

免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应

梁爱珍¹, 杨学明², 张晓平¹, 申艳^{1,3}, 时秀焕^{1,3}, 范如芹^{1,3}, 方华军⁴

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所, 中国长春 130012; ²加拿大农业与农业食品部温室与作物加工研究中心, 加拿大安大略 NOR 1G0; ³中国科学院研究生院, 中国北京 100049; ⁴中国科学院地理科学与资源研究所, 中国北京 100101)

摘要:【目的】探讨免耕措施下黑土总有机碳和水稳性团聚体中有机碳分配的动态变化, 以及免耕对团聚体结合碳和总有机碳之间相关关系的影响, 为筛选出免耕对黑土结构和质量影响的评价指标提供科学依据。【方法】以在吉林省德惠市中层黑土上进行了5年田间定位试验的小区土壤为研究对象, 对免耕(NT)、秋翻(MP)和耧作(RT)3种耕作处理下耕层(0~30 cm)黑土有机碳和团聚体结合碳的动态变化及其相互关系进行分析。【结果】5年的NT处理并没有增加耕层有机碳(SOC)平均含量, 但显著增加了表层(0~5 cm)的SOC含量, 增加量为2001年的9.9%。NT试验前后, 黑土总有机碳和>1 000 μm级团聚体结合碳变化趋势一致, 总有机碳除在表层(0~5 cm)变化显著外, 其它土层变化均不明显, 但>1 000 μm级团聚体结合碳各层均有显著变化, 说明>1 000 μm级团聚体结合碳对耕作方式的响应较总有机碳更为敏感。相关分析表明, NT处理下黑土总有机碳与>1 000 μm级团聚体结合碳之间存在显著的正相关关系。【结论】黑土>1 000 μm级团聚体可以用于评价免耕对黑土结构和肥力的短期影响。

关键词: 免耕; 土壤有机碳; 水稳性团聚体; 黑土

Short-Term Impacts of No Tillage on Soil Organic Carbon Associated with Water-Stable Aggregates in Black Soil of Northeast China

LIANG Ai-zhen¹, YANG Xue-ming², ZHANG Xiao-ping¹, SHEN Yan^{1,3}, SHI Xiu-huan^{1,3},
FAN Ru-qin^{1,3}, FANG Hua-jun⁴

(¹Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; ²Greenhouse and Processing Crops Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Ontario, NOR 1G0, Canada; ³Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: 【Objective】 In order to get a good indicator to evaluate the impacts of no tillage (NT) on soil structure and soil quality, the dynamics of total soil organic carbon (SOC) and SOC associated with aggregates, and the relationships between total SOC and aggregate-associated SOC in the plow layer (30 cm) in black soil in Northeast China under NT practice were studied. 【Method】 The tillage experiment was established in Dehui County, Jilin Province in 2001. The total SOC and aggregate-associated SOC in 5-year tillage treatments were measured. 【Result】 NT practices did not lead to increase of average SOC content at 0-30 cm depth, but it did significantly increase SOC at the top soil (0-5 cm). In NT plot, the change trend of SOC in >1 000 μm aggregate was the same with that of total SOC, but the effect of NT on SOC in >1 000 μm aggregate was greater than the effect on total SOC, suggesting that >1 000 μm aggregate had more sensitive response to the impact of tillage practices. Significant positive correlation occurred between total SOC and SOC in >1 000 μm aggregate in black soil. 【Conclusion】 In the short term soil macroaggregate >1 000 μm could be used as an indicator to evaluate the impacts of tillage practices on soil structure and soil fertility in black soil in Northeast China.

收稿日期: 2008-12-02; 接受日期: 2009-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801071)、“十一五”科技支撑项目(2006BAD15B01)、中国科学院东北地理与农业生态研究所前沿领域项目(KZCX3-SW-NA3-31)、青年博士基金项目(O8H2041)

作者简介: 梁爱珍(1979—), 女, 山西交城人, 博士, 研究方向为土壤管理和土壤有机质。Tel: 0431-85542234; E-mail: aizhenliang@hotmail.com。通信作者张晓平(1957—), 男, 吉林长春人, 研究方向为土壤管理与土壤化学。Tel: 0431-85542234; E-mail: zhangxiaoping@neigae.ac.cn

