

李晓庆, 赵承森, 孟雨田, 等. 玉米秸秆对不同有机碳含量的黑土有机碳库的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 39-46.

玉米秸秆对不同有机碳含量的黑土有机碳库的影响

李晓庆, 赵承森, 孟雨田, 徐晴晴, 陈琳, 马晓伟, 刘锡博, 王宏燕, 赵伟
(东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】研究玉米秸秆不同添加量对不同有机碳含量的黑土土壤有机碳库的影响, 为提高退化的黑土质量以及利用秸秆修复退化黑土提供重要参考。【方法】通过室外培养法, 在 2 种不同有机碳含量的黑土中添加不同量(w) 的玉米秸秆 (0.5%、1.5% 和 2.5%), 研究黑土有机碳库中总有机碳 (TOC)、易氧化有机碳 (ROC)、微生物量碳 (MBC)、溶解性有机碳 (DOC)、颗粒有机碳 (POC)、轻组有机碳 (LFOC)、矿物结合态有机碳 (MOC)、重组有机碳 (HFOC) 和惰性碳 (IOC) 的含量变化及各组分之间的相关关系。【结果】不同添加量的玉米秸秆均可增加 2 种有机碳含量黑土的 TOC、ROC、MBC、DOC、POC、LFOC、MOC 和 IOC 含量, 且对低有机碳含量的黑土提高效果更明显, 但却降低了 2 种黑土的 HFOC 含量。土壤有机碳库各组分除 LFOC 和 HFOC 之外均与 TOC 具有极显著正相关关系, ROC、MBC、DOC 和 POC 含量之间具有极显著相关性。【结论】添加不同量玉米秸秆对 2 种有机碳含量的黑土均有一定的影响, 高添加量秸秆施入可以有效提升高、低有机碳含量黑土的有机碳库组分, 对低有机碳含量的黑土效果更好。在本试验玉米秸秆添加范围内, 最佳添加质量分数为 2.5%。

关键词: 黑土; 玉米秸秆; 有机碳组分; 碳库; 土壤修复
中图分类号: S158 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2018)06-0039-08

Effects of maize straw on organic carbon pool in different organic carbon with different contents of organic carbon in black soil

LI Xiaoqing, ZHAO Chengsen, MENG Yutian, XU Qingqing, CHEN Lin, MA Xiaowei,
LIU Xibo, WANG Hongyan, ZHAO Wei
(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】 To investigate the effects of different addition levels of maize straw on organic carbon pool of black soil with different organic carbon contents, and provide important references for improving the quality of degraded black soil and repairing with straw. 【Method】 Different amounts (0.5%, 1.5%, and 2.5%) of maize straw were added to black soils with two different organic carbon contents by outdoor culture method to study the content changes of total organic carbon (TOC), readily oxidizable organic carbon (ROC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), light fraction organic carbon (LFOC), mineral-bound organic carbon (MOC), high fraction carbon soil (HFOC) and inert organic carbon (IOC), and correlations among each component of the soil. 【Result】 All three straw amounts applied increased the contents of TOC, ROC, MBC, DOC, POC, LFOC, MOC, and IOC in two black soils. The enhancing effects were more obvious on the soil with low organic carbon content than the soil with high organic

carbon content. The HFOC contents of the two black soils decreased. All the components of soil organic carbon pool except LFOC and HFOC had highly significant positive correlations with TOC. Also the correlation relationships between ROC, MBC, DOC contents and POC content in each treatment were highly significant.

【Conclusion】 All three straw adding amounts have certain effects on the black soils with two kinds of organic carbon contents. The application of high straw adding amount can effectively enhance the carbon pool component contents of two soils, especially the soil with low organic carbon content. In the range of straw adding amount, the best treatment is mass ratio 2.5%.

Key words: black soil; maize straw; organic carbon component; carbon pool; soil remediation

