

土地利用方式和栽培措施对农田土壤不同组分有机碳的影响

孟凡乔, 况 星, 张 轩, 杜章留

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:以河北曲周县原状草地土壤和农田土壤为研究对象,分析了土地利用方式、秸秆还田、耕作方式和施肥水平对土壤有机碳特性的影响。研究表明,华北原状草地改变为农田后(34年),土壤砂粒、颗粒有机碳的含量和总有机碳的比例、轻组土壤和轻组土壤有机碳都显著降低,且以秸秆还田影响最大。经过8年的耕作,施加底肥、免耕和秸秆整株还田等农艺措施,明显提高了土壤颗粒有机碳含量。秸秆还田使得0~20 cm土壤颗粒有机碳含量明显增加,且整株还田比粉碎还田更能增加10~20 cm土壤颗粒的有机碳含量,而免耕对土壤颗粒有机碳的增加主要表现在0~10 cm。土壤非保护性有机碳的比例也会显著降低,且非保护性有机碳主要分布在0~5 cm土层。

关键词:免耕;秸秆还田;颗粒有机碳;轻组

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2512-08

The Impact of Land Use Change and Cultivation Measures on Light Fraction Organic Carbon, Sand and Particle Organic Carbon

MENG Fan-qiao, KUANG Xing, ZHANG Xuan, DU Zhang-liu

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract:In Quzhou County, Hebei Province where now intensive farming system is operated, original grassland and farming land under different tillage, crop straw return and fertilization measures were studied for the analysis of the impact on soil organic carbon properties, especially on light fraction organic carbon, sand and particle organic carbon. The research indicated that after change into farmland(34 years), light fraction organic carbon, sand and particle organic carbon were significantly reduced and maize straw had the most influence. After 8 years of farming, fertilization, no-tillage, and maize straw return significantly increased particle organic carbon. Crop straw significantly increased the particle organic carbon in 0~20 cm soil layer, but whole-straw return had higher increase of 10~20 cm soil particle organic carbon than grinding straw return. The increase of particle organic carbon induced by no tillage mainly happened in 0~10 cm soil. After changed into farmland from grassland, non-protective organic carbon were significantly reduced and it mainly happened in 0~5 cm soil layer.

Keywords: no-tillage; crop straw return; particle organic carbon (POC); light fraction

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用,因此被认为是土壤质量或土壤健康的一个重要指标,也是表征环境质量的关键性指标。但土壤总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)可能在较短时间内对因

农业管理措施导致的土壤质量的变化反映不甚敏感。土壤有机碳是一种有机物质的异质混合体,其不同的形态或组分可能对土壤肥力或质量产生不同的影响。研究发现,土壤活性有机碳和轻组有机碳对不同耕作方式和秸秆还田处理的反应更为迅速^[1-2]。因此,与土壤总有机碳相比,这些组分有机碳更可能作为反映因农业管理措施的改变而导致的土壤质量变化的敏感性指标。

轻组有机质的主要成分为动植物残体、菌丝体、孢子、单糖、多糖、半木质素^[3],其分解速率为重组的

收稿日期:2009-11-08

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(30300056);国家自然科学基金面上项目(30870414)

作者简介:孟凡乔(1969—),男,副教授,主要研究方向为土壤有机碳和有机农业。E-mail: mengfq@cau.edu.cn

2~11 倍,故轻组有机质比土壤总有机质含量对耕作、施肥等农业生产措施的响应更快^[4]。土壤中颗粒有机质组分指土壤中与砂粒结合的有机质(直径 50~2 000 μm),并进一步可能结合在土壤大团聚体(macro-aggregates)与微团聚体(micro-aggregates)中。这类有机质组分主要由与砂粒结合的植物残体半分解产物组成,它们与砂粒没有形成有机-无机复合体,其结构和组成与轻组有机质相同,性质也相似,而且砂粒组中的有机质与轻组有机质之间有很高的相关性。

