高雪莹, 孙元宏, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对黑钙土重组有机碳含量及有机无机复合的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1829-1835.
GAO Xue-ying, SUN Yuan-hong, ZHAO Xing-min, et al. Effects of adding corn straw on heavy fraction organic matter and organic-mineral complex of chernozem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1829-1835.

# 添加玉米秸秆对黑钙土重组有机碳含量及有机无机复合的影响

高雪莹, 孙元宏, 赵兴敏, 隋 标, 王鸿斌, 赵兰坡*

(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)

**摘 要**:为了科学评价土壤的固碳性能和潜力,以黄土和红土母质及其发育的黑钙土为供试土壤,在田间调查的基础上,分别采集耕层和母质层土壤样品,研究添加有机物料后土壤重组有机碳含量、有机无机复合状况的变化。针对东北玉米主产区黑钙土秸秆还田技术推广中亟待阐明的科学问题,通过室内恒温培养试验模拟了一个作物生长期内,黑钙土母质和耕层土壤添加不同比例的玉米秸秆后,重组有机碳含量和有机无机复合状况的变化。结果表明:随秸秆添加量的增加,供试耕层土壤和母质中的重组有机碳含量、原土有机碳复合量均呈同步增加趋势,但原土有机碳复合度呈逐步下降趋势。在耕层土壤中,原土有机碳含量越低的土壤,其重组有机碳增量和原土有机碳复合量增率越大,说明原土有机碳含量低的土壤具有更大的固碳潜力。母质层土壤重组有机碳增量、原土有机碳复合量增率和追加复合量均大于耕层土壤,说明母质的固碳潜力远大于耕层土壤,且红土母质的固碳潜力更强。

**关键词**:黄土母质;红土母质;黑钙土;重组有机碳;有机无机复合
**中图分类号**:X712 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2017)09-1829-07 doi:10.11654/jaes.2017-0186

## Effects of adding corn straw on heavy fraction organic matter and organic-mineral complex of chernozem

GAO Xue-ying, SUN Yuan-hong, ZHAO Xing-min, SUI Biao, WANG Hong-bin, ZHAO Lan-po*

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases, Changchun 130118, China)

**Abstract**: Based on information from a previous field investigation, soil samples from loess parent material, laterite parent material, and their corresponding developed topsoils of chernozem were collected. It is important to evaluate soil carbon sequestration and potential scientifically by studying the changes in the heavy fraction organic matter (HFOM) and organic-mineral complex after organic materials are added. Considering the scientific problems that need to be clarified for the technology of returning straw to chernozem in the main maize producing areas of Northeast China, the changes in the HFOM and organic-mineral complex were studied by adding different proportions of corn straw to the parent materials and their corresponding developed topsoils of chernozem in a crop growing period through laboratory incubation experimentation. The results showed that the HFOM increment, compound quantity (QC), and additional compound quantity (QAC) in parent materials and their corresponding developed topsoils increased with an increase in the amount of straw added, but compound degree (DC) and additional compound degree (DAC) showed a decreasing trend. For the topsoil, the increment of HFOM and the QC growth rate decreased with increasing organic carbon content, which indicates that soil with low organic carbon content has higher carbon sequestration

**收稿日期**:2017-02-19
**作者简介**:高雪莹(1990—),女,吉林长春人,硕士研究生,从事土壤肥力调控研究。E-mail:503878460@qq.com
* **通信作者**:赵兰坡 E-mail:zhaolanpo12@163.com
**基金项目**:国家自然科学基金项目(41403077);吉林省科技厅科技支撑计划项目(20130204050SF)
**Project supported**: The National Natural Science Foundation of China (41403077); The Science and Technology Support Program of Jilin Province, China (20130204050SF)

potential. Although the effect of organic carbon content on QAC had no obvious regularity, the QAC of the two kinds of soil parent materials with very low organic carbon content were higher than that of their corresponding developed topsoils. At the same time, the increment of HFOM and the increase rate of QC in the parent material were much greater than that of their corresponding developed topsoils, and those of the laterite parent material were higher than those of the loess parent material. This indicated the carbon sequestration potential of the parent material was much higher than that of their corresponding developed topsoils, and the carbon sequestration potential of the laterite parent material was greater than that of the loess parent material.