由于多年来不合理的开发方式、耕作模式、粗放式经营以及自然环境的变化,东北黑土区土壤中有有机碳大量损失,土壤肥力呈现整体退化的趋势,对我国的粮食安全产生了一定的威胁^[1]。秸秆还田是解决秸秆大量焚烧问题、提高退化土壤碳储量和农业生态系统土壤肥力及作物生产力的有效管理手段,也是一种可持续耕作模式^[2]。土壤碳库是陆地生态系统中最大且周转时间最长的碳储库,对碳循环、全球气候变化与温室效应有很重要的作用,其中发挥显著影响作用的是有机碳部分^[3]。以往对土壤有机碳库组分的研究,主要是总有机碳和有机碳库中的一、二种有机碳的变化及其相互关系方面,表明土壤有机碳库中每一种碳库组分都能反映出土壤的某些生物活性和碳组分转化特征,但都只是从某些侧面来揭示的,并不能全面分析或解释土壤有机碳组分在土壤中起到有效作用的内在机理,而目前全面分析各种碳组分及其相互关系的研究还很少^[4]。秸秆还田在提高土壤有机碳积累方面备受关注^[5]。陈鲜妮等^[6]的长期定位试验研究表明,秸秆直接还田既能明显提高土壤有机碳储量,也能显著改善土壤有机碳的质量和活性,还能够提高土壤有机碳组分含量。Zhang 等^[7]发现在一定范围内,有机碳含量随着秸秆添加量增加而增加,灌区玉米秸秆还田量小于 9 000 kg·hm⁻² 时,秸秆每增加 1 000 kg·hm⁻²,有机碳含量增加 40 mg·kg⁻¹。目前的报道多数集中于不同添加量秸秆对土壤易氧化有机碳、微生物量碳和溶解性有机碳含量的影响^[8],而对稳定性碳库组分的研究较少。在不同的有机碳背景下,秸秆还

田对土壤有机碳组分的影响尚不多见。而且以往在秸秆对土壤碳库组分的影响方面,主要研究总有机碳及不稳定性有机碳库中的二三种有机碳较多^[9],全面研究分析土壤中各形式不稳定性碳和稳定性碳的较少。本研究采用室外培养法,以东北的黑土为对象,研究了不同的秸秆还田量对不同有机碳含量的黑土有机碳库组分含量变化及各组分之间的相关关系,有助于明确秸秆还田后固碳减排的机理,为提高秸秆合理资源化利用、促进东北地区黑土可持续发展和生态环境的保护等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土壤 1: 土壤有机碳含量低的黑土,取自黑龙江省宾县;土壤 2: 有机碳含量高的黑土,取自黑龙江省绥化。在 2 个土壤样地均采用蛇形布点、多点混合的方法进行采样,采集 0~20 cm 的表层土壤。将采集的土壤样品风干并筛除植物残体及其他固体杂质,磨细,过 2 mm 筛,备用。供试土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 供试秸秆

供试玉米秸秆取自黑龙江省哈尔滨市香坊农场试验田,粉碎过 1 mm 筛。供试玉米秸秆的全氮、全磷、全钾和碳含量分别为 10.80、7.35、7.55 和 462.60 g·kg⁻¹、pH 为 5.86。

1.3 试验设计

本试验始于 2016 年 5 月,采用室外盆栽培养,试验区设在东北农业大学实验区 (45°44′25.18″N,

表 1 试供土壤的基本理化性质
Table 1 The physical and chemical properties of the soils tested

供试土壤	pH	w/(g·kg ⁻¹)			w/(mg·kg ⁻¹)		
		有机碳	全氮	全磷	碱解氮	速效磷	速效钾
土壤1	6.60	10.8	0.29	0.24	142.3	47.6	256.2
土壤2	6.28	41.7	1.68	1.14	283.6	82.9	318.3

126°43'22.50"E), 该区为半湿润温带大陆性季风气候, 年均气温 3.6℃。培养期降水总量为 436 mm, 降雨期集中在 7—8 月份。

试验设 2 个试验因子: 秸秆添加量和土壤有机碳含量。其中, 秸秆添加量 (w) 取 0.5%、1.5% 和 2.5% 共 3 个水平, 土壤有机碳含量取 10.8 和 41.7 g·kg⁻¹ 2 个水平, 共设 8 个处理, 分别为: 土壤 1(简称 LCK)、土壤 1+0.5%(w) 玉米秸秆 (LS1)、土壤 1+1.5% (w) 玉米秸秆 (LS2)、土壤 1+2.5%(w) 玉米秸秆 (LS3)、土壤 2(HCK)、土壤 2+0.5%(w) 玉米秸秆 (HS1)、土壤 2+1.5%(w) 玉米秸秆 (HS2)、土壤 2+2.5%(w) 玉米秸秆 (HS3), 每个处理 3 次重复, 双因素完全随机区组排列。将玉米秸秆按照 0.5%、1.5% 和 2.5% 的质量比分别与土壤 1 和土壤 2 均匀混合, 灌装于塑料桶 (高度 27.9 cm, 桶口直径 33.4 cm, 桶底直径 25.2 cm) 中, 每桶装土壤 15 kg, 按照上述设计共装土壤 24 桶, 置于试验区内, 雨水与日照等同自然界情况。

试验持续培养 150 d, 共取 7 次土样, 每次取样前调节土壤含水量 (w) 至 25%, 分别在第 15、30、45、60、90、120、150 天取样, 每次取样后依据随机区组法调换塑料桶。取回的样品一部分风干, 一部分直接测微生物量碳, 剩余置于冰箱 4℃ 条件下保存。

