C. When organic manure was supplied at the highest level, microaggregate C did not change significantly, and only macroaggregate C continued to increase, which indicated that the microaggregate C pool had reached saturation and that additional C was sequestered in macroaggregates. Physical separation of the macroaggregates into subfractions showed that the increase of organic C in macroaggregates was mainly attributable to the increase of coarse particulate organic matter in macroaggregates (coarse iPOM). These results suggested that C saturation occurred in a hierarchical fashion in a Mollisol. As the C input increased, the silt-plus-clay C pool saturated before the microaggregate C pool and, consequently, additional C input only accumulated in a relatively labile C pool, the coarse iPOM within macroaggregates, which has a relatively faster turnover rate.

Key Words: carbon saturation; water-stable aggregate; manure application rate; long-term experiment; black soil

作为地球陆地生态系统中最重要和活跃的碳库,农田土壤有机碳深刻影响着大气 CO_2 浓度、土壤肥力及其生态功能,因此,通过合理的管理措施提高农田土壤碳截留,对于缓解气候变化和保障粮食安全具有双重意义^[1]。大量研究显示,有机肥的施用可以有效地提高农田土壤有机碳的水平^[2-4],土壤有机碳含量随着有机肥输入量的增加呈线性增加^[5-6]。然而一些研究显示,在某些土壤,尤其是有机碳含量高的土壤,有机碳含量并没有随着有机碳输入量的增加而显著的变化,而是稳定在某一特定值^[7-9]。表明,土壤对有机碳的固持并非无限度增加,而是存在阈值,即碳饱和水平,一旦达到此值,即使向土壤输入再多的碳,土壤有机碳含量也不会继续增加。因此,研究某种土壤有机碳对有机肥输入量的响应对于评价其碳汇功能大小与固碳潜力具有重要的意义。

土壤有机碳可分为具有不同周转周期和生物稳定性的有机碳组分。土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护是土壤有机碳稳定的重要机制^[10],目前基于团聚体分组的物理分级方法广泛应用于土壤有机碳的动态研究^[11-12]。由于不同粒径团聚体胶结物质和作用强度不同,因此,不同级别团聚体中有机碳受到的保护程度和能力也不同。一般而言,粉粘粒比大团聚体和微团聚体更具稳定性,但固持有机碳的能力有限^[13];大团聚体固持有机碳的能力高于微团聚体,但稳定性稍差,易受农田管理措施等外界环境条件变化的影响;微团聚体固持有机碳的能力较小,但较大团聚体稳定^[14]。由于大团聚体和微团聚体自身稳定性的差异,大团聚体中粗颗粒有机质稳定性相对较差^[15],微团聚体,尤其是闭蓄态微团聚体中细颗粒有机质稳定性相对较强^[16]。因此,定量研究土壤团聚体及其内部组分有机碳的变化将有助于理解不同管理措施下土壤有机碳的变化及潜在机制。

东北黑土富含有机质,潜在肥力高,是我国重要的商品粮生产基地。然而,过去几十年来由于掠夺式的经营加之不合理的管理措施,如秸秆移除农田和无外源有机肥的投入等,导致黑土有机碳含量显著下降^[17]。这不仅严重影响和制约了粮食生产,同时造成黑土对大气 CO_2 “源/汇”效应的改变。研究表明,有机培肥能够促进土壤的团聚化作用,提升农田黑土有机碳的水平^[18-19]。然而,目前对于有机碳含量高的黑土,土壤团聚

体及其内部组分有机碳对不同有机肥输入量的响应尚不清楚。因此,本研究以连续 11 年不同有机肥用量(0、7.5、15 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 22.5 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) 的长期定位试验为平台,定量研究不同有机肥施用量下农田黑土团聚体结合有机碳的变化,以期从团聚体尺度揭示黑土有机碳的物理稳定性机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验位于黑龙江省海伦市海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站(47°26'N, 126°38'E),地处我国东北黑土带的中心区域。该区域属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季。年均气温 1.5℃,年均降水量 550 mm,65%集中在 6—8 月。土壤为第四纪黄土状亚粘土发育而成的中厚黑土。土壤质地比较粘稠,耕层土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 258、332 g/kg 和 410 g/kg。