有研究^[5]应用土壤有机质物理分组和同位素 ^{14}C 方法研究了土地利用变化对土壤碳库中不同定性组分的影响及土地利用变化过程中土壤碳稳定机制和影响因素^[6],这些研究表明土地利用变化主要影响的是土壤有机碳组分中分解相对快的部分,即轻组有机碳和颗粒有机碳。但是对不同栽培措施下土壤有机碳物理分组的研究还不多,并且很少有研究会吧轻组有机碳和颗粒有机碳结合起来研究,虽然它们性质类似,但是起源和组成不同,单独应用其一并不能全面代表土壤有机碳中非保护性组分,把两种组分结合起来则更能比较全面反映有机碳非保护性组分的性质。本研究把土壤轻组有机碳及土壤颗粒有机碳相结合,研究不同土地利用方式和栽培措施(耕作方式、施肥、秸秆还田)对土壤物理组分有机碳的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验地点位于河北省曲周县,东经 $114^{\circ}50'30''\sim 115^{\circ}13'30''$,北纬 $36^{\circ}34'45''\sim 36^{\circ}57'57''$ 之间。海拔 40 m,属华北地区暖温带半湿润大陆性季风气候区,年均气温 13.1°C ,无霜期年平均 201 d。年平均降雨量为 556.2 mm,年蒸发量 1 841 mm。1973 年以前土壤养分含量一般都偏低,有机质含量较低,为 $5\sim 8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.24\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,极度缺磷,有效磷含量多在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,钾素较为丰富,土壤物理性状很差,不适宜作物生长。自 1973 年开始,先后在这里建立了一代、二代和三代综合治理试验区。经过治理后,农业生产基本条件大大改善,抗旱防涝能力、土壤肥力均有提高,盐渍化程度明显减轻,高产农田面积大幅度增加,作物产量迅速提高。土壤有机质含量提高到 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,全氮 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷达到 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验用地 1985 年时的土壤养分状况如下:pH 为 7.8,有机质 $7.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $50.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量 $1.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $9.94\text{ mg}\cdot$

kg^{-1} ,速效钾 $92.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验处理

研究试验地处理主要包括原状草地和原状草地改变为农田后不同栽培措施的农田处理。原状草地位于中国农业大学曲周实验站内,并于 1973 年建站以来一直保留,不经任何农业生产和土地耕作,植被自然生长,其上生长的植被主要是以 C3 植物为主的草原化草甸植物,以杂草群落为主。常以狗尾草(*Setaria viridis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、榛子(*Corylus heterophylla*)、大针茅(*Stipa grandis*)等群落为主。原状草地和农田处理之间有 5 m 距离。农田处理:种植方式为冬小麦夏玉米轮作,按不同的栽培措施分为整翻、粉碎、清茬、整翻无肥、直立免耕、粉碎免耕 6 个处理,其中各个处理从 1999 年 10 月开始(只针对玉米),小麦为统一农事操作,成熟后用联合收割机直接收走,秸秆不还田,只有根茬还田。不同栽培措施的农田处理见表 1。

表 1 农田的试验处理

Table 1 Farming treatments

处理	农事操作情况
整翻	玉米秸秆整株还田,翻耕
粉碎	玉米秸秆粉碎还田,翻耕
直立免耕	玉米秸秆整株还田,免耕
粉碎免耕	玉米秸秆粉碎还田,免耕
整翻无肥	玉米秸秆整株还田,翻耕,且不施底肥
清茬	玉米秸秆不还田,翻耕

1.3 样品采集与分析

2007 年玉米收获后,对原状草地及 6 个农田处理(整翻、粉碎、清茬、整翻无肥、直立免耕、粉碎免耕),按“S”型进行土壤样品采集,每个处理按 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 8 个层次取 6 个点,并按不同层次混合。将采集的土壤样品剔除掉其中的岩屑及大于 2 mm 的植物碎片和根系,风干后过 2 mm 筛,再用 1:3 盐酸去除土壤无机碳。

1.3.1 土壤轻重组分的划分

称取经过 2 mm 筛子的风干土样 20 g 加入聚乙烯带塞离心管中,加入 80 mL 密度为 $1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 NaI 溶液中,在超声波清洗器(型号: CX-250,北京医疗设备二厂)内超声处理 30 min 以破坏土壤团聚体,然后置于振荡机上振荡 60 min(振荡机转速 $190\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),再在离心机(转速 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)中离心 15 min,将液体部分过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸微孔滤膜(北京华

恒高科工程技术有限公司),滤膜置于布氏漏斗(接真空泵)的玻璃滤器上。先将 NaI 溶液过滤,然后用去离子水冲洗滤器及滤膜。水洗后,用镊子取出滤膜,用去离子水将滤膜上的收集物冲洗到已烘干称重的烧杯中,此为土壤轻组部分。同样把离心管底部的沉淀部分用去离子水冲到已烘干称重的烧杯中此为土壤重组部分。在 60℃下烘干,获得土壤轻组(Light Fraction, LF)及重组(Heavy Fraction, HF)的干重。