1.4 测定指标与方法

土壤基本性质测定参照土壤农化分析方法^[10]。秸秆的基础指标测定参照有机肥料常规测定方法; 土壤总有机碳 (TOC) 含量的测定采用重铬酸钾外加热法^[10]; 土壤易氧化有机碳 (ROC) 含量的测定采用 333 mmol·L⁻¹ 的 K₂MnO₄ 氧化法^[11], 测定样品在波长 565 nm 下的光密度; 土壤微生物量碳 (MBC) 含量的测定采用三氯甲烷熏蒸法^[12], 用 TOC 仪测定; 土壤溶解性有机碳 (DOC) 含量的测定, 称取 5.00 g 风干土, 按水土质量比为 2:1 添加双蒸水, 在

室温 (25±1)℃、180 r·min⁻¹ 振荡 30 min, 再离心 10 min (8 000 r·min⁻¹), 过 0.45 μm 微孔滤膜, 收集滤液用于测定; 土壤颗粒有机碳 (POC) 和矿物结合态有机碳 (MOC) 含量通过六偏磷酸钠分散法测定^[13], $w(\text{POC})=\text{颗粒物中有有机碳含量}\times\text{颗粒物占土壤质量的百分比}$, MOC 含量采用差值法得出; 土壤轻组有机碳 (LFOC) 和重组有机碳 (HFOC) 含量的测定采用土壤密度分组方法^[14], $w(\text{LFOC})=\text{轻组物中有有机碳的质量比}\times\text{轻组物占土壤的质量百分比}$, HFOC 含量采用差值法得出; 土壤惰性有机碳 (IOC) 含量的测定采用酸水解法^[15], 称取 2.00 g 过 2 mm 筛的风干土样于消煮管中, 加入 6 mol·L⁻¹ 盐酸, 在 115℃ 条件下消煮 16 h, 样品冷却后用蒸馏水洗至中性, 然后在 55℃ 条件下烘干, 研磨过 180 μm 筛, 用重铬酸钾-外加热法测得的有机碳含量即为 IOC 含量。

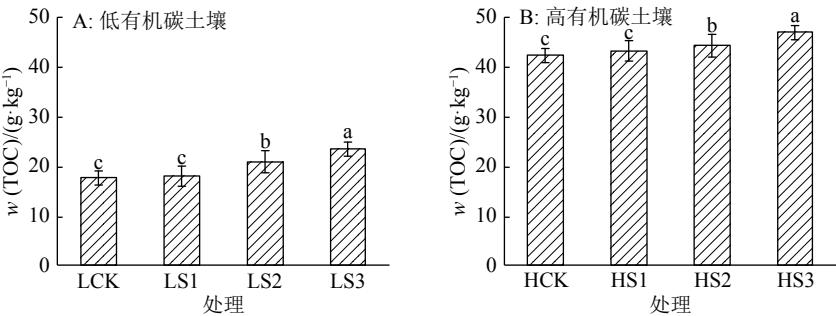
1.5 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据处理, 用 SPSS 22.0 进行单因子方差分析 (ANOVA) 和 Pearson 相关性检验。

2 结果与分析

2.1 添加秸秆对 2 种黑土总有机碳含量的影响

培养 150 d 后各处理黑土的总有机碳含量如图 1 所示, 在低有机碳含量土壤中, 与 LCK 相比, 秸秆处理土壤 TOC 含量增加了 1.74%~32.92%, LS2 和 LS3 处理都不同程度显著提高了土壤 TOC 含量 ($P<0.05$)。其中 LS3 提高幅度最大, 比 LCK 提高了 5.79 g·kg⁻¹。在高有机碳含量土壤中, 与 HCK 相比, 秸秆处理土壤 TOC 含量增加了 2.42%~11.15%, HS3 提高幅度最大, 比 HCK 提高了 4.68 g·kg⁻¹。由此可见, 施入 2.5% 的玉米秸秆对土壤 TOC 含量提高最多, 且对低有机碳黑土 TOC 含量的提升效果更佳。



各图中, 凡是柱子上方标有相同小写字母者表示不同处理差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 1 秸秆对不同土壤总有机碳 (TOC) 含量的影响