**Keywords**: loess parent material; laterite parent material; chernozem; heavy fraction organic matter(HFOM); organic-mineral complex

黑钙土是东北玉米主产区的重要耕作土壤[1]。黑钙土区属于半湿润半干旱型气候,成土母质以质地较黏重的黄土状沉积物和红土母质为主,成土过程主要是腐殖质积累和较弱的淋溶过程,在剖面一定深度有石灰反应[2]。土壤质地较轻,易发生干旱,养分缺乏、保水保肥能力和抗逆性较弱、潜在肥力低是黑钙土的主要肥力特征[2-4]。

目前,黑钙土改良培肥的主要措施是秸秆还田和增施有机肥。科研和生产实践证明,秸秆还田对于提高有机质含量、充分发挥土壤固碳性能、减少 $CO_2$ 等温室气体排放等具有重要作用[5-7]。但秸秆还田的效果既与秸秆还田的方式有关[8],也与土壤的固碳性能和潜力有关[9]。土壤中的重组有机碳是与土壤矿质胶体结合的有机碳,是土壤有机碳的主要赋存形式[10]。重组有机碳在土壤中比较稳定,对外界的干扰不敏感,因此是衡量土壤固碳性能大小的重要指标[11],研究土壤中添加秸秆后重组有机碳含量和有机无机复合能力的变化,可揭示秸秆还田后土壤有机质与矿物的复合能力和土壤的固碳性能[12-13]。但迄今为止,有关黑钙土的固碳性能和潜力的研究很少,特别是不同母质上发育的黑钙土的固碳性能和潜力、现时土壤的有机碳含量对土壤固碳性能和潜力是否有影响、不同秸秆添加量对黑钙土有机无机复合的影响等问题均有待深入研究。

基于上述情况,我们以黄土和红土母质及其发育的黑钙土为供试土壤,在田间调查的基础上,分别采集了耕层和母质层土壤样品,根据黑钙土区一季作物生长周期内,气温≥25 ℃的天数不超过 120 d 的实际情况,以玉米秸秆粉碎与土壤混合还田的方式,于室内设置秸秆还田的恒温培养试验,研究了不同秸秆添加量对耕层和两种成土母质的重组有机碳含量及有机无机复合的影响,旨在揭示东北地区两种成土母质及其发育的黑钙土耕层土壤对玉米秸秆碳的固持性能,同时为以秸秆还田为核心的低成本、环境友好型耕作模式的构建提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤和有机物料

供试土壤分别为发育在黄土母质和红土母质上的黑钙土耕层和母质层土壤。于 2015 年 5 月分别采自吉林省农安县伏龙泉镇、开安镇和吉林省松原市前郭县套浩太乡、额如乡、王府站镇。按不同的有机碳含量,采用蛇形采样法,分别采集 3 个黄土母质上发育的耕层土壤和 3 个红土母质上发育的耕层土壤的混合样品,采样深度均为 0~18 cm;另外还分别采集了有代表性的黄土母质和红土母质样品各 1 个。供试耕层土壤均为玉米连作土壤,连作年限均在 20 年以上,常年施用化肥,均已多年未施用过有机肥,秸秆的处理方式是打碎翻压还田、田间焚烧或将秸秆运回作为饲料。将上述供试土壤样品带回实验室,经风干后过 2 mm 筛备用,其基本理化性质如表 1 所示。

供试有机物料为玉米秸秆,采自吉林农业大学试验田。样品经自然风干、粉碎,过 1 mm 筛后备用。供试玉米秸秆的有机碳含量为 486.15 $g\cdot kg^{-1}$,全氮含量为 5.29 $g\cdot kg^{-1}$,C/N 为 91.9。

### 1.2 培养试验

培养试验按秸秆添加量占秸秆和土壤的总重(总重为 500 g,土壤以风干土为基准)不同分别设置 0%、0.5%、1%、2%、3%、5%、10%、15%,共 8 个处理,每个处理重复 3 次。不同处理称取的秸秆质量与土壤质量见表 2,将其充分混合后用一定量的蒸馏水将土壤含水量调整至 15%(相当于田间持水量的 60%)。将上述混合物搅拌均匀后装入长×宽×高=15.6 cm×11 cm×7 cm、体积约为 1200 mL 长方形带盖(盖上有通气孔)的塑料盒中,称重后放在 25 ℃的恒温培养箱中培养 120 d,每隔 6 d 通过称重补充水分以弥补蒸发损失量,120 d 后取出晾干备用。