1.3.2 土壤粒径的划分

在粒径的划分方法中,传统的吸管法、比重计法以及现在广泛使用的激光法都无法实现对各个粒级土壤颗粒的回收,化学分散剂对各粒级土壤中的有机碳会造成破坏,对后续研究产生影响。因此,本研究采用离心法^[7]进行土壤颗粒分级,研究所得到的颗粒有机碳(Particle Organic Carbon, POC)为直径 50~2 000 μm 颗粒所含的有机碳。

①称取 20 g 过 2 mm 筛的土样于 250 mL 烧杯中,加水 150 mL 在超声波清洗器内超声处理 30 min,然后置于振荡机上振荡 60 min(振荡机转速 190 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)以破坏土壤团聚体。

②将用超声波处理过的悬浮液倾倒在孔径为 50 μm 的筛上,用 450 mL 左右蒸馏水洗涤,直至洗出液变得清亮。留在筛子上的部分为粒径大于 50 μm 的砂粒和部分植物残体。洗出液被收集在容器中供进一步分离之用。

③用离心机对洗出液进行离心分离。离心管(450 mL)中的溶液应为 300~350 mL,760 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 4 min,将悬浮液倾倒在收集器中。加蒸馏水 100 mL,振荡,550 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 2 min,将悬浮液倾倒出并与以前的悬浮液合并备用。后一过程至少要进行 4 次或多次直至完全分离粘粒(<2 μm)和粉砂粒(2~50 μm)。

④于 500 mL 离心管中加蒸馏水 100 mL 并振荡,使沉降在离心管底部的粉砂粒重新悬浮在溶液中。250 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 2 min,倾出悬浮液。5~50 μm 的粗粉砂粒留在离心管底部,而 2~5 μm 的细粉砂粒在悬浮液中。这一过程至少重复 5 次或多次直至将它们完全分开。悬浮液在抽气条件下用 0.45 μm 的醋酸微孔滤膜过滤,将留在滤纸上的和收集器底部的细粉砂粒用水洗到小烧杯中,在 55℃条件下烘干 72 h 并称重,将留在 500 mL 离心管底部的粗粉砂粒用水洗的方法转移、烘干并称重。

⑤将第 3 步中收集的悬浮液转移到 500 mL 离心

管中,5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,倾倒出上清液,加蒸馏水 350 mL,用力振荡(用玻璃棒搅动)并离心。至少重复 5 次或多次直至将粗粘粒和细粘粒分开。将悬浮液收集在容器中并加 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 30 mL 左右,使细粘粒絮凝。将絮凝后的细粘粒重新转移进 500 mL 离心管中,5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,弃去上清液,管底的沉淀为细粘粒。将留在离心管底部的粗粘粒(0.2~2 μm)和细粘粒(<0.2 μm)分别转移到小烧杯中在 55℃下烘干 72 h 并称重。

1.3.3 其他分析方法

土壤有机碳总量、轻组有机碳、颗粒有机碳的测定采用 Elementar vario MACRO CNS 元素分析仪测定。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式和栽培措施对土壤颗粒有机碳的影响。

颗粒有机碳是与土壤结构具有密切关系的有机碳组分,也是一种非保护性有机碳组分。它很容易受到土地利用方式的影响,颗粒有机碳分配比例反映这个组分有机碳的相对数量。从图 1 中可以看出不同土地利用方式和栽培措施农田土壤的砂粒含量和颗粒有机碳分配比例(为 1 m 土层内的平均含量)的变化基本一致。从土地利用方式的影响来看,原状草地土壤的砂粒含量明显高于农田土壤,由于栽培措施引起的砂粒含量差异在 4.68%~10.77%之间。从栽培措施的影响来看,施肥、耕作方式(即是否免耕)、秸秆还田方式对土壤的砂粒含量影响不大,但秸秆是否还田对土壤的砂粒含量产生较明显的影响。原状草地土壤的

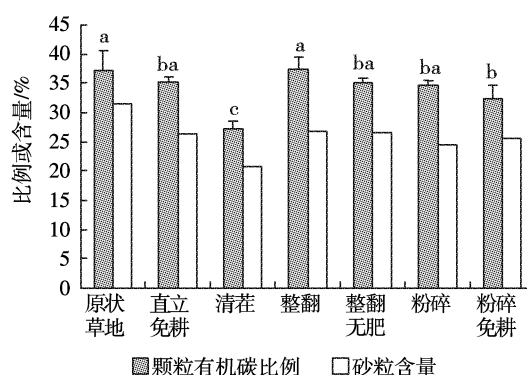


图 1 1 m 土层内不同土地利用方式和栽培措施处理的颗粒有机碳比例和砂粒含量

Figure 1 Comparison of POC ratio and sand content in 1 m soil layer under original grassland and different tillage and crop straw return systems