Fig. 1 Effect of straw on total organic carbon (TOC) content of different soil

2.2 添加秸秆对 2 种黑土有机碳库组分的影响

2.2.1 添加秸秆对 2 种黑土易氧化有机碳含量的影响 如图 2 所示,各处理土壤 ROC 含量整体表现较为平缓,先逐渐上升后缓慢下降,最后趋于稳定。在低有机碳含量土壤中,LS1 和 LS2 处理土壤 ROC 含量在第 60 天达到最高值,分别是 LCK 的 1.42 和 1.69 倍 ($P<0.05$);LS3 处理土壤 ROC 含量在第 45 天达到最高值,是 LCK 的 1.66 倍 ($P<0.05$)。在高有机碳含量土壤中,HS2 和 HS3 处理土壤 ROC 含量在第 45 天达到最高值,分别是 HCK 的 1.72 和 1.51 倍 ($P<0.05$);HS1 处理土壤 ROC 含量在第 60 天达到最高值,是 HCK 的 1.22 倍 ($P<0.05$)。从整个培养期平均水平来看,HS3 和 LS3 处理土壤的 ROC 含量最高,分别为 13.08 和 $5.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是 HCK 的 1.49 倍、LCK 的 1.44 倍 ($P<0.05$)。因此,施用秸秆在短期内有利于土壤 ROC 的积累,对 2 种黑土的 ROC 含量提高幅度基本相同。可见添加 2.5% 秸秆处理的效果最好。

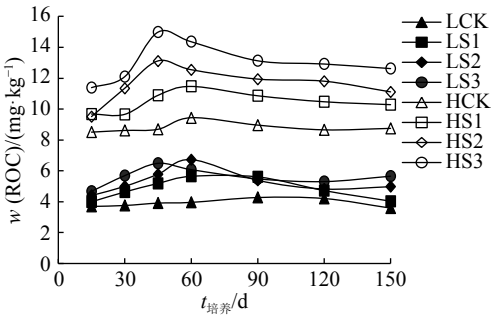


图 2 土壤易氧化有机碳 (ROC) 含量的变化
Fig. 2 Change of readily oxidizable carbon (ROC) content in soil

2.2.2 添加秸秆对 2 种黑土微生物量碳含量的影响 如图 3 所示,各处理土壤 MBC 含量表现为先升高后降低趋于平缓的趋势,在第 30~60 天增长幅度较大。在低有机碳含量土壤中,LS3 处理土壤 MBC 含量在第 45 天达到最高值,是 LCK 的 1.87 倍 ($P<0.05$),从整个培养期平均水平来看,LS1、LS2 和 LS3 秸秆处理分别较 LCK 显著提高了 49.65%、69.35% 和 78.05% ($P<0.05$);在高有机碳含量土壤中,HS3 处理土壤 MBC 含量在第 60 天达到最高值,是 HCK 的 1.75 倍 ($P<0.05$),从整个培养期平均水平来看,HS1、HS2 和 HS3 处理分别较 HCK 显著提高了 32.10%、45.88% 和 55.30% ($P<0.05$)。可以看出,对土壤 MBC 提升效果最好的是秸秆添加量为 2.5% 的处理,施用秸秆在短期内对土壤 MBC 含量的提高有促进作用,且秸秆对低有机碳含量黑土 MBC 含量的提高效果更好。

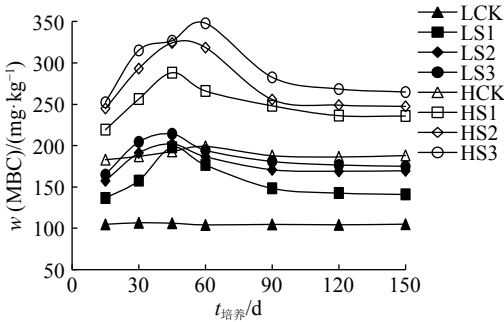


图 3 土壤微生物量碳 (MBC) 含量的变化
Fig. 3 Change of microbial biomass carbon (MBC) content in soil

2.2.3 添加秸秆对 2 种黑土溶解性有机碳含量的影响 如图 4 所示,各处理土壤 DOC 含量呈现先升高后降低趋于平缓的趋势,与土壤 MBC 含量变化趋势相似,各处理土壤 DOC 含量第 30~60 天增长幅度较大。不同处理土壤 DOC 含量总体表现为秸秆添加量为 2.5% 处理>1.5% 处理>0.5% 处理。从整个培养期平均水平来看,在低有机碳含量土壤中,LS1、LS2 和 LS3 秸秆处理分别较 LCK 显著提高了 47.07%、62.95% 和 58.95% ($P<0.05$);在高有机碳含量土壤中,HS1、HS2 和 HS3 秸秆处理分别较 HCK 显著提高了 28.45%、40.73% 和 48.55% ($P<0.05$)。