### 1.3 测定项目与方法

土壤重组的提取方法[14]:采用相对密度分组法。称取过 60 目筛的风干土样 10.00 g 于 100 mL 离心管

表 1 供试黑钙土的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested chernozem

| 母质类型 | 层次 | 编号 | 采样地点 | 有机碳/ g·kg$^{-1}$ | 全氮/ g·kg$^{-1}$ | pH | 容重/ g·cm$^{-3}$ | DCB 可溶成分/ g·kg$^{-1}$ | 机械组成/% | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | <0.002 mm | 0.002~0.02 mm | 0.02~0.2 mm | >0.2 mm |
| 黄土 | 母质 | LC | 农安伏龙泉 | 1.07 | 0.16 | 7.36 | 1.43 | 17.63 | 28.79 | 13.29 | 44.27 | 13.65 |
| | 耕层 | LLC-Ap | 农安伏龙泉 | 8.81 | 0.78 | 5.09 | 1.36 | 11.03 | 18.90 | 7.78 | 68.60 | 4.72 |
| | 耕层 | LMC-Ap | 前郭套浩太 | 11.33 | 1.06 | 8.05 | 1.37 | 12.39 | 21.70 | 8.44 | 64.53 | 5.32 |
| | 耕层 | LHC-Ap | 农安开安 | 17.16 | 1.51 | 6.05 | 1.32 | 13.24 | 35.26 | 15.81 | 47.65 | 1.28 |
| 红土 | 母质 | RC | 农安伏龙泉 | 1.72 | 0.19 | 7.25 | 1.47 | 28.13 | 27.98 | 9.91 | 14.41 | 47.70 |
| | 耕层 | $RLC_1$-Ap | 前郭额如 | 9.29 | 0.76 | 5.13 | 1.43 | 11.84 | 10.41 | 4.41 | 61.45 | 23.73 |
| | 耕层 | $RLC_2$-Ap | 农安伏龙泉 | 9.60 | 0.85 | 7.11 | 1.41 | 13.26 | 12.09 | 5.16 | 65.67 | 17.08 |
| | 耕层 | RHC-Ap | 前郭王府站 | 13.20 | 1.05 | 5.97 | 1.35 | 14.18 | 16.68 | 7.70 | 53.91 | 21.71 |

注:DCB 可溶成分指游离态铁铝氧化物含量。

Note: DCB soluble component refers to the free iron-aluminum oxide content.

表 2 培养试验不同处理的土壤和秸秆的添加量

Table 2 The amount of soil and straw added to different treatments

| 处理 | CK | 0.5% | 1% | 2% | 3% | 5% | 10% | 15% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 秸秆质量/g | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 25 | 50 | 75 |
| 土壤质量/g | 500 | 497.5 | 495 | 490 | 485 | 475 | 450 | 425 |

中。向离心管中加入相对密度为 1.8 的重液($ZnBr_2$ 和蒸馏水添加比约为 1:1,用比重计测量其相对密度并调节至 1.8 g·cm$^{-3}$) 25 mL,连续振荡 1 h,使土壤充分分散。处理后的土样以 3000 r·min$^{-1}$ 的转速离心 10 min,将轻组有机物置于带有滤纸的玻璃漏斗中过滤。离心管内的土壤继续加重液反复清洗至无轻组有机物为止。离心管中的重组用 95%乙醇清洗 3 次,再用蒸馏水清洗 3 次,离心管中土样低温烘干,称重,将烘干的土样研磨过 60 目筛,备用。重组有机碳的测定采用重铬酸钾氧化法[14]。

原土有机碳复合量(QC)是指土壤中有机碳与土壤矿物复合的质量占土壤质量的比例;原土有机碳复合度(DC)是指土壤中复合的有机碳占土壤总有机碳的比例。土壤中添加有机物料后,增加的复合有机碳占土壤的比重,重组有机碳的增加量占土壤总有机碳增加量的比重,即表现为追加复合量(QAC)和追加复合度(DAC)[12]。涉及到的计算公式如下:

原土有机碳复合量(g·kg$^{-1}$)=(重组土质量×重组有机碳含量)÷土质量

原土有机碳复合度=复合量÷有机碳含量×100%

追加复合量(g·kg$^{-1}$)=增加的复合量-原土复合量

追加复合度=追加复合量÷追加有机碳含量×100%

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 和 Origin 8.5 统计软件进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层土壤重组有机碳含量的影响