Key words: no tillage; soil organic carbon; water-stable aggregate; black soil

0 引言

【研究意义】长期采用传统耕作方式容易引起土壤崩解或板结或侵蚀。当地表覆盖物较少时, 侵蚀造成的土壤流失多半在播种期间就会发生^[1]。土壤团聚体对土壤肥力、质量和土壤的可持续利用等有很大影响, 是水、肥保蓄与释供功能的物质基础^[2]。土壤团聚体对土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 的物理保护是土壤碳稳定的重要机制, 团聚体的变化直接影响 SOC 的变化^[3]。因此, 确定土壤管理措施对于土壤有机质尤其是土壤团聚体稳定过程中表现活跃的有机质组分的影响作用至关重要^[1]。【前人研究进展】免耕对 SOC 的影响会随着土壤结构属性和免耕系统的变化而显著变化^[4]。免耕措施下, 作物残留物覆盖地表, 减少了土壤中的有机物质与微生物的接触, 降低了有机物的分解速率, 最终促进了大团聚体的形成和稳定^[5]。然而, 土壤结构的改善很难在土壤总有机质含量的变化上得到体现, 这是因为土壤物理组分参与了土壤团聚体的稳定过程^[6]。土壤团聚体被划分为大团聚体 (>250 μm) 和微团聚体 (<250 μm), 其中水稳性大团聚体对管理措施响应迅速, 可以作为评价耕作方式转变对土壤肥力和土壤质量短期影响的指标^[7-8]。【本研究切入点】短期来看, 免耕有助于黑土表层 >1 000 μm 级大团聚体的形成和发育^[9], 那么免耕对黑土团聚体结合碳的短期效应如何, 免耕是否促进了 >250 μm 团聚体结合碳的增加? 【拟解决的关键问题】探讨免耕措施下黑土水稳性团聚体中有机碳分配的动态变化, 以及免耕对团聚体结合碳和总有机碳之间相关关系的影响, 进而为筛选出免耕对黑土结构和质量影响的评价指标提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

保护性耕作长期定位监测试验始于 2001 年秋, 位于吉林省德惠市米沙子乡 (44°12'N, 125°33'E) 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业试验示范基地。试验区土壤类型为中层典型黑土, 壤质黏土, 土壤属中性或微酸性。试验区气候属于中温带大陆性季风气候, 年平均气温 4.4°C, 年降水量为 520 mm, 且主要集中在 6、7、8 三个月。小区试验开始前以玉米连作为主。试验小区采取单因素裂区、4 次重复的

随机区组设计。单因素为耕作方式: 免耕 (no tillage, NT)、秋翻 (moldboard plow, MP)、垄作 (ridge tillage, RT)。主处理裂分为玉米—大豆和大豆—玉米轮作两个辅助处理。每个小区面积为 5.2 m×30 m。不同于传统耕作方式, 所有处理秸秆全部还田。秋翻, 包括秋收后耕翻土地, 春季整地、播种等田间作业; 垄作, 除播种和六月左右进行中耕和起垄外, 收获后到播种前不进行其它搅动土壤作业; 免耕处理除用免耕播种机 (KINZE-3000) 直接播种外, 全年不再搅动土壤。玉米的施肥量为 150 kg·hm⁻² 氮肥, 分别作为底肥和追肥施入玉米地, 磷肥和钾肥只在播种时作为底肥施入, 施磷 (P) 和钾 (K) 量分别为 45.5 和 78 kg·hm⁻²。大豆只施底肥, 氮肥 (N)、磷肥 (P) 和钾肥 (K) 的施用量分别为 40、60 和 80 kg·hm⁻²。NT、MP 和 RT 处理下底肥和追肥量分别相同, 底肥均在播种时采用免耕播种机直接施入, 追肥则是 MP 和 RT 处理在六月下旬第二次中耕时施入土壤中, NT 处理是在相近时间的雨前或雨后撒到地表。有关试验区土壤理化性质和耕作方式 (NT、MP、RT) 的详细描述见梁爱珍等^[10]。

1.2 样品采集和测定分析

土壤样品采于 2001 年 10 月试验开始前和 2006 年 10 月, 即田间试验第 5 年秋作物收获后, 且分别取自 NT、MP 和 RT 处理的玉米—大豆轮作小区。利用取土钻 (直径 2.64 cm) 取土, 采样深度为 0~5、5~10、10~20、20~30 cm。每个采样小区 (免耕、垄作、秋翻作业) 取 7 次重复, 将同一深度的 7 个重复样品混合成 1 个样品。样品从小区的中部四垄采取。每个采样点呈 “S” 形分布。起垄小区垄台与垄沟宽度比约为 2:3。为了保证 MP 和 RT 处理小区与 NT 小区的比较在同一水平, 故起垄小区采样点选择在垄旁 1/2 处, 此处也是起垄前后的原始位置。土壤样品风干, 去除肉眼可见的有机残体后根据需要进行相关项目的测定。