1.2 试验设计与样品采集

长期定位试验始于 2001 年,研究选择以下 4 个施肥处理:① OM0,不施有机肥,仅施化肥 NPK;② OM1,低量有机肥(7.5 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥 NPK;③ OM2,中量有机肥(15 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥 NPK;④ OM3,高量有机肥(22.5 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥 NPK,有机肥用量以烘干基计,各处理化肥用量相同。每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积为 12 m×5.6 m。作物种植方式为玉米-大豆轮作,一年一熟制。化肥施用量为:玉米 120 kg N/hm²、60 kg P₂O₅/hm²、30 kg K₂O/hm²;大豆 20 kg N/hm²、52 kg P₂O₅/hm²、30 kg K₂O/hm²。肥料种类为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。大豆和玉米基肥的施用方式均采用条施,大豆不追肥,玉米的追肥方式为穴施。有机肥为腐熟后的猪粪,C、N 含量(以烘干基计)分别为 265 g/kg 和 21 g/kg,于每年秋收后撒施,然后机械翻耕进入土壤。采用传统耕作方式,耕作深度约为 20 cm,秋季作物收获后地上部秸秆全部移除。土壤样品于秋季作物收获后、有机肥施用前采集,采样深度为 0—20 cm,每个试验小区按 S 形布设 5 个取样点,然后将土壤样品均匀混合为 1 个混合土样,用硬纸盒将土样带回实验室,手动剔除砾石、侵入体及粗有机体。当土块含水量达到塑限时,用手把大土块沿自然破碎面扳开,待样品完全风干后,备用。试验初始土壤的理化性质如下:有机碳 28.0 g/kg,全氮 2.1 g/kg,全磷 0.72 g/kg,全钾 21.2 g/kg。

1.3 测试与分析方法

土壤样品分级参考 Yan 等^[20]的方法。第一步:采用湿筛法将土壤样品筛分为 4 个粒级:>2000 μm 团聚体、250—2000 μm 团聚体、微团聚体(m, 53—250 μm)和粉黏粒(S&C, <53 μm);第二步:按全土>2000 μm 团聚体和 250—2000 μm 团聚体的质量百分比称取大团聚体(M, >250 μm)15 g,采用微团聚体分离装置将大团聚体分离得到粗颗粒有机质(coarse iPOM)、闭蓄态微团聚体(mM)和粉粘粒(S&C_M)3 个组分;第三步:采用 0.5%六偏磷酸钠溶液分离闭蓄态微团聚体(mM),得到细颗粒有机质(fine iPOM)和粉粘粒(S&C_mM)2 个组分。各步筛分得到的所有组分于 60℃烘干称重。

1.4 数据处理与统计分析

土壤全土、团聚体及团聚体内部组分有机碳采用元素分析仪测定(Heraeus Elementar Vario EL, Hanau, Germany);采用平均重量直径(Mean Weight Diameters, MWD)作为评价团聚体稳定性指标^[14];不同处理间的差异显著性通过 SPSS 16.0 采用 LSD 法进行统计分析,显著性检验设 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳

与 OM0 相比,有机培肥处理土壤有机碳含量均有显著提高,OM1、OM2、OM3 分别提高了 7.1%、12.4% 和 15.7%(图 1)。OM3 土壤有机碳含量显著高于 OM1,但 OM2 与 OM3 或与 OM1 差异并不显著。

2.2 土壤团聚体组成与稳定性

不同有机肥施用量并没有显著影响>2000 μm 团聚体和微团聚体的含量,但对 250—2000 μm 团聚体和

粉粘粒含量影响明显(图2)。随着有机肥施用量的增加,250—2000 μm 团聚体含量呈增加趋势,粉粘粒含量相应呈下降趋势。OM0、OM1、OM2和OM3处理土壤水稳性团聚体的平均重量直径分别为0.48、0.50、0.57 mm和0.59 mm(图3)。可见,与单施化肥相比,有机培肥明显促进了土壤的团聚化作用,随着有机肥施用量的增加,土壤团聚体的平均重量直径增大,土壤团聚体稳定性增强,但中量与高量有机肥处理土壤各粒径团聚体的质量分数和平均重量直径均没有显著差异(图2和图3)。