颗粒有机碳比例也普遍高于其他农田处理,与清茬和粉碎免耕处理相比较达到显著程度。转换为农田土壤后,不同栽培措施处理的颗粒有机碳分配比例差异不大,只是秸秆不还田的土壤颗粒有机碳比例显著低于其他处理。

图 2 是各处理 0~100 cm 土层土壤砂粒含量、颗粒有机碳比例的平均值,从图中可以看出,土壤颗粒有机碳比例、砂粒含量随土壤深度的增加而降低,在 0~40 cm 土层这种变化不太明显,在 40 cm 以下则显著降低。

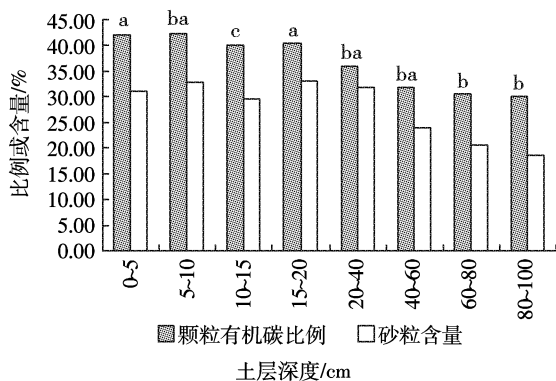


图 2 1 m 土层不同土壤深度颗粒有机碳比例和砂粒含量比较
Figure 2 Comparison of POC ratio and sand content in different layers within 1 m of soil

从土壤的颗粒有机碳含量差异来看(图 3),原状草地土壤的颗粒有机碳含量与土壤有机碳趋势不同,较大多数农田处理其土壤的颗粒有机碳含量都显著较低,只是比不施肥处理的含量高,即草地转换为农田后,土壤的颗粒有机碳是降低的。

施加底肥可以造成整翻和整翻无肥处理间土壤颗粒有机碳含量有显著差异($\alpha=0.05$),施加底肥的处理土壤颗粒有机碳含量比未施加底肥的高 $1.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此施加底肥有助于提高土壤颗粒有机碳含量。对于

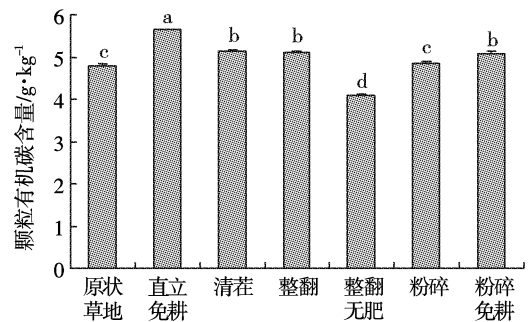


图 3 不同土地利用方式和栽培措施处理的 1 m 土层土壤颗粒有机碳含量

Figure 3 POC content under original grassland and different tillage and crop straw return systems in 1 m soil layer

不同的耕作方式(即是否免耕),无论是整翻和直立免耕处理还是粉碎和粉碎免耕处理,它们之间的土壤颗粒有机碳含量都出现显著差异($\alpha=0.05$),免耕处理的土壤颗粒有机碳含量都要显著高于翻耕处理,说明免耕的耕作方式有助于提高土壤颗粒有机碳含量。秸秆还田有助于提高土壤颗粒有机碳含量,无论是整翻和粉碎处理还是直立免耕和粉碎免耕处理,它们之间土壤颗粒有机碳含量也都出现显著差异($\alpha=0.05$),且秸秆整株还田的效果要好于粉碎还田。

2.2 不同土地利用方式及栽培措施对不同层次的土壤颗粒有机碳含量的影响

由于植被根系分布、生物活动、人工扰动等影响不同,不同层次的土壤有机碳含量是不同的,仅分析不同土地利用方式和栽培措施下整个 1 m 土层土壤颗粒有机碳含量的差异是片面的,有必要分别从不同层次对不同土地利用方式及栽培措施下土壤颗粒有机碳含量进行比较。

从表 2 可以看出,在 0~100 cm 的各个层次中,原状草地的颗粒有机碳含量不像有机碳总量一样在各

表 2 原状土及不同处理不同层次颗粒有机碳含量差异比较

Table 2 Comparison of POC in different soil layers under original grassland and different tillage and crop straw return systems