土壤总有机碳用元素分析仪测定 (FlashEA1112, ThermoFinnigan, Italy), 且每 10 个样品放置 1 个国家土壤成分分析标准物质 (GSS-1) 进行标定和校对。因本研究供试黑土无石灰反应^[11], 碳酸盐检测也显示没有反应, 所以总碳即为 SOC 含量。

土壤水稳性团聚体的测定方法如下^[12]: 将风干土过 7 mm 筛子, 除去根茬、石块。称取 25 g 土样, 将

称好的土样放入分析仪的套筛 (1 000、250、53 μm) 上, 浸润 10 min, 湿筛 2 min, 上下波幅为 30 mm, 最上方的筛子筛网在湿筛过程中不露出水面。收集筛上物, 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干称重, 计算水稳性团聚体的质量分数。由于砂粒的粒径小于与土壤团聚体胶结的粗有机质 (macro-organic matter), 其本应为大团聚体的组成成分, 加之笔者试验小区土壤砂粒含量很低, 土壤质地变异很小, 所以没有对团聚体含量进行去除砂粒的校正。然后, 将样品磨碎过 100 目筛, 用元素分析仪测定各级团聚体中有机碳浓度 ($\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 团聚体)。各级团聚体结合碳浓度与该级团聚体所占百分比的乘积即为团聚体结合碳含量 ($\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 全土)。

1.3 统计分析并作图

文中 0~30 cm 深度的有机碳和水稳性团聚体结合碳平均含量均为 0~5、5~10、10~20、20~30 cm 各层含量的加权平均数。利用 SAS 9.0 统计软件 LSD 显著性差异检验进行均值比较和分析, 用皮尔森 (Pearson) 相关系数评价土壤团聚体结合碳与土壤总有机碳之间的关系。Origin 7.5 数学软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 免耕处理对黑土耕层 SOC 含量的影响

2001~2006 年 5 年的田间耕作试验对 0~30 cm 土层 SOC 平均含量并没有产生显著影响 ($P>0.05$) (图 1)。与 2001 年相比, 5 年的 NT 处理非但没有显著增加 0~30 cm 土层 SOC 含量 ($P>0.05$), 反而略有降低, 降低量为 2001 年的 0.77%, 但从变化趋势来看, 该层 SOC 含量已由 2004 年降低了 1.18% 转变

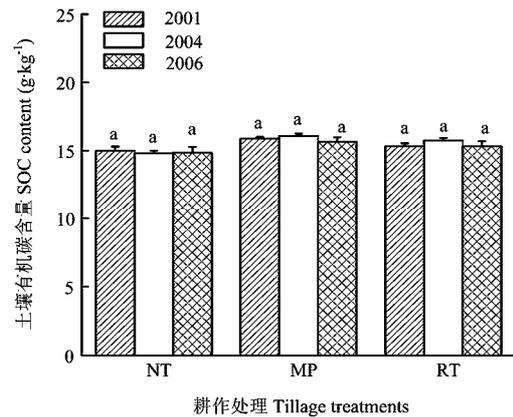


图 1 2001~2006 年各耕作处理下 0~30 cm 土层 SOC 含量变化

Fig. 1 Total SOC contents in different treatments (2001 to 2006)

为增加趋势。与 2001 年比较, MP 和 RT 处理 0~30 cm 土层的 SOC 含量均表现出先增加后降低的趋势。

从各层 SOC 的变化来看 (表 1), NT 处理进行 3 年后 (2004 年) 并没有显著增加 0~5 cm 土层的 SOC 含量 ($P>0.05$), 但 5 年后 (2006 年) NT 处理 0~5 cm 土层的 SOC 含量显著增加 ($P<0.05$), 增加量为 2001 年的 9.9%。亚表层 5~30 cm 各土层 SOC 在分别经过 3 年和 5 年的免耕处理后均没有发生显著变化 ($P>0.05$), 甚至在 5~20 cm 处还略有降低。MP 处理各层 SOC 含量在实施 3 年和 5 年后均无显著差异 ($P>0.05$)。

表 1 2001~2006 年 0~30 cm 各土层 SOC 含量变化

Table 1 Total SOC contents at each depth in different tillage treatments (2001 to 2006)