不同秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层土壤重组有机碳含量的影响如图 1a 所示。随着秸秆添加量的增加,所有耕层土壤的重组有机碳含量均呈同步增加趋势,即使在秸秆添加量高达 15%的条件下,各耕层土壤的重组有机碳含量仍然在增加,尚未达到"饱和"状态,说明耕层土壤尚存在很大的固碳潜力。从图 1a 还可看出,6 个耕层土壤重组有机碳含量从大到小的顺序为 LHC-Ap、RHC-Ap、LMC-Ap、$RLC_2$-Ap、$RLC_1$-Ap 及 LLC-Ap。这一顺序与 6 个耕层土壤原土的有机碳含量大小顺序一致,说明在本试验条件下,原土有机碳含量在重组有机碳中仍然占有主导地位,尽管是不同成土母质类型发育的耕层土壤,但是对秸秆转化的腐殖质碳的固碳性能无明显影响。图 1a 中,随秸秆添加量的增加,两个成土母质的重组碳含量也迅速增加,特别是秸秆添加量在 0.5%~10%区间内,重组有机碳含量几乎呈直线上升,曲线的陡度显著高于耕层土壤。当秸秆添加量达 15%时,黄土母质的重组有机碳含量高达 14.00 g·kg$^{-1}$,而红土母质重组有机碳含量高达 16.44 g·kg$^{-1}$,红土母质的重组有机碳含量总体上大于黄土母质,说明前者的固碳性能略强一些。

图 1b 是重组有机碳增量(添加玉米秸秆的耕层和母质层土壤重组有机碳含量与未添加秸秆的对照重组有机碳含量的差值)与秸秆添加量的关系曲线。可见,各耕层土壤及母质的重组有机碳增量均随着秸

秆添加量的增加而呈逐步增加趋势。但从各曲线在图中的上下顺序来看，原土有机碳含量很低的两个母质的曲线均位于 6 个耕层土壤的上方，而在耕层土壤中，也有原土有机碳含量越高、曲线位置越低的趋势。由图 1b 还可看出，两个供试母质原土有机碳含量极低，但其重组有机碳增量均随秸秆添加量的增加而呈迅速上升趋势。当秸秆添加量达 15%时，黄土母质的重组有机碳增量较其三个耕层土壤重组有机碳增量的平均值(8.96 g·kg$^{-1}$)增加了 4.05 g·kg$^{-1}$，而红土母质重组有机碳增量较其三个耕层土壤重组有机碳增量的平均值(9.55 g·kg$^{-1}$)增加了 5.93 g·kg$^{-1}$，说明母质的固碳能力明显大于耕层土壤，其中红土母质的固碳能力要比黄土母质略强。通过相关性分析可知，重组有机碳增量与原土有机碳含量呈极显著负相关($r$=−0.890**)，与原土全氮含量呈极显著负相关($r$=−0.871**)，与 DCB 可溶成分(游离氧化铁和氧化铝)呈极显著正相关($r$=0.855**)。

### 2.2 秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层土壤有机无机复合的影响

不同秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层 QC、DC 的影响如图 2 所示。QC 随着秸秆添加量的增加而增加，当秸秆添加量<10%时，QC 呈快速增加趋势，同时还可看出在此范围内两种母质曲线的陡度显著高于耕层土壤。6 个耕层土壤重组有机碳含量曲线在图中由上至下的次序也与 6 个耕层土壤原土的有机碳含量大小顺序一致。从增加幅度来看，与对照相比，当秸秆添加量为 15%时，LLC−Ap、LMC−Ap、LHC−Ap 的 QC 增率分别为 118.90%、99.07%及 37.70%，$RLC_1$−Ap、$RLC_2$−Ap、RHC−Ap 的 QC 增率分别为 122.79%、119.95%及 76.49%。说明 QC 增率随着原土有机碳含量的增加呈下降趋势。添加秸秆能够促进土壤中有机碳与土壤矿物的复合，耕层土壤有机碳含量越低，复合量越高。当秸秆添加量为 15%时，黄土母质和红土母质 QC 的增率分别为 1 159.78%、1 553.82%，远大于