2.3 土壤团聚体中有机碳的分布

各处理土壤团聚体有机碳浓度均为[>2000 μm 团聚体]>[250—2000 μm 团聚体]>[53—250 μm 微团聚体]>[<53 μm 粉粘粒],即团聚体有机碳浓度随团聚体粒径增大而增加(图4)。有机肥的施用并没有显著影响粉粘粒结合有机碳浓度(19.0—19.8 g C/kg粉粘粒);随着有机肥施用量的增加,大团聚体(>250 μm),尤其>2000 μm 团聚体中有机碳浓度增加趋势明显,微团聚体中有机碳浓度呈小幅度增加,而当有机肥施用量最大时,微团聚体中有机碳无显著变化,仅大团聚体有机碳仍继续增加。

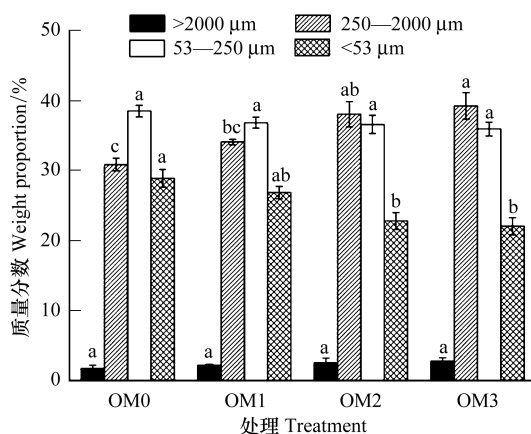


图2 不同有机肥施用量对土壤水稳性团聚体质量分数的影响

Fig.2 Weight proportion of water-stable aggregates of soils across four manure application rate treatments

2.4 大团聚体内部组分有机碳含量

研究将各处理大团聚体(>250 μm)进一步筛分为粗颗粒有机质、闭蓄态微团聚体和粉粘粒3个组分(图5),以分析新增碳在大团聚体中的分配效应。由图可见,各处理粉粘粒中有机碳含量并没有显著变化,粗颗粒有机质和闭蓄态微团聚体中有机碳含量随着有机肥施用量的增加呈增加趋势,但响应程度不同。闭蓄态微团聚体中有机碳含量对不同有机肥施用量的响应相对较小,有机培肥处理显著高于单施化肥处理,但低量、中量和高量有机肥处理间没有显著差异;粗颗粒有机质中有机碳含量增加则较为明显,OM1、OM2和OM3处理

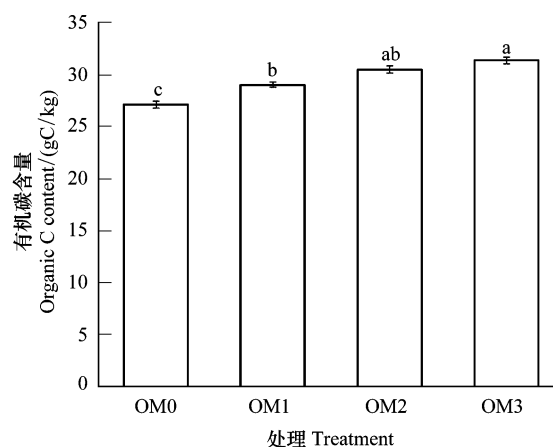


图1 不同有机肥施用量对土壤总有机碳含量的影响

Fig.1 Total organic C content of soils across four manure application rate treatments

OM0:无有机肥,仅施化肥, only mineral fertilizers with no manure application; OM1:低量有机肥(7.5 Mg $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥, organic manure at the lowest level (7.5 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers; OM2:中量有机肥(15 Mg $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥, organic manure at the medium level (15 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers; OM3:高量有机肥(22.5 Mg $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 化肥, organic manure at the highest level (22.5 Mg/ha/year) plus mineral fertilizers