年份 Year	0~5 cm			5~10 cm			10~20 cm			20~30 cm		
	免耕 NT	秋翻 MP	垄作 RT	免耕 NT	秋翻 MP	垄作 RT	免耕 NT	秋翻 MP	垄作 RT	免耕 NT	秋翻 MP	垄作 RT
2001	16.4b	16.6a	16.5b	16.6a	16.3a	16.3a	15.9a	16.2a	15.9a	12.5a	15.0a	13.8a
2004	16.4b	17.0a	17.0b	15.7a	16.8a	16.5a	15.0a	16.1a	15.6a	13.4a	15.3a	14.8a
2006	18.0a	17.2a	18.1a	16.1a	17.3a	16.4a	15.4a	15.6a	15.4a	12.2a	14.2a	13.4a
LSD _{0.05}	1.17	0.84	0.96	1.4	1.23	1.15	1.37	0.87	1.10	2.84	1.53	2.29

同列相同字母表示在 0.05 水平上没有显著性差异 Means in the same column followed by the same letter are not significantly different at $P=0.05$

2.2 免耕处理前后黑土团聚体结合碳的比较

由图 2-a、2-b、2-c 可知, 较 2001 年相比, NT 处理 5 年后土壤 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级水稳性团聚体结合碳在 0~5、5~10、10~20、20~30 cm 深度均发生显著变

化 ($P<0.05$)。表层 0~5 cm 该级团聚体结合碳显著增加, 增加幅度为 2001 年初始质量分数的 2.94 倍, 而 5 cm 以下 (5~10、10~20、20~30 cm) 该级团聚体结合碳显著减少, 减少量分别为 57.9%、87.2%、

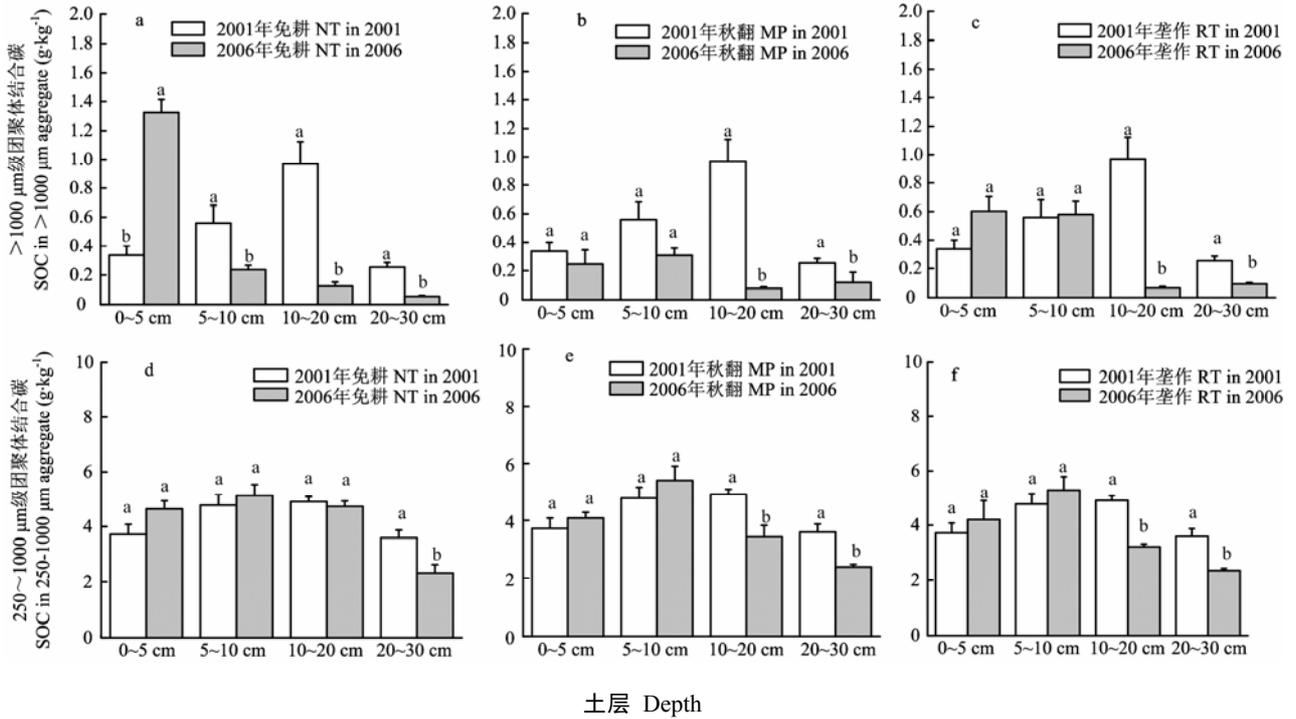


图 2 试验前后 0~30 cm 各土层 >250 μm 级水稳性团聚体结合碳含量 (2001 和 2006 年)
 Fig. 2 SOC in >250 μm water-stable aggregates at each depth in 2001 and 2006