	土壤颗粒有机碳/g·kg ⁻¹							
	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
原状草地	13.60b	9.17c	8.25e	8.51dc	4.47e	3.80b	3.27a	2.51c
直立免耕	15.37a	12.73ba	12.15b	6.26e	5.91dc	4.44a	3.16a	3.13b
清茬	10.38d	8.50d	7.24f	8.87c	6.78b	2.69e	2.94b	4.44a
整翻	9.23e	9.16c	8.86d	11.24b	7.39a	3.08d	2.96b	2.45c
整翻无肥	13.46b	12.37b	11.89cb	8.37d	4.05f	2.00f	1.48d	1.33e
粉碎	10.13d	9.26c	11.59c	8.76dc	5.66d	3.34c	2.77b	2.56c
粉碎免耕	10.96c	12.94a	12.71a	12.23a	6.24c	3.190dc	2.14c	1.57d

个层次基本都显著的高于其他农田处理,与其他不同农田处理土壤中颗粒有机碳含量相比,无确定的差异大小关系。

对施肥的影响进行分析,在整个 1 m 土层,施加底肥的处理土壤颗粒有机碳含量显著高于未施加底肥的处理,但在 0~15 cm 的表层土中,未施加底肥的处理反而显著高于施加底肥的处理。从是否免耕来分析,免耕处理的土壤颗粒有机碳含量普遍显著高于翻耕处理,进一步说明免耕有助于提高土壤颗粒有机碳含量。从秸秆还田来看,在 1 m 土层秸秆是否还田对土壤颗粒有机碳含量的影响不显著,但在 0~20 cm 表层土中,秸秆还田处理的土壤颗粒有机碳含量普遍显著高于不还田处理,说明秸秆还田处理更有利于提高表层土壤颗粒有机碳含量。从秸秆还田的方式来看,翻耕处理在 0~10 cm 土层秸秆整株还田土壤颗粒有机碳的含量要低于秸秆粉碎还田,但在 10~20 cm 土层秸秆整株还田土壤颗粒有机碳的含量则要高于秸秆粉碎还田;免耕处理则正好相反,在 0~10 cm 土层秸秆整株还田土壤颗粒有机碳的含量要高于秸秆粉碎还田,但在 10~20 cm 土层秸秆整株还田土壤颗粒有机碳的含量则要低于秸秆粉碎还田。

2.3 不同土地利用方式及栽培措施对土壤轻组有机碳含量的影响

轻组有机质具有较高潜在的生物活性,是土壤中不稳定有机碳库的重要组成。轻组土壤虽然只占土壤总量的很小部分,但它的含碳量对土壤有机碳的贡献是不能被忽略的。从图 5 可以看出,在不同处理中轻组土壤只占土壤重量的 0.37%~0.74%,但它的含碳量却占到了土壤有机碳含量的 4.64%~11.59%。

草地开垦为农田后,无论是土壤轻组部分比例还是轻组有机碳所分配的比例都有所下降,由于栽培措

施不同,最高可分别下降 0.37%和 6.95%。对于不同栽培措施来说,无论是土壤轻组比例还是轻组有机碳的比例,不施肥处理都要高于施肥处理;免耕处理的土壤轻组比例都高于翻耕处理。从秸秆还田的影响来看,无论是土壤轻组比例还是轻组有机碳所占比例,秸秆不还田处理都要高于秸秆还田处理,秸秆粉碎还田处理也都高于秸秆直接还田处理。

对土壤轻组有机碳含量的分析表明(图 6),原状草地土壤轻组有机碳含量普遍高于其他农田处理。施肥处理比不施肥处理高出 $29.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;从耕作方式看,翻耕处理的土壤轻组有机碳含量高于免耕处理;秸秆还田能增加土壤轻组有机碳含量,无论是何种耕作方式,秸秆粉碎还田处理土壤轻组有机碳含量都要高于秸秆直接还田处理。

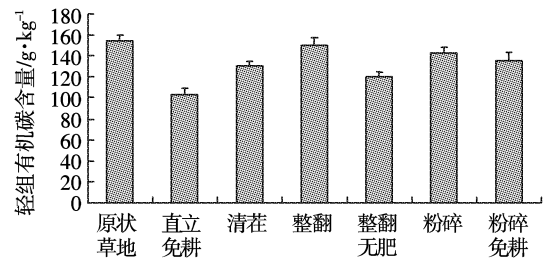


图 6 不同土地利用方式和栽培措施处理 0~20 cm 土层土壤轻组有机碳含量

Figure 6 LF-SOC content under original grassland and different tillage and crop straw return systems in 0~20 cm soil