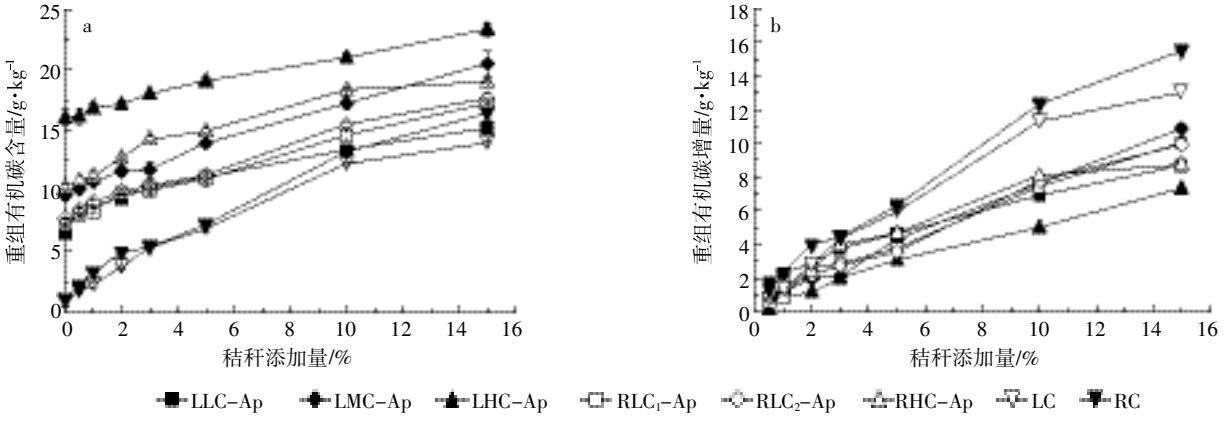


**图 1 不同秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层土壤重组有机碳含量及其增量的影响**

Figure 1 Different straw addition on HFOM and increment in top soil and parent material of chernozem

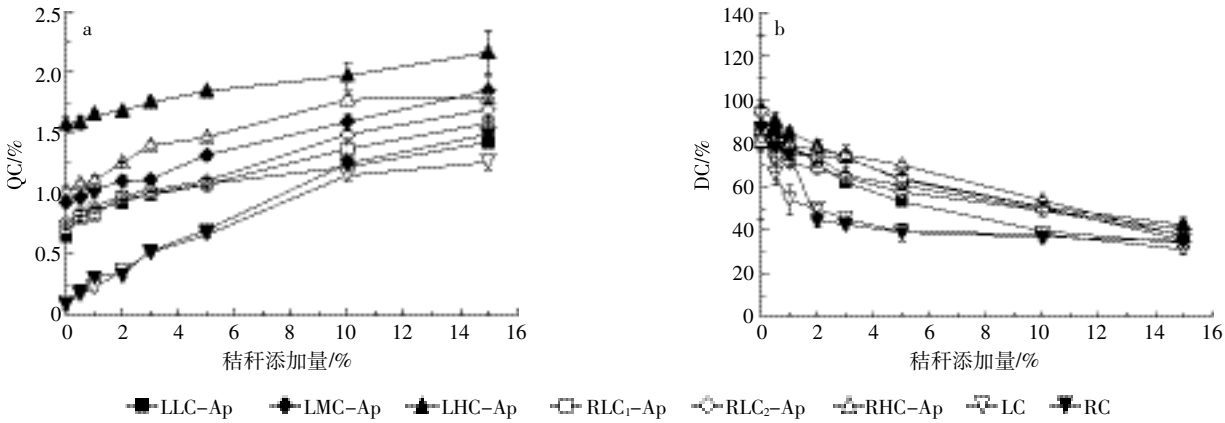


**图 2 不同秸秆添加量对黑钙土耕层及母质层原土有机碳复合量(QC)、原土有机碳复合度(DC)的影响**

Figure 2 Different rates of straw addition on QC and DC in top soil and parent material of chernozem

耕层土壤。说明两种母质的复合能力高于耕层土壤,并且红土母质的复合能力更强。

黑钙土耕层和母质层的 DC 均随着秸秆添加量的增加而减小,与 QC 呈相反趋势,说明秸秆添加量越多,越不利于秸秆的腐解,导致轻组有机碳的增加速率大于重组有机碳的增加速率。从图 2b 可看出,当秸秆添加量达 15%时,与对照相比,黄土母质发育的三个耕层 DC 减率的平均值为 56.19%,红土母质发育的三个耕层 DC 减率的平均值为 55.16%,说明耕层土壤有机碳复合程度占土壤总有机碳的比例相差不多,母质类型对耕层土壤 QC 的影响不大。在本试验秸秆添加范围内,黄土母质和红土母质的 DC 分别小于其发育的耕层土壤,当秸秆添加量达 15%时,黄土母质 DC 减率为 66.25%,红土母质 DC 减率为 59.93%,说明母质的有机碳复合程度占土壤总有机碳的比例比耕层小。与黄土母质相比,红土母质的有机碳复合程度占土壤总有机碳的比例大。