78.1%。MP 处理土壤 >1 000 μm 级团聚体结合碳在每一土层都表现出下降趋势, 但仅在 10~20 cm 和 20~30 cm 降低最为明显。RT 处理该级团聚体结合碳的变化介于 NT 和 MP 之间。250~1 000 μm 级团聚体结合碳在 3 种处理下表现出了几乎一致的变化趋势 (图 2-d、2-e、2-f)。0~10 cm 土层该级团聚体结合碳在经过 5 年的 NT、MP 和 RT 处理后都有所增加, 10~30 cm 则均有显著降低 ($P<0.05$)。

图 3-a、3-b、3-c 可以看出, 经过 5 年的试验, 各耕作处理下 53~250 μm 级的水稳性微团聚体结合碳

表现出了与 >250 μm 级团聚体结合碳相反的分佈特征。NT 处理 53~250 μm 级团聚体结合碳在 0~10 cm 土层降低, 10~30 cm 土层增加。MP 处理下该级团聚体除 5~10 cm 外均有所增加, 且仅在 10~30 cm 土层表现出明显差异 ($P<0.05$)。RT 处理介于两种处理之间。

2.3 耕作处理之间对黑土团聚体结合碳的影响比较

黑土团聚体结合碳大多数分布在微团聚体中, 只有少部分在大团聚体中 (图 4)。NT 处理 5 年后 0~5 cm 土壤 >1 000 μm 级团聚体结合碳 ($1.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

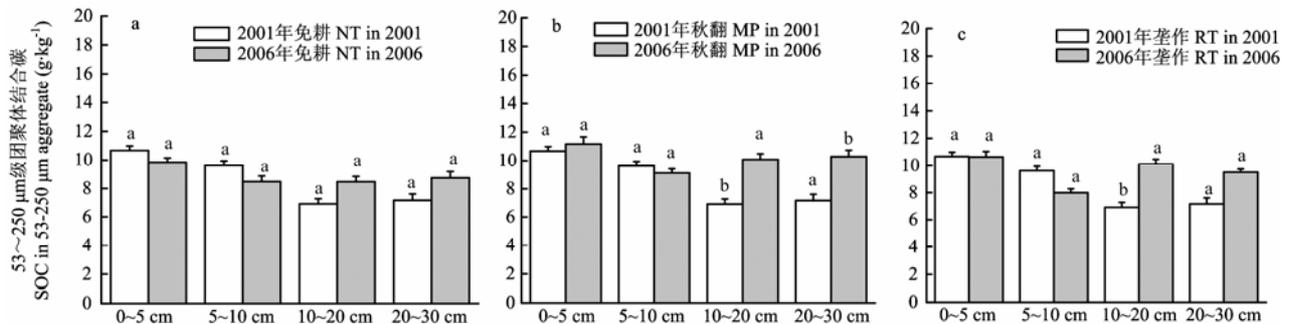


图 3 试验前后 0~30 cm 各土层 <250 μm 水稳性团聚体结合碳 (2001 和 2006 年)
 Fig. 3 SOC in <250 μm water-stable aggregates at each depth in 2001 and 2006

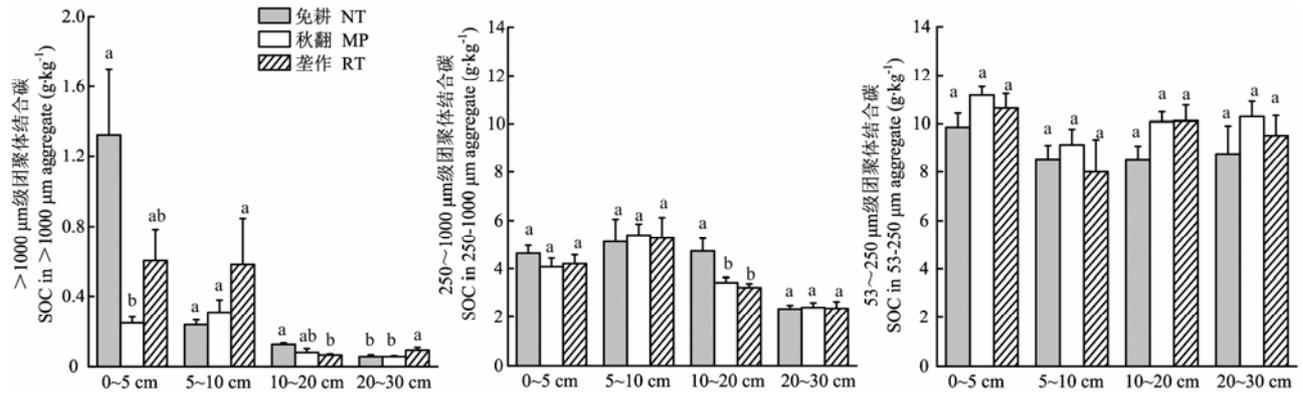


图 4 2006 年各处理下团聚体结合碳的比较

Fig. 4 Tillage impacts on SOC in different size aggregates in 2006 (0-30 cm)