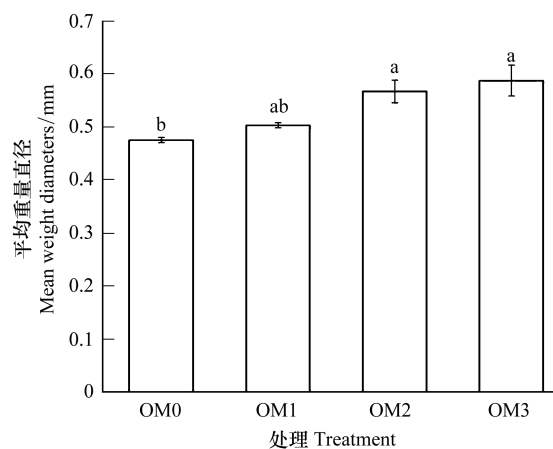


图3 不同有机肥施用量对土壤水稳性团聚体平均重量直径的影响

Fig.3 The mean weight diameters (MWD) of water-stable aggregates of soils across four manure application rate treatments

土壤粗颗粒有机质中有机碳较 OM0 分别增加了 1.8 倍、2.1 倍和 2.3 倍。当有机肥施用量达到最高时,仅粗颗粒有机质中有机碳含量升高,其他组分有机碳含量均无显著变化。

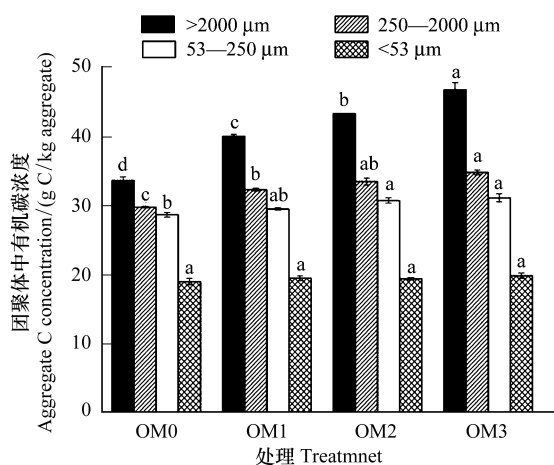


图4 不同有机肥施用量对土壤团聚体中有机碳浓度的影响
Fig.4 Aggregate associated carbon concentration of soils across four manure application rate treatments

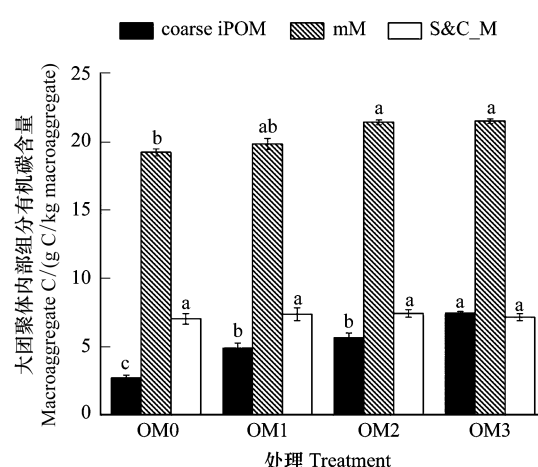


图5 不同有机肥施用量对大团聚体内部组分有机碳含量的影响
Fig.5 Carbon content of subfractions within macroaggregates of soils across four manure application rate treatments

coarse iPOM:大团聚体中粗颗粒有机质, coarse particulate organic matter in macroaggregate; mM:闭蓄态微团聚体, microaggregate in macroaggregate; S&C_M:大团聚体中粉黏粒组分, silt and clay particles in macroaggregate

2.5 大团聚体的周转

大团聚体中细颗粒有机质与粗颗粒有机质的比值常作为评价大团聚体周转速率的指标^[11],比值越大,表明大团聚体周转越慢;相反,比值越小,表明大团聚体周转越快。如图6所示,与单施化肥相比,有机培肥处理显著降低了大团聚体中细颗粒有机质与粗颗粒有机质的比值,随着有机肥施用量增加,这一比值呈下降趋势。表明,有机培肥加速了土壤大团聚体的周转,土壤大团聚体周转速率随着有机肥施用量的增加而加快。