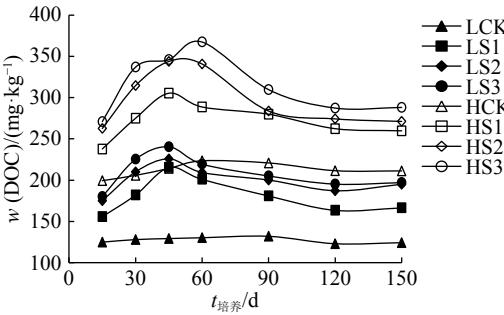
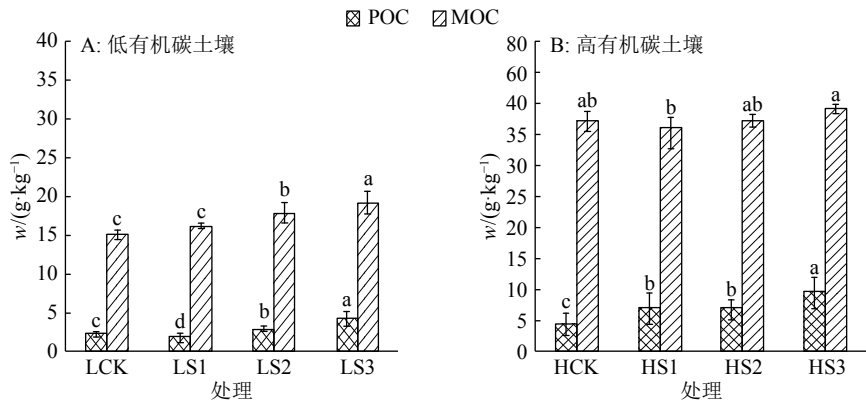


图 4 土壤溶解性有机碳 (DOC) 含量的变化
Fig. 4 Change of dissolved organic carbon(DOC) content in soil

2.2.4 添加秸秆对 2 种黑土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量的影响 培养 150 d 后,各处理黑土的颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量如图 5 所示,在低有机碳含量土壤中,LS1 处理的土壤 POC 含量是 LCK 的 80.53%,LS2 和 LS3 均较 LCK 显著 ($P<0.05$) 提高,LS3 处理土壤 POC 含量最高,达到 $4.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 LCK 的 1.87 倍,LS2 是 LCK 的 1.31 倍。LS3 处理土壤 MOC 含量最高,可达到 $19.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 LCK 的 1.27 倍,其次是 LS2 处理,其土壤 MOC 含量为 $17.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 LCK 的



各图中, 相同柱子上方凡是标有相同小写字母者, 表示秸秆不同处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

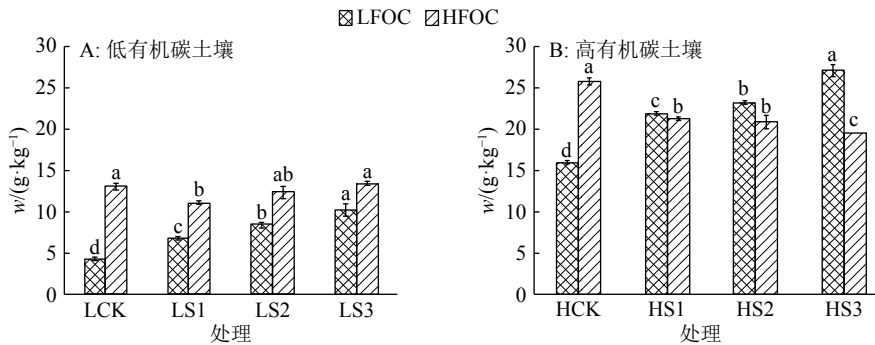
图 5 秸秆处理对土壤颗粒有机碳 (POC) 和矿物结合态有机碳 (MOC) 含量的影响

Fig. 5 Effects of adding straw on the contents of particulate organic carbon (POC) and mineral bound organic carbon (MOC) in soil

1.18 倍, LS1 处理与 LCK 无显著差异。在高有机碳含量土壤中, 所有处理均显著提高了土壤 POC 含量 ($P<0.05$), 其中 HS1、HS2 没有显著差异, 分别是 HCK 的 1.56 和 1.54 倍, HS3 处理土壤 POC 含量最高, 达到 $7.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 HCK 的 1.69 倍。表明添加 2.5% 的秸秆对 2 种有机碳含量黑土提高 POC 含量效果最好, 对土壤 POC 含量的增加有一定的积极作用。

2.2.5 添加秸秆对 2 种黑土轻组有机碳和重组有机碳含量的影响 培养 150 d 后, 各处理黑土的轻组有机碳和重组有机碳含量如图 6 所示, 添加秸秆均能显著 ($P<0.05$) 提高 2 种有机碳含量土壤 LFOC 的含量, 提高幅度最大的均为添加秸秆 2.5%