显著高于 MP ($0.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 RT ($0.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 处理 ($P < 0.05$)。除 0~5 cm 土层 250~1 000 μm 级团聚体结合碳外, 3 种处理下土壤大团聚体结合碳均随土层深度的增加而降低, 而且 SOC 主要集中在 53~250 μm 级团聚体中。试验 5 年后, 微团聚体结合碳在 3 种处理之间均没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4 黑土总有机碳和团聚体结合碳相关关系的变化

从表 2 来看, 五年的 NT 处理后只有黑土总有机

碳与 >1 000 μm 级团聚体结合碳之间存在显著的正相关关系, 250~1 000 μm 级团聚体结合碳和微团聚体结合碳与总有机碳之间均没有明显的相关关系 ($P > 0.05$)。MP 处理下黑土总有机碳和各级团聚体结合碳之间不存在显著相关 ($P > 0.05$)。RT 处理则表现出 250~1 000 μm 和 53~250 μm 级团聚体结合碳均分别与总有机碳之间呈现极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。

表 2 不同耕作处理下黑土团聚体结合碳和 SOC 之间的相关关系

Table 2 Correlations between soil aggregate-associated C and total SOC under tillage practices

处理 Treatments	>1000 μm 级团聚体结合碳 SOC in >1000 μm aggregate	250~1000 μm 级团聚体结合碳 SOC in 250-1000 μm aggregate	53~250 μm 级团聚体结合碳 SOC in 53-250 μm aggregate
免耕 NT	0.508*	0.458	0.442
秋翻 MP	0.297	0.263	0.433
垄作 RT	0.411	0.679**	0.704**

* 在 0.05 水平上显著; ** 在 0.01 水平上显著 * Correlation is significant at 5% level; ** Correlation is significant at 1% level

3 讨论

3.1 免耕对耕层黑土 SOC 含量的影响

5 年的 NT 处理对 0~30 cm 土层 SOC 平均含量并没有产生显著影响, 但从变化趋势来看, 该层 SOC 含量已由 2004 年降低了 1.18% 转变为增加趋势, 说明在经过 5 年的试验后, 覆盖在地表的秸秆在 SOC 的增加过程中已经发挥了作用, 免耕作业对土壤表层 SOC 的累积效应也逐渐体现出来, 类似研究结果已有报道^[13-14]。与 2001 年比较, MP 和 RT 处理 0~30 cm 土层 SOC 含量均表现出先增加后降低的趋势, 这是因为

MP 处理秸秆全部还田, 加之每年进行土地翻动, 使得有机物质进入土壤并得以累积, 但土壤扰动造成的 SOC 的输出量可能大于秸秆还田后 SOC 的输入量, 因此在试验进行 5 年后, 即使在秸秆还田的情况下, SOC 也开始呈现逐渐下降的趋势。RT 处理田间耕翻强度介于 NT 和 MP 处理之间, 在同样的秸秆还田条件下 SOC 的变化幅度也介于 NT 和 MP 处理之间, 可以看出在秸秆还田相同的条件下, 随着耕翻强度和次数的增加, SOC 的累积在降低, 说明频繁耕翻不利于 SOC 的固定。

NT 处理引起了黑土 SOC 在剖面上的分布变化

(表 1), 即免耕处理 5 年后表层 0~5 cm 土层 SOC 含量显著增加, 5 cm 以下(5~10、10~20、20~30 cm) SOC 含量略有降低。MP 处理下 0~30 cm 整个土层 SOC 平均含量先增加后降低。上述结果说明了秸秆还田对表层的贡献率要大于其对亚表层的贡献。国外许多研究也表明, NT 处理在短期内(3~5 年)对 SOC 的积累仅限于土壤表层(<10 cm)^[13-14]。West 等^[15]对比研究了 NT 和常规耕作后认为, NT 可以减缓土壤有机物质的矿化率, 有利于 SOC 的积累, 但是这一固碳作用存在滞后效应, 5~10 年后才能有明显反应。