3 讨论

研究结果显示,与单施化肥相比,有机培肥处理农田黑土有机碳水平均有显著提升。研究区由于地上部秸秆全部移除农田,因此,有机肥和作物根茬是有机碳输入的主要来源。有机培肥处理土壤有机碳含量较高与有机肥施用及根茬输入量增加有关^[21]。这与一些长期定位试验的研究结果类似^[3-4]。Yousefi 等^[6]通过连续5年向土壤分别施用0、50、75 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和100 $\text{Mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 有机肥的试验显示,土壤有机碳含量随着有机肥施用量的增加而呈显著的线性增加。理论上土壤有机碳含量不可能随着外源有机碳的投入而无限度增长,任何一种土壤类型在其特定的自然气候条件和栽培模式下,均应达到自身相应的动态平衡点并在这一水平下保持相对稳定,即处于碳饱和状态。Campbell 等^[7]基于长达31年定位试验的结果显示,在有机碳含量丰富的土壤中,土壤有机碳含量并没有随着外源有机碳输入

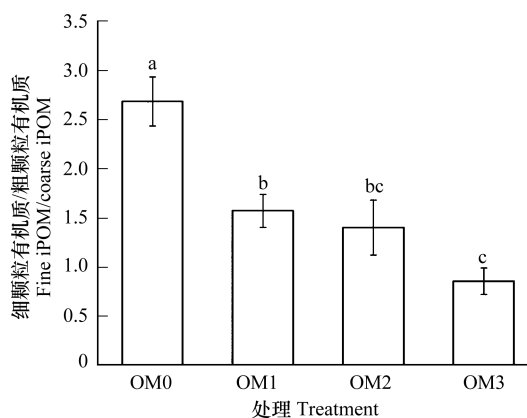


图6 大团聚体中细颗粒有机质与粗颗粒有机质的重量比
Fig.6 Weight ratio of fine inter-macroaggregate particulate organic matter to coarse inter-macroaggregate particulate organic matter (fine iPOM/coarse iPOM) of soils across four manure application rate treatments

增加而变化,而是稳定在某一特定水平。本研究结果显示,对于基础有机碳水平较高($>27\text{ g C/kg}$)的东北黑土,连续 11 年施用 22.5 Mg/hm^2 猪粪后,土壤有机碳含量仍呈现明显的增加趋势,表明黑土对有机碳的固持仍未达到最大容量,黑土黏粒含量较高($>40\%$)被认为黑土固碳容量较大的重要原因^[22]。关于东北黑土有机碳的饱和点,尚有待于进一步深入研究。

研究结果显示,有机培肥明显促进了土壤的团聚化作用,土壤大团聚体($>250\text{ }\mu\text{m}$),尤其是 $250\text{—}2000\text{ }\mu\text{m}$ 团聚体含量显著增加。东北黑土黏粒含量高且以 2:1 型黏土矿物为主^[23],有机物是 2:1 型黏土矿物有效且重要的胶结剂。外源有机肥的施用可以提供更多的有机胶结物质,同时增强土壤微生物活性和增加微生物的代谢产物如多糖等,进而促进了水稳性大团聚体的形成^[24]。大团聚体比例增加是土壤施用有机肥的一个普遍的特征^[3,25-26]。然而,本研究发现,当猪粪用量从 $0\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 增加至 $15\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,土壤大团聚体含量呈增加趋势,但猪粪用量由 $15\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 继续增加至 $22.5\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,土壤各粒级团聚体的质量分数与稳定性均没有发生显著变化。同样,Leon 等^[27]连续 4 年有机肥施用的试验结果显示,与低量有机肥($38\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)相比,高量有机肥($78\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)对土壤团聚化的促进作用并不明显。Xie 等^[28]基于 30 年的定位试验显示,与低量猪粪($13.5\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)相比,高量猪粪投入($27\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)反而降低了棕壤大团聚体的含量与稳定性。与之相反,Yousefi 等^[6]通过连续 5 年不同用量有机肥试验($0, 50, 75\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $100\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)研究显示,土壤团聚体的平均重量直径随着有机肥施用量的增加而呈显著的线性增加。土壤团聚体粒径分布与稳定性对有机肥用量的响应程度不同可能与外源有机肥投入的数量及质量、土壤类型、基础有机碳水平、试验年限等因素有关。