的处理, HS3 和 LS3 分别较 CK 提高了 11.20 和 $5.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 CK 的 155.39% 和 235.74%; LS1、LS2 分别比 LCK 提高了 60.36% 和 96.51%; HS1、HS2 仅比 HCK 提高了 25.29% 和 32.96%。添加不同量秸秆对于土壤 HFOC 含量的影响有所不同, 在低有机碳含量土壤中, LS2 和 LS3 处理和 LCK 没有显著差异, LS1 处理显著降低了土壤 HFOC 含量, 降低了 12.81%。在高有机碳含量土壤中, 各处理与 HCK 相比均显著 ($P<0.05$) 降低了土壤 HFOC 含量, HS1、HS2 和 HS3 分别降低了 16.33%、17.53% 和 22.70%。表明添加不同量秸秆可以增加 2 种黑土 LFOC 含量, 对低有机碳含量黑土影响更大, 还会减少高有机碳含量黑土的 HFOC 含量。



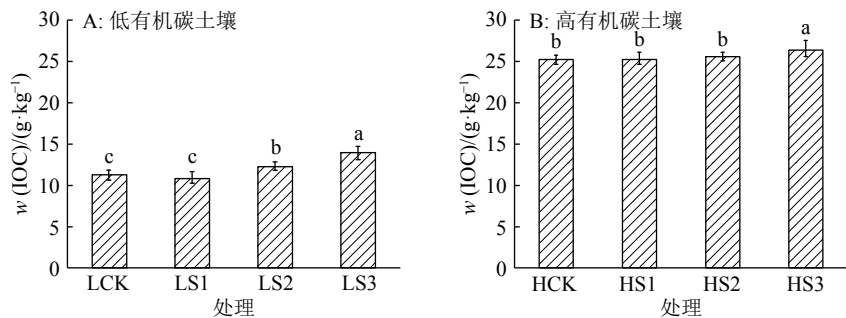
各图中, 相同柱子上方凡是标有相同小写字母者, 表示秸秆不同处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 6 秸秆处理对土壤轻组有机碳 (LFOC) 和重组有机碳 (HFOC) 含量的影响

Fig. 6 Effects of adding straw on the contents of light fraction organic carbon (LFOC) and high fraction organic carbon (HFOC) in soil

2.2.6 添加秸秆对 2 种黑土惰性碳含量的影响 培养 150 d 后, 各处理黑土的惰性碳含量如图 7 所示, 在低有机碳含量土壤中, LS2 和 LS3 处理土壤 IOC 含量与 LCK 差异显著 ($P<0.05$), LS3 处理的土壤 IOC 含量最高, 达到 $13.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 LCK 的

1.26 倍; LS2 处理的土壤 IOC 含量为 $12.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 LCK 的 1.25 倍; LS1 处理的土壤 IOC 含量最低, 只有 $10.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 LCK 的 87%。在高有机碳含量土壤中, HS3 处理土壤 IOC 含量最高, 达到 $26.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 HCK 的 1.06 倍, HS1 和 HS2 处理



各图中，柱子上方凡是标有相同小写字母者，表示秸秆不同处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 7 秸秆处理对土壤惰性碳 (IOC) 含量的影响

Fig. 7 Effect of adding straw on inter organic carbon (IOC) content in soil

与 HCK 相比差异不显著。说明添加 2.5% 秸秆对提高低有机碳含量土壤 IOC 含量起到了良好的促进作用。

2.3 不同秸秆添加量下 2 种黑土有机碳和碳库组分的相关性分析

通过相关分析 (表 2) 可以看出，土壤 ROC、MBC、DOC、POC、IOC 及 MOC 与 TOC 之间存在

极显著正相关关系，土壤 LFOC 与 TOC 之间存在显著正相关关系，HFOC 与 TOC 相关性不显著。另外，土壤不稳定性有机碳库中的 ROC、MBC、DOC、POC 之间均存在着极显著的相关性。土壤稳定性有机碳库中，IOC 与 MOC 的相关性也达到了极显著水平。综合分析，利用土壤 ROC、POC、IOC 和 MOC 可以很好地表征土壤 TOC 的变化。

表 2 土壤有机碳库组分相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis among the components of soil organic carbon pool