3.2 免耕对黑土团聚体结合碳的影响

NT 处理 5 年后土壤 >1 000 μm 级水稳性团聚体结合碳在 0~5 cm 土层显著增加, 但 5 cm 以下土层该级团聚体结合碳显著减少。这一变化趋势和该级团聚体质量分数非常吻合, 再加上短期内 NT 处理造成 SOC 在表层富集, 亚表层降低的分层化现象^[16], 故出现了上述现象。MP 处理 5 年后土壤 >1 000 μm 级团聚体结合碳出现下降趋势, 但仅在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层降低趋势明显, 原因可能是每年还田的秸秆经翻动后迅速分解, 对土壤进行有机物料的补充, 但同时进行的耕翻又导致了土壤大团聚体崩解, 由此带来的大团聚体的损失量可能大于有机物料输入增加的大团聚体的量, 所以出现该级团聚体结合碳均降低, 另外表层裸露, 秸秆可以迅速分解对土壤进行有机物质的补充, 亚表层则相对滞后, 故在耕翻和秸秆还田的正、反馈效应下, >1 000 μm 级团聚体结合碳在表层的变化要小于亚表层。RT 处理该级团聚体结合碳的变化介于 NT 和 MP 处理之间。250~1 000 μm 级团聚体结合碳在 3 种处理下表现出了几乎一致的变化趋势。由于团聚体的粒径大小不同, 250~1 000 μm 级团聚体结合碳的变异略不同于 >1 000 μm 级团聚体结合碳, >1 000 μm 级团聚体较 250~1 000 μm 级团聚体更易对耕作方式发生迅速响应。

经过 5 年的试验, 各耕作处理下 53~250 μm 级水稳性团聚体表现出了与 >250 μm 级水稳性团聚体结合碳相反的分布特征, 说明土壤各级团聚体结合碳可能在内部发生了转化, 因为植物残体碎屑(主要是根系)在细菌和真菌作用下, 与土壤矿物颗粒胶结形成低层次微团聚体, 然后在胶结剂作用下形成大团聚体。耕作引起了土壤大团聚体破裂, 释放出被大团聚体包裹的新老微团聚体, 使得微团聚体结合碳相应增加^[17-18]。

土壤团聚体结合碳随土壤团聚体粒径分布而异。耕作黑土团聚体结合碳大多数分布在微团聚体中, 只有少部分在大团聚体中。3 种处理下土壤大团聚体结合碳均随土层深度的增加而降低, 而且 SOC 主要集中在 53~250 μm 级团聚体中。这与 Jastrow 等^[19]利用稳定性碳同位素在牧草地上的研究结果不一致。差别可能是由于笔者的供试土壤长期的耕作导致了土壤大团聚体结合碳的损失。试验 5 年后, 微团聚体结合碳在 3 种处理之间均没有显著差异。Madari 等^[20]研究也指出, 耕作措施在短期内只会引起表层大团聚体及其结合碳的变化。农业管理措施显著影响土壤团聚体的形成, 但在短期内主要是引起土壤大团聚体及其结合碳的变化^[21]。

综上, 5 年的短期试验只有 NT 处理引起了 >1 000 μm 级团聚体结合碳发生显著变化, MP 和 RT 处理在耕翻降低 SOC 和秸秆还田增加有机物质输入的正、负反馈效应下, 耕层各级团聚体结合碳平均含量没有发生明显的变化, 但耕翻强度和次数影响 0~5 cm 土层各级团聚体结合碳平均含量, 即随耕翻强度和次数的增加, 表层 >1 000 μm 和 250~1 000 μm 土壤团聚体结合碳平均含量的累积数量同时也在降低, 而 53~250 μm 级团聚体结合碳平均含量的累积数量却随着耕翻强度和次数的增加而增加, 说明土壤表层扰动带来的有机碳损耗主要发生在 >1 000 μm 和 250~1 000 μm 团聚体结合碳上。NT 试验前后, 黑土总有机碳和 >1 000 μm 级团聚体结合碳变化趋势一致, 总有机碳除在 0~5 cm 土层变化显著外, 其它土层变化均不明显, 但 >1 000 μm 级大团聚体结合碳各层均有显著变化, 说明 >1 000 μm 级团聚体结合碳对耕作方式的响应较总有机碳更为敏感, 可以用于评价耕作方式对黑土结构的短期影响。