2.4 不同土地利用方式及栽培措施对非保护性有机碳的影响

颗粒有机碳和轻组有机碳是用不同方法分离出的非保护性有机碳组分,虽然它们性质类似,但是起源和组成不同,单独应用其一不能全面代表土壤有机碳中非保护性组分,把两种组分结合起来则能比较全

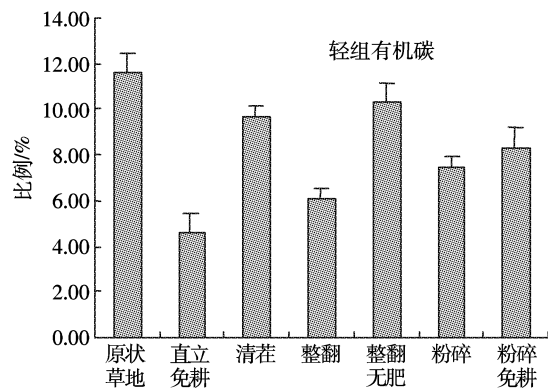
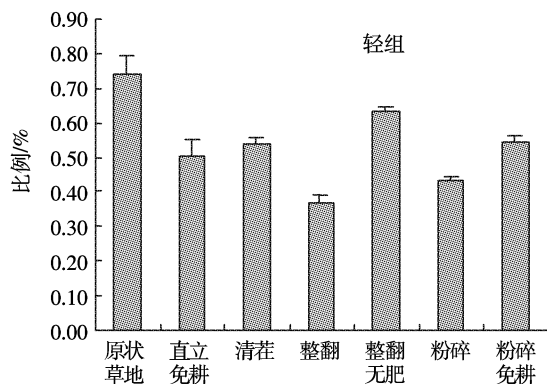


图 5 不同土地利用方式和栽培措施处理中轻组及轻组有机碳的比例

Figure 5 Ratio of LF and LF-SOC under original grassland and different tillage and crop straw return systems in 1 m soil layer

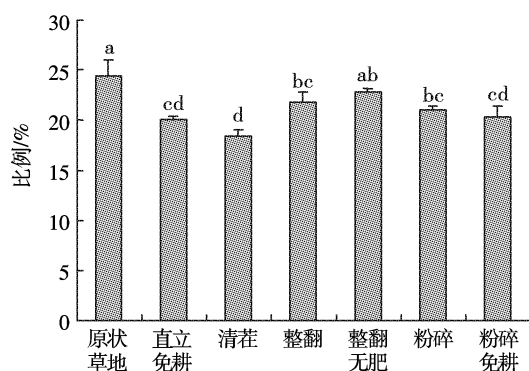


图 7 非保护性有机碳在不同处理中所占的比例

Figure 7 Ratio of unprotected SOC pool in total organic carbon under original grassland and different tillage and crop straw return systems

面反映有机碳非保护性组分性质。因此本研究以有机碳在颗粒有机质中和轻组有机质中分配比例的平均值来表示土壤有机碳在非保护性库中的分配比例。

从图 7 中可以看出草地开垦为农田后,土壤中非保护性有机碳的分配比例都显著降低,由于栽培措施的不同降低 1.65%~7.94%不等,其中,秸秆还田与秸秆不还田相比能够显著提高非保护性有机碳的分配比例,而其他栽培措施没有显著性影响。

如图 8 所示,从非保护性有机碳在不同土壤深度所占的比例来看,在 0~5 cm 土层非保护性有机碳的分配比例最高,随着深度增加,在 5~10 cm 和 10~15 cm 显著降低。

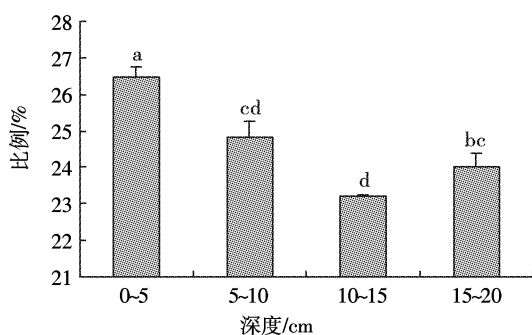


图 8 非保护性有机碳在不同土壤深度所占的比例

Figure 8 Ratio of unprotected SOC in 0~20 cm soil layers under original grassland and different tillage and crop straw return systems

3 结果与讨论

3.1 不同土地利用方式和栽培措施对土壤颗粒有机碳的影响

颗粒有机碳处于半分解状态,颗粒大(50~2 000 μm),比重小($<2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),一般被认为是处于新鲜的