土壤团聚体处于不断的形成和破碎,即团聚体周转的过程,团聚体周转速率越慢,其保护有机质的能力越强,反之,周转越快,其保护有机质的能力相对较弱,团聚体中有机质活性相对较强。Six 等^[11]认为,随着新鲜植物残体输入土壤,真菌和其他微生物利用粗颗粒有机质(coarse iPOM)形成大团聚体,粗颗粒有机质可再进一步分解成细颗粒有机质(fine iPOM)。如果大团聚体周转慢,会有更多的细颗粒有机质形成,因此 fine iPOM 与 coarse iPOM 比值将会增加;相反,如果大团聚体周转快,会抑制细颗粒有机质的形成,比值将会下降。因此,将大团聚体中 fine iPOM 与 coarse iPOM 的比值作为评价大团聚体的周转速率的指标。本研究结果显示,有机培肥加速了大团聚体的周转,大团聚体的周转速率随着有机肥施用量的增加而加快(图 6)。同样,Gulde 等^[8]通过对连续 32 年施加不同量牛粪试验的研究发现,大团聚体中的 fine iPOM 与 coarse iPOM 的比值随着牛粪施用量的增加而下降,土壤大团聚体周转加速。刘中良等^[29]基于 8 年不同有机厩肥施用量的长期定位试验也得到了类似的结果。随着有机肥施用量的增加,微生物的活性增强,微生物会利用易降解的物质,如植物源的颗粒有机质和多糖等物质,作为其自身的能源物质。多糖作为土壤大团聚体的重要有机胶结物质,微生物对多糖的分解和利用会导致团聚体的破碎。同时,微生物在代谢时会产生新的多糖等胶结物质,这些物质会促进新的团聚体的形成。因此,当有机肥施用量增加时,大团聚体周转速率加快,成为土壤中相对活跃的物理保护性碳库。

农田黑土不同粒径团聚体有机碳浓度对不同有机肥施用量的响应不同。有机肥输入并没有显著影响粉黏粒结合有机碳浓度,表明在无外源有机肥输入的传统管理措施下,黑土粉黏粒组分已接近或达到碳饱和水平。同时研究发现,随着有机肥输入的增加,微团聚体有机碳呈小幅度增加趋势,而当有机肥输入量最大时,微团聚体有机碳浓度没有明显变化,仅大团聚体($>250\text{ }\mu\text{m}$)有机碳仍呈显著增加趋势(图 4),表明,高量有机肥投入下,微团聚体结合碳库已达到饱和水平,而更多的新增碳主要向大团聚体富集。通过对大团聚体内部组分有机碳含量进一步的解析发现(图 5),当外源有机肥输入量最大时,闭蓄态微团聚体和粉黏粒结合有机碳浓度均没有显著变化,仅粗颗粒有机质中有机碳呈显著增加,表明,高量有机肥投入下,大团聚体中有机碳的增加主要归因于粗颗粒有机质(coarse iPOM)的增加。Kool 等^[30]在团聚体层级发育模型基础上提出土壤有机碳的等级饱和模型,指出随着有机碳输入的增加,最小粒级的团聚体首先饱和,最大粒级的团聚体最后饱和,最终土壤碳库饱和。Gulde 等^[8]基于 32 年不同有机肥用量($0, 60, 120\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $180\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)的

定位试验验证了这一理论。本研究结果表明,黑土团聚体对有机碳的固持同样存在由小到大的等级饱和机制,随着有机碳输入的增加,粉粘粒结合有机碳最先达到饱和,然后是微团聚体,而更多的新增碳流向粒径相对较大的大团聚体,固持在粗颗粒有机质之中。