3.3 黑土总有机碳和团聚体结合碳的关系

梁爱珍等^[22]的研究表明, 自然与耕作黑土各粒级团聚体结合碳与总有机碳之间均存在极显著的正相关关系。章明奎等^[23]、Wairiu 等^[24]和李小刚等^[25]的研究也得出类似的结果。然而 5 年的 NT 试验后上述相关关系发生了变化(表 2)。前面的分析表明, 5 年的 NT、MP 和 RT 处理下 SOC 主要分布在微团聚体中, 因此土壤总有机碳应与微团聚体之间存在显著相关, 但这种相关性仅在 RT 处理中成立。笔者认为 NT 处理下土壤总有机碳与 >1 000 μm 级大团聚体结合碳之间存在显著的正相关关系的原因是 NT 处理下每年的秸秆还田大大促进了大团聚体结合碳的增加,

而且集中体现在 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级团聚体中。Razafimbelo 等^[4]的研究也指出, 免耕和常规耕作对有机碳产生的不同影响主要与秸秆还田和水稳性大团聚体密切相关。

4 结论

短期来看, 5 年的免耕、秋翻和垄作处理对黑土大团聚体 ($>250\ \mu\text{m}$) 的影响远大于微团聚体, 但 3 种耕作处理中只有免耕处理引起了 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级团聚体结合碳发生显著变化。试验 5 年后 3 种耕作方式之间也只有在 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级团聚体结合碳中表现出免耕处理显著高于秋翻和垄作处理, 而且 NT 处理下黑土 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级团聚体与总有机碳之间存在显著的正相关关系。因此, $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 级团聚体可以用于评价免耕对黑土结构和肥力的短期影响。

References

- [1] Oyedele D J, Schjønning P, Sibbesen E, Deboz K. Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material. *Soil & Tillage Research*, 1999, 50: 105-114.
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云, 赵晓燕, 王正平. 土壤的自动调节性能与抗逆性能. *土壤学报*, 1991, 28(2): 168-176.
Chen E F, Zhou L K, Wu G Y, Zhao X Y, Wang Z P. Self-regulation and resistance performances of soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(2): 168-176. (in Chinese)
- [3] Deneff K, Six J, Bossuyt H, Frey S D, Elliott E T, Merckx R, Paustian K. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter and microbial community dynamics. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 1599-1611.
- [4] Razafimbelo T M, Albrecht A, Oliver R, Chevallier T, Chapuis-Lardy L, Feller C. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98: 140-149.
- [5] Six J, Paustian K, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689.
- [6] Roberson E B, Sarig S, Firestone M K. Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55: 734-739.
- [7] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchman H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65 (2): 352-358.
- [8] 史 奕, 陈 欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1491-1494.
Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 13(11): 1491-1494. (in Chinese)
- [9] 梁爱珍. 东北黑土有机碳的恢复潜力及其机理研究[D]. 北京: 中国科学院, 2008.
Liang A Z. The potential and mechanism to restore soil organic carbon with Black soil in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [10] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury C F. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287-1293.
Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Drury C F. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in Northeast China. *Scientia Agricultural Sinica*, 2006, 39(6): 1287-1293. (in Chinese)
- [11] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998: 149.
Jilin General Station of Soil and Fertilizer. *Soils of Jilin*. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 149. (in Chinese)
- [12] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil & Tillage Research*, 1998, 49: 173-183.
- [13] Staley T E, Boyer D G. Short-term carbon, nitrogen and pH alterations in a hill-land Ultisol under maize silage relative to tillage method. *Soil & Tillage Research*, 1997, 42: 115-126.
- [14] McCarty G W, Lyssenko N N, Starr J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1564-1571.
- [15] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 439-444.
- [16] Liang A Z, Zhang X P, Fang H J, Yang X M, Drury C F. Short-term effects of tillage practices on organic carbon in clay loam soil in Northeast China. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 619-623.
- [17] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367-1377.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1350-1358.

- [19] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by Carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801-807.
- [20] Madari B, Machado P L O A, Torres E, de Andrade A G, Valencia L I O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2005, 80: 185-200.
- [21] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. *Australian Journal of Soil Research*, 1980, 18: 423-433.
- [22] 梁爱珍, 张晓平, 申 艳, 李文凤, 杨学明. 东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1052-1057.
Liang A Z, Zhang X P, Shen Y, Li W F, Yang X M. Distribution of soil water-stable aggregates and aggregate-associated C in black soil in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1052-1057. (in Chinese)
- [23] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 黄昌勇. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
Zhang M K, He Z L, Chen G C, Huang C Y. Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 359-366. (in Chinese)
- [24] Wairiu M, Lal R. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 19-27.
- [25] 李小刚, 崔志军, 王玲英. 施用秸秆对土壤有机碳组成和结构稳定性的影响. *土壤学报*, 2002, 39(3): 421-428.
Li X G, Cui Z J, Wang L Y. Effect of straw on soil organic carbon constitution and structural stability. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 421-428. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)