动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过度的有机碳库。颗粒有机碳组分也容易受到土地利用方式的影响。Chan^[8]发现在把草地变成农田之后,首先流失的是颗粒有机碳,在 0~5 cm 土层,天然草地与农田有机碳有 70% 的差异。Cambardella 等^[9]报道草地改变为耕地后,颗粒有机物大幅度下降。Guggenberger 等^[10]指出土地利用系统中土壤有机质的增长主要表现在颗粒态有机质。本试验结果显示在 1 m 土层深度内的原状草地颗粒有机碳平均含量并不比各处理中农田土壤高,但是砂粒含量和颗粒有机碳分配比例都较其他农田处理高,土壤砂粒含量差异在 4.68%~10.77%之间,颗粒有机碳比例最高也能达到 9.96%,而颗粒有机碳比例综合了土壤有机碳绝对含量与颗粒有机碳含量,这个指标更能表明土地利用方式影响有机碳稳定性的强度,排除有机碳总量的差异。这种差异主要和土壤团聚体关系密切,草地变成农田之后,有机碳输入量减少,使总有机碳和颗粒有机碳形成量减少,同时也使土壤团聚体的形成降低、原土壤团聚体破坏,导致了颗粒有机碳含量和分配比例改变。

不同的栽培措施颗粒有机碳含量也有明显的影响,尤其是耕作的影响。许多研究表明^[8,10-11],免耕或者作物覆盖有利于颗粒有机物增加,而传统耕作加快有机物的矿化。Franzluebbers 等^[12]发现耕作使颗粒有机碳加速分解。本试验中也得出了相同的结论,无论是整个 1 m 土层的平均值还是 1 m 土层内的 8 个不同层次,免耕处理的颗粒有机碳含量都要高于翻耕处理,说明免耕耕作方式都有助于提高土壤颗粒有机碳含量,但表层增加的幅度更大。有研究表明^[13],秸秆与化肥配施,更有利于提高土壤颗粒有机碳。Cambardella 等^[9]报道草地改变为耕地后,颗粒有机物大幅度下降,其中无休闲耕地降低了 66%,根茬覆盖降低了 59%,免耕地降低了 45%。本试验中施加底肥的处理土壤颗粒有机碳含量比未施加底肥的高 $1.02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到显著水平。虽然在 1 m 土层中秸秆还田对土壤颗粒有机碳含量的影响不显著,由于土壤翻耕深度约在 15~20 cm 之间,有机质的增加也主要发生于 0~20 cm,因此用 0~20 cm 土壤颗粒有机碳含量的变化来分析秸秆还田的影响显然更有说服力。在本研究中,0~20 cm 表层土的各个层次中秸秆还田处理的土壤颗粒有机碳普遍都显著高于不还田处理,说明秸秆还田处理能提高表层土壤颗粒有机碳含量。在本研究中,无论何种耕作方式在 1 m 土层秸秆整株还田处理的土壤颗粒有机碳含量都显著高于秸秆粉碎还田处

理,这可能是由于采样时间为第二年的六、七月份,经过约一年的分解秸秆,整株还田和秸秆粉碎还田差别已不明显,都基本分解完毕。另一方面秸秆整株还田能够减少土壤与空气的接触,从而减少原有有机质的分解。

3.2 不同土地利用方式和栽培措施对土壤轻组有机碳的影响

轻组有机碳是有机质中易改变的部分,半衰期一般只有几周到几十年,代表着易分解的有机碳库。Dalal 等^[14]发现轻组有机碳含量容易受到植被类型、土地利用变化和枯枝落叶层类型及其分解的影响,尤其耕作能够减少轻组有机碳含量。在本试验中,无论是土壤轻组部分比例还是轻组有机碳所分配的比例以及轻组有机碳的含量,原状草地都要较其他农田处理高,说明草地开垦为农田后,造成了土壤轻组有机碳的流失。

从不同栽培措施上看,Conteh 等^[15]发现天然植被土壤中轻组有机碳含量比耕作土壤中高,认为轻组有机碳变化主要和土壤团聚体关系密切,耕作主要通过减少土壤团聚体的稳定性而改变轻组有机碳含量及分配比例。Skjemstad^[16]用相对密度法将土壤分成 <1.6 、 $1.6\sim 2.0$ 、 $2.0\sim 2.4$ 和 $>2.4\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,研究表明,耕作会导致所有组分中轻组有机碳的减少。Larney^[17]的研究也表明,连续种植春小麦的土壤中,免耕方式下轻组有机碳的含量比常规耕作要高 27%。常规耕作条件下,轻组有机碳在冬麦-冬麦种植土壤中约是冬麦-休闲轮作土壤中的 2 倍。冬麦-休闲轮作中,耕作方式对轻组有机质含量没有影响,但在冬麦-冬麦种植模式中,免耕土壤中轻组有机碳含量比常规耕作下要低。在本试验中翻耕处理土壤轻组有机碳含量要高于免耕处理,这可能是由于冬小麦-夏玉米的轮作方式造成的。另一方面,本研究中土壤轻组有机碳的比例较其他报道中的土壤偏低,也可能产生一定的影响。