4 结论

与单施化肥相比,有机培肥处理土壤有机碳水平均有显著提升,土壤有机碳的增幅随着有机肥施用量的增加而增大。有机培肥促进了土壤的团聚化作用,随着有机肥施用量的增加,250—2000 μm 团聚体含量增加,粉粘粒含量降低,土壤团聚体的稳定性增强,但与中量有机肥处理相比,高量有机肥输入对土壤团聚化的作用并不明显。有机培肥加速了土壤大团聚体的周转,大团聚体周转速率随着有机肥施用量的增加而加快。黑土团聚体对有机碳的固持存在由小到大的等级饱和机制,随着有机碳输入的增加,粉粘粒结合有机碳最先达到饱和,然后是微团聚体,而更多的新增碳流向周转不断加快的大团聚体,固持在活性较强的有机碳库—粗颗粒有机质之中。

参考文献 (References):

- [1] 潘根兴,周萍,李恋卿,张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
- [2] 田康,赵永存,徐向华,黄标,孙维侠,史学正,邓文靖. 不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征——基于定位试验数据的 Meta 分析. 生态学报, 2014, 34(13): 3735-3743.
- [3] Jiang M B, Wang X H, Liusui Y H, Han C, Zhao C Y, Liu H. Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil. *Catena*, 2017, 149: 437-445.
- [4] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 59-66.
- [5] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, Denison R F, Van Kessel C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1078-1085.
- [6] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 57-61.
- [7] Campbell C A, Zentner R P, Bowren K E, Townley-Smith L, Schnitzer M. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 377-387.
- [8] Gulde S, Chung H, Amelung W, Chang C, Six J. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 605-612.
- [9] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1741-1750.
- [10] 刘满强,胡锋,陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [11] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [12] Li N, You M Y, Zhang B, Han X Z, Panakoulia S K, Yuan Y R, Liu K, Qiao Y F, Zou W X, Nikolaidis N P, Banwart S A. Modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices. *Advances in Agronomy*, 2017, 142: 181-214.
- [13] Hassink J, Whitmore A P. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 131-139.
- [14] Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1132-1139.
- [15] Bandyopadhyay P K, Saha S, Mani P K, Mandal B. Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 379-386.
- [16] Zotarelli L, Alves B J R, Urquiaga S, Boddey R M, Six J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1/2): 196-206.
- [17] 黄耀,孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2006, 51(7): 750-763.

- [18] Li H B, Han X Z, Wang F, Qiao Y F, Xing B S. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(13/14): 1673-1690.
- [19] 苑亚茹, 李禄军, 李娜, 尤孟阳, 韩晓增. 长期施肥对东北黑土不同活性有机碳库的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1435-1439.
- [20] Yan Y, Tian J, Fan M S, Zhang F S, Li X L, Christie P, Chen H Q, Lee J, Kuzyakov Y, Six J. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 150: 102-110.
- [21] Ding X L, Han X Z, Liang Y, Qiao Y F, Li L J, Li N. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 36-41.
- [22] Liu X B, Han X Z, Song C Y, Herbert S J, Xing B S. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(7/8): 973-984.
- [23] 郑庆福, 刘艇, 赵兰坡, 冯君, 王鸿斌, 李春林. 东北黑土耕层土壤黏粒矿物组成的区域差异及其演化. *土壤学报*, 2010, 47(4): 734-746.
- [24] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [25] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, Hwat B S, 李秀英, 李娟. 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. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [26] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 罗培宇, 戴健, 杨明超, 何蕊. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 924-932.
- [27] Leon M C C, Stone A, Dick R P. Organic soil amendments: Impacts on snap bean common root rot (*Aphanomyces euteiches*) and soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 199-210.
- [28] Xie H T, Li J W, Zhang B, Wang L F, Wang J K, He H B, Zhang X D. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14687.
- [29] 刘中良, 宇万太, 周桦, 马强. 不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1149-1157.
- [30] Kool D M, Chung H, Tate K R, Ross D J, Newton P C D, Six J. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282-1293.