项目指标	土壤总有机碳	土壤不稳定性有机碳库					土壤稳定性有机碳库		
	TOC	ROC	MBC	DOC	POC	LFOC	IOC	MOC	HFOC
TOC	1.000								
ROC	0.955**	1.000							
MBC	0.853**	0.917**	1.000						
DOC	0.838**	0.914**	0.996**	1.000					
POC	0.978**	0.934**	0.778**	0.761**	1.000				
LFOC	0.627*	0.571	0.515	0.459	0.620*	1.000			
IOC	0.943**	0.926**	0.762**	0.746**	0.969**	0.554	1.000		
MOC	0.990**	0.947**	0.882**	0.869**	0.940**	0.616*	0.904**	1.000	
HFOC	0.350	0.368	0.340	0.373	0.335	-0.511	0.374	0.352	1.000

1) “*”、“**”分别表示达 0.05、0.01 水平的显著相关

3 讨论与结论

土壤有机碳的积累与新鲜有机物的输入密切相关，其分解和积累的变化将直接影响全球的碳循环^[16]。本试验添加粉碎秸秆后，可提高土壤有机碳的稳定性和固碳潜力，这与张鹏鹏等^[17]报道一致，因为秸秆具有显著的稳温降温、保水作用，有利于土壤 TOC 的储存^[9]。本研究表明施用秸秆能提高土壤 TOC 的含量，对低有机碳含量黑土效果更好。由于高有机碳含量黑土背景值较高，虽然自身微生物活性较高，但有机碳消长存在滞后性。

土壤 ROC 是土壤中活性较高的部分，具有易氧化、易分解的特性，可以在初期快速反映土壤 TOC 的变化。李新华等^[9]研究表明玉米秸秆添加能够提高土壤 ROC 含量，与本研究结果一致。土壤 MBC 是土壤里活的微生物体内包含的有机碳，是土壤有机碳中最易变化和最活跃的有机碳^[4]。本试验中添加秸秆可提高土壤 MBC 含量，添加 2.5%(w) 秸秆对 2 种黑土 MBC 含量提高效果最好。因为秸秆粉碎还田后，渐渐开始腐解，这为土壤微生物生存提供了营养成分，可以短期内提高土壤 MBC 含量。秸秆还田提高了土壤微生物活性，进而提高土

壤 MBC 含量, 这与前人研究结果^[18]一致。本研究中, 土壤 DOC 和 MBC 含量变化趋势相似, 可能由于当地环境温度逐渐升高, 影响了土壤微生物活性和水分流动, 从而改变了土壤 DOC 含量。有研究者认为 DOC 和微生物活性密切相关^[19], 主要是由于 DOC 受微生物活动影响, 较大程度上决定微生物活性和数量。本研究中, 土壤 ROC、MBC 和 DOC 含量均随着培养时间增加呈现先升高后下降趋于平缓的趋势, 这可能是秸秆中易分解转化为碳的部分已基本分解彻底, 土壤中活性物质减少并趋于稳定的缘故。秸秆的添加能显著提高 2 种有机碳黑土 POC 含量, 其中 2.5%(w) 秸秆处理效果最佳。土壤 POC 主要来源于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的有机碳, 且对低有机碳含量黑土提升效果更佳。它比土壤 TOC 更易受土地利用方式的影响, 对土壤碳固存的影响具有重要意义。于建光等^[20]的研究也表明, 施用秸秆后表层土壤中 POC 含量有增加的趋势。这种变化可能是因为秸秆腐解过程中增加了新鲜植物残体和腐殖化有机物之间的过渡产物, 对 POC 有补给作用。POC 对土壤微团聚体有物理化学保护作用, 有利于土壤有机碳的固定和积累^[21], 秸秆覆盖下表层土壤 POC 对 TOC 变化具有重要贡献^[22]。土壤 LFOC 是土壤碳库中活性较大的碳, 是土壤碳库质量的重要指标, 是良好的指示土壤有机碳变化的指标^[23], 但也有研究者认为 LFOC 不适合做早期土地利用变化的指示指标^[24]。本研究中添加秸秆提高了土壤 LFOC 含量, 且与秸秆添加量成正比, 原因可能在于作物秸秆主要由抗分解的多酚和木质素组成, 有利于土壤 LFOC 的积累^[25]。有研究表明, 秸秆对垄沟种植土壤具有明显增加 POC 和 LFOC 含量的趋势^[26], 与本研究结果存在一致性, 说明秸秆腐解产生的活性物质对土壤 POC 和 LFOC 产生了共性正激发效应。增加土壤中的 IOC 含量, 可以将碳更有效地储存到土壤中, 更有效地减缓土壤中 TOC 的分解和减少^[27]。本试验中, 添加秸秆能显著提高 2 种黑土 IOC 的含量。张俊华等^[28]研究表明, 适当将玉米秸秆归还土壤, 是增加土壤 IOC 的有效途径。