不同秸秆添加量对黑钙土耕层和母质层土壤 QAC 和 DAC 的影响见图 3。无论是耕层还是母质层土壤,其 QAC 均随着秸秆添加量的增加而逐步增大,至于原土有机碳含量对 QAC 的影响,图 3a 中虽看不出明显的规律性,但有机碳含量极低的两种成土母质的 QAC 曲线均位于耕层土壤之上的事实,还是反映出低原土有机碳含量条件有利于 QAC 的提升。从图 3b 可以看出,随秸秆添加量的增加,耕层和母质层土壤的 DAC 均呈下降趋势,原土有机碳含量的影响规律性进一步弱化,母质与耕层土壤的差别进一步缩小。

## 3 讨论

重组有机碳是与土壤矿物质结合并以有机无机复合体状态存在的碳[11],重组碳含量的高低与土壤矿质胶体含量和组成密切相关[15-16]。本试验研究表明:土壤中添加有机物料后,均可不同程度提高重组有机碳的含量,而且原土有机碳含量越低的耕层土壤,其固碳能力越强,添加玉米秸秆后,其重组有机碳的增量也就越大,与前人研究结果[17-19]一致。但是,本研究还发现母质层的固碳能力远大于耕层土壤,红土母质的固碳能力略大于黄土母质。这是因为:①土壤中的粘粒是土壤有机碳重要的载体[20-21],原土有机碳含量高的土壤,其有机碳的吸附位点容易达到饱和,因此对外源碳的吸附能力降低[22]。与耕层土壤相比,母质层土壤的有机碳吸附位点多处于"空置"状态,有利于其对有机碳的吸附[23]。②红土母质的 DCB 可溶成分(游离态铁铝氧化物含量)明显大于黄土母质,并均大于耕层土壤(表 1)。铁铝氧化物是土壤中重要的矿质胶结物质,是土壤中可变正电荷和负电荷的主要载体,它们有较大的比表面积和表面电荷,其含量越多,对有机碳的吸附作用越强[24]。

为了探究短期内黑钙土对秸秆碳的最大固持能力,本研究设置了不同梯度的秸秆添加量。由试验结果可知,即使在秸秆添加量(高达 15%)远远大于生产实践、培养时间仅相当于东北一个作物生长季的条件下,耕层土壤重组碳也仍然呈现较高的增长态势,说明土壤中黏粒胶体结合有机碳的位点远没有达到饱和状态。本研究结果从另一侧面说明,当外源有机碳供应充足的条件下,土壤重组碳在东北地区一个作物生育期内可较为迅速地上升到一定水平,从而为生产实践中有机质快速提升技术措施的制定奠定了理论支撑。但在现实生产条件下,秸秆还田对土壤有机质含量提升作用一般比较缓慢,其原因主要与秸秆还田

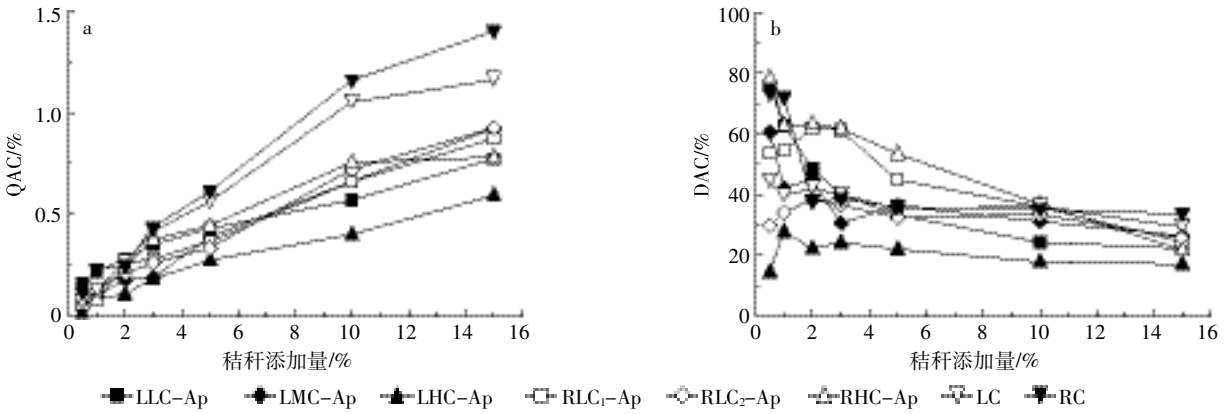


**图 3 不同秸秆添加量对黑钙土耕层及母质层追加复合量(QAC)、追加复合度(DAC)的影响**

Figure 3 Different rates of straw addition on QAC and DAC in top soil and parent material of chernozem