Bremer^[4]的研究表明,施粪肥和牧草既能增加土壤中轻组有机质的含量,又能增加其在土壤总有机质中的百分含量。魏朝富等^[18]对紫色土的研究表明,单施化肥会导致土壤中轻组有机质的含量下降,而配施不同的有机肥和化肥会提高土壤中轻组有机质含量。本试验发现,施加底肥能提高土壤中轻组有机质含量,但不能增加其在土壤总有机质中的百分含量,可能是因为土壤轻组有机碳的比例本身较低的原因。Joseph 等^[19]认为秸秆还田能显著增加土壤表层的轻

组有机碳的含量,却对与土壤矿质颗粒紧密结合的多糖类有机碳量没有影响。在本研究中秸秆还田能增加土壤轻组有机碳含量,并且无论何种耕作方式,秸秆粉碎还田处理土壤轻组有机碳含量都要高于秸秆直接还田处理,因为粉碎处理的秸秆组织被机械破坏,当翻压入土时,与土壤接触面积大于整株处理。当温度、湿度条件适宜时,在微生物作用下,其分解速度显然是大于秸秆直接还田,有更多的有机碳进入到土壤轻组部分。

4 结论

(1)原状草地改变为农田后,砂粒含量降低,土壤颗粒有机碳的含量和在总有机碳中的比例也降低,且以秸秆还田影响最大。这种降低在 40 cm 以下最为明显。施加底肥、免耕和整株还田等农艺措施有助于提高土壤颗粒有机碳含量。

(2)原状草地改变为农田后,颗粒有机碳无明显规律性变化。秸秆还田使得 0~20 cm 土壤颗粒有机碳含量明显增加,且整株还田比粉碎还田更能增加 10~20 cm 土壤颗粒有机碳含量,而免耕对土壤颗粒有机碳的增加主要表现在 0~10 cm。

(3)原状草地改变为农田后,轻组土壤和轻组土壤有机碳的比例都下降,而施肥、免耕和秸秆还田会降低这种下降。土壤非保护性有机碳的比例也会显著降低,且非保护性有机碳主要分布在 0~5 cm 土层。

参考文献:

- [1] Freixo A A, Machado P, Dos Santos H P, et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64 (3-4): 221-230.
- [2] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1808.
- [3] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345-353.
- [4] Bremer E, Ellert B H, Janzen H H. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(5): 1398-1403.
- [5] Motavalli P P, Discekici H, Kuhn J. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 79(1): 17-27.
- [6] Skjemstad J O, Taylor J A, Janik L J, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term sugarcane monoculture[J]. *Australian Journal of Soil*

- Research*, 1999, 37(1): 151–164.
- [7] 武天云, Schoenau Jeff J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 477–481.
- WU Tian-yun, Schoenau Jeff J, LI Feng-min, et al. Appling of centrifugation for soil particle classification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 477–481.
- [8] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 63(3–4): 133–139.
- [9] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [10] Guggenberger G, Zech W. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Hueta Norte, Costa Rica[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 124(1): 93–104.
- [11] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681–689.
- [12] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(5): 1382–1386.
- [13] 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 Chang-ming, OUYANG Zhu, DONG Yu-hong. The impact of different fertilization model on different fractions of soil organic carbon and aggregate stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8): 887–892.
- [14] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(3): 435–464.
- [15] Conteh A, Blair G J, Macleod D A, et al. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 48(7): 1049–1058.
- [16] Skjemstad J O, Dalal R C, Barron P F. Spectroscopic investigations of cultivation effects on organic matter of Vertisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(2): 354.
- [17] Larney F J, Bremer E, Janzen H H, et al. Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 42(4): 229–240.
- [18] 魏朝富, 陈世正, 谢德体. 长期施用有机肥料对紫色水稻土有机无机复合性状的影响[J]. *土壤学报*, 1995: 159–166.
- WEI Chao-fu, CHEN Shi-zheng, XIE De-ti. Effect of long-term application of organic manures on characters of organo-mineral complex in purple paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995(2): 159–166.
- [19] Joseph Oyedele D, Schj Nning P, Sibbesen E, et al. Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 50(2): 105–114.