本试验的相关性分析表明, 土壤 TOC 含量与 ROC、MBC、DOC 和 POC 含量呈极显著正相关, 与 LFOC 含量显著正相关, 与相关研究结果^[29-30]一致, 其中 ROC、MBC、DOC 和 POC 含量之间均具有极显著相关性, 表明各不稳定性有机碳库组分能很好地反映 TOC、ROC、MBC、DOC 和 POC 含量的变化。其中土壤 ROC、POC 含量的变化是不同秸秆添

加量下黑土有机碳变化最重要的影响因子。土壤 TOC 与 IOC 及 MOC 之间呈极显著相关, 与 HFOC 相关性不显著。说明土壤稳定性碳库中的 IOC 和 MOC 较大程度上依赖于 TOC。IOC 含量和 MOC 含量呈极显著正相关性, 可能主要是由于土壤 IOC 以 MOC 的形式存在。土壤 ROC、MBC、DOC、POC 含量和土壤 IOC 和 MOC 含量呈极显著的相关关系, 可能是因为土壤碳库中部分稳定性有机碳的形成来源于微生物对有机碳的再合成^[31]。

与无秸秆添加相比, 添加秸秆处理提高了土壤有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳、溶解性有机碳、颗粒性有机碳、轻组有机碳、矿物结合态有机碳和惰性碳含量, 有利于土壤碳库的固持, 在本试验添加秸秆比例范围下, 以添加 2.5%(w) 秸秆为提高东北地区黑土土壤有机碳组分的最佳方案。本试验只对不同秸秆添加量下 2 种有机碳含量黑土 150 d 的土壤有机碳库组分含量变化进行了分析, 为了更好地探讨秸秆对退化黑土有机碳组分的影响, 应实施长期观测, 并对设置更多的秸秆添加比例的黑土加以研究, 有利于农业废弃物高效利用以及退化黑土的修复。

参考文献:

[1] 岳杨, 郑永照, 秦裕波, 等. 黑土退化原因及对策[J]. 农业科技通讯, 2016(3): 129-130.

[2] CHEN Z, WANG H, LIU X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. Soil Till Res, 2017, 165: 121-127.

[3] 朱鸿杰, 闫晓明, 何成芳, 等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 344-351.

[4] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.

[5] JACOBSEN K L, ESCALANTE C L, JORDAN C F. Economic analysis of experimental organic agricultural systems on a highly eroded soil of the Georgia Piedmont, USA[J]. Renewable Agric Food Systems, 2010, 25(4): 296-308.

[6] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32.

[7] ZHANG P, WEI T, LI Y, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C: N ratio in a semiarid region of China[J]. Soil Till Res, 2015, 153: 28-35.

[8] 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 71-75.

[9] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤

- 有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130-135.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] BLAIR G J, LEFORY R D. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems[J]. *Aust J Agric Res*, 1995, 46: 1459-1466.
- [12] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [13] LEE J H. An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control[J]. *Biotechnol Bioproc Eng*, 2013, 18(3): 431-439.
- [14] 蓝家程, 肖时珍, 林俊清, 等. 土地利用方式对岩溶山地土壤轻组和重组有机碳的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(10): 1720-1725.
- [15] LEAVITT S W, FOLLETT R F, PAUL E A. Estimation of slow-and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis[J]. *Radiocarbon*, 1996, 38(2): 231-239.
- [16] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 222-230.
- [17] 张鹏鹏, 刘彦杰, 濮晓珍, 等. 秸秆管理和施肥方式对绿洲棉田土壤有机碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3529-3538.
- [18] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 226-231.
- [19] MIRSKY S B, LANYON L E, NEEDELMAN B A. Evaluating soil management using particulate and chemically labile soil organic matter fractions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72(1): 180-185.
- [20] 于建光, 李辉信, 胡锋, 等. 施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响[J]. *生态环境*, 2006(3): 606-610.
- [21] 徐香茹, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 753-760.
- [22] 毛海兰, 王俊, 付鑫, 等. 秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 347-356.
- [23] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4379-4387.
- [24] LEIFELD J, KÖGEL-KNABNER I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use?[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 143-155.
- [25] GENTILE R, VANLAUWE B, KAVOO A, et al. Residue quality and N fertilizer do not influence aggregate stabilization of C and N in two tropical soils with contrasting texture[J]. *Nutr Cycl Agroecosystems*, 2010, 88(1): 121-131.
- [26] 吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等. 秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2855-2862.
- [27] 霍莲杰, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 土壤有机碳分类研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2012(1): 65-69.
- [28] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 196-203.
- [29] 翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 609-615.
- [30] 张雪, 韩士杰, 王树起, 等. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 282-289.
- [31] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.

【责任编辑 李晓卉】