量和还田方式有关。在黑钙土区玉米秸秆产量一般与玉米籽粒产量相当,即使每年都将玉米秸秆全量还田(按秸秆量 9000 kg·hm$^{-2}$、耕层土壤重量 2250 t·hm$^{-2}$),其占耕层土壤重量的比率也仅为0.4%,矿化后的残留碳量一般不超过 31.3%[17]。因此,在短时期内提升有机碳含量的效果十分有限[25]。如果采取秸秆地表覆盖方式还田,其对耕层土壤有机碳的提升效果将会更加有限[26]。

由本试验研究可知:土壤添加玉米秸秆后,可以增加 QC,降低 DC,与傅积平等[27]研究一致。土壤中添加了秸秆后,微生物活性增加,促进秸秆碳的矿化及腐殖化作用,进而使土壤重组有机碳含量增加。但当秸秆添加量过大时,可能会使 C/N 增大,从而抑制微生物活性,进而抑制重组有机碳含量的增长,致使 DC 呈下降趋势[17,28]。

本研究中黑钙土添加有机物料后,均可不同程度提高土壤的 QAC, 其作用效果主要取决于有机物料的化学组成,并随物料添加量的增加而提高[29-30]。但对土壤 DAC 的影响却有所不同,随秸秆添加量的增加,整体呈下降趋势,与傅积平等[27]的研究结果一致。然而姜岩等[17]在连续 2 年的盆栽试验中发现,在玉米秸秆添加量 0.25%~9.0%,并施用一定量的氮、磷化肥的条件下,DAC 随玉米秸秆添加量的增加而提高。本研究中, 由于没有对添加秸秆的供试土壤进行 C/N 调整,在较低的秸秆添加量范围内,微生物活性可能不受 C/N 的制约,DAC 随着秸秆添加量的增加呈同步增加趋势;但在秸秆添加量较高、培养时间较短的条件下,随秸秆添加量的增加,C/N 也不断增大,致使微生物活性及秸秆碳的转化受到抑制, 造成土壤 QAC 的增加速度逐步小于土壤有机碳的增加速度,使 DAC 下降,说明试验条件对土壤 DAC 的变化有很大影响。

## 4 结论

(1)随着秸秆添加量的增加,供试黑钙土耕层和母质层土壤的重组有机碳含量、QC、QAC 均显著增加,DC、DAC 均降低。

(2)通过对比重组有机碳增量和 QC 增率可知,原土有机碳含量越高的土壤其 QC 增率越小,且母质层远高于耕层土壤,说明有机碳含量越低的土壤固碳潜力越大。红土母质的固碳潜力大于黄土母质,母质层均大于耕层土壤。

**参考文献:**


[1] 赵兰坡, 杨学明, 路立平, 等. 长期连作玉米的黑钙土、风沙土中有机无机复合体组成及有机碳分布的特征[J]. 土壤通报, 1996, 27(3): 120-123.
ZHAO Lan-po, YANG Xue-ming, LU Li-ping, et al. The effect of long-term continuous cropping of maize on the organic-mineral complex component and organic carbon distribution in chernozem and sands soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(3): 120-123.

[2] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Soil and Fertilizer Station in Jilin Province. Jinlin soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

[3] 刘 楠, 赵兰坡. 添加玉米秸秆和硫酸铝对淡黑钙土化学性质的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 84-91.
LIU Nan, ZHAO Lan-po. Effects of adding straw and aluminum sulfate on chemical properties in light chernozems[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 84-91.

[4] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
PAN Jian-ling, DAI Wan-an, SHANG Zhan-huan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526-535.

[5] 董珊珊, 窦 森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 322-328.
DONG Shan-shan, DOU Sen. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 322-328.

[6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[7] 赵兰坡. 施用作物秸秆对土壤的培肥作用[J]. 土壤通报, 1996, 27(2): 76-78.
ZHAO Lan-po. Effect of application of crop stalks on soil fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(2): 76-78.

[8] Zhao X M, He L, Zhang Z D, et al. Simulation of accumulation and mineralization($CO_2$ release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156: 148-154.

[9] 高小龙. 有机物料对黄土高原旱作农田土壤固碳特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
GAO Xiao-long. Effects of organic materials on the ability of soil carbon sequestration of dry farmland of loess plateau in central Gansu[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.

[10] 张 国, 曹志平, 胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1921-1930.
ZHANG Guo, CAO Zhi-ping, HU Chan-juan. Soil organic carbon fraction methods and their applications in farmland ecosystem research [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1921-1930.

[11] 魏怀建, 李玉成, 王 宁, 等. 不同植被恢复模式下煤矸石充填复垦

土壤物理性质与有机无机复合体的关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6):207-212.
WEI Huai-jian, LI Yu-cheng, WANG Ning, et al. Relationship between physical properties and organic-mineral complexes of reclaimed soil back-filled with coal gangue under various vegetation restoration models[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6):207-212.

[12] 傅积平, 张绍德, 褚金海. 土壤有机无机复合度测定法[J]. 土壤肥料, 1978(4):40-42.
FU Ji-ping, ZHANG Shao-de, CHU Jin-hai. The methods of organic-mineral complex[J]. *Soils and Fertilizers*, 1978(4):40-42.

[13] Schnitzer M, Khan S U. Humic substances in the environment[M]. New York:M Dekker, 1972.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Scientech Press, 2000.

[15] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同林分结构土壤有机碳质量分数特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1418-1427.
LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui, QI Yan-bing, et al. Soil organic carbon under different planting structures on the tablelands of loess plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6):1418-1427.

[16] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro aggregate turnover and micro aggregate formation:A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14):2099-2103.

[17] 姜　岩, 窦　森. 土壤施用有机物料后重组有机质变化规律的探讨Ⅰ. 对有机无机复合及腐殖质结合形态的影响[J]. 土壤学报, 1987, 24(2):97-104.
JIANG Yan, DOU Sen. Effect of application of organic materials on the properties of humic substances in organo-mineral complexes of soils:Ⅰ. Effect of organic materials on the organo-mineral complexation and forms of humus[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(2):97-104.

[18] 颜廷梅, 张喜群, 徐　琪. 稻草对砂姜黑土重组有机碳氮的影响[J]. 土壤, 1993(1):18-20.
YAN Ting-mei, ZHANG Xi-qun, XU Qi. Effects of straw on heavy fraction organic matter of C and N in Shajiang black soil[J]. *Soil*, 1993(1):18-20.

[19] 张　雷. 有机物料、温度和土壤水分对黑土有机碳分解的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2004.
ZHANG Lei. Effects of organic material and temperature and soil moisture on organic carbon decomposition of black soil[D]. Harbin:Northeast Agriculture University, 2004.

[20] Huntington T. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the Southern USA[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59(5):1459-1467.

[21] Richter H, Lorenz W, Bahadir M. The global equivalence ratio concept-tion laboratory scale combustion experiments[J]. *Chemosphere*, 1999, 39(4):555-562.

[22] 王金洲. 秸秆还田的土壤有机碳周转特征[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
WANG Jin-zhou. Soil organic carbon turnover under straw return[D]. Beijing:China Agricultural University, 2015.

[23] 刘满强, 胡　锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6):2642-2650.
LIU Man-qiang, HU Feng, CHEN Xiao-yun. A review on mechanism of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2642-2650.

[24] Oades J M. The retention of organic matter in soil[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5(1):35-37.

[25] Zhang W D, Wang X F, Wang S L. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition:A meta-analysis[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2):e54779.

[26] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2495-2500.
WAN Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Field managements affect yield, soil carbon, and greenhouse gases emission of winter wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2495-2500.

[27] 傅积平, 张敬森, 熊　毅. 太湖地区水稻土复合胶体的特性[J]. 土壤学报, 1983, 20(2):112-128.
FU Ji-ping, ZHANG Jing-sen, XIONG Yi. The properties of colloidal complexes of paddy soils in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, 20(2):112-128.

[28] 韩志卿, 张电学, 陈洪斌, 等. 长期施肥对褐土有机无机复合性状演变及其与肥力关系的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(6):720-723.
HAN Zhi-qing, ZHANG Dian-xue, CHEN Hong-bin, et al. The effect of long-term fertilization on the relationship between the development of organic-mineral in cinnamon soil and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6):720-723.

[29] 窦　森. 有机物料对黑钙土的培肥作用[J]. 吉林农业大学学报, 1986, 8(4):45-52, 109-110.
DOU Sen. Effect of application of organic materials on improving soil fertility of chernozem[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1986, 8(4):45-52, 109-110.

[30] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2):236-241.
MA Jun-yong, LI Ke-jiang, CAO Cai-yun, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2):236-241.