农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响

李玉梅， 王根林， 孟祥海， 胡颖慧， 王伟， 李建英， 张冬梅

引用本文:
李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 268-276.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0154

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响
张莉, 李玉义, 逄焕成, 王婧, 丛萍, 张珺橦, 郭建军
农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 160-168 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0137

秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响
何振超, 苏瑶, 喻曼, 陈喜靖, 万美霞, 沈阿林
农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 304-312 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0120

秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响
倪中应, 沈倩, 章明奎
农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 215-225 https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0305

不同秸秆还田方式对玉米根际土壤微生物及酶活性的影响
于寒, 梁烜赫, 张玉秋, 孙杨, 吴春胜, 谷岩
农业资源与环境学报. 2015(3): 305-311 https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0320

长期定位耕作方式下冬小麦田根系呼吸对土壤呼吸的贡献
周鹏翀, 沈莹, 许姣姣, 韩惠芳, 宁堂原, 李增嘉
农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 766-773 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0338

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 268-276.
LI Yu-mei, WANG Gen-lin, MENG Xiang-hai, et al. Effects of different straw returning methods on labile organic carbon distribution in upland meadow soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 268-276.

开放科学 OSID

秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响

李玉梅[1], 王根林[2*], 孟祥海[3], 胡颖慧[3], 王伟[1], 李建英[4], 张冬梅[5]

(1.黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086; 2.黑龙江省农业科学院畜牧研究所, 哈尔滨 150086; 3.黑龙江省农业科学院牡丹江分院, 黑龙江 牡丹江 157041; 4.黑龙江省农业科学院大庆分院, 黑龙江 大庆 163000; 5.黑龙江省农业科学院农业遥感与信息研究所, 哈尔滨 150086)

摘 要:为阐明不同秸秆还田方式下草甸土活性有机碳组分的分布特征,基于玉米田间定位试验,分析了不同耕作与秸秆还田方式下三个深度土层土壤有机碳及其活性组分的变化。结果表明:频繁的翻耕加速了表层(0~20 cm)土壤有机碳的矿化分解,使有机碳含量下降;免耕秸秆覆盖还田有利于表层土壤有机碳的增加,秸秆翻耕还田促进了中层(20~40 cm)土壤有机碳的积累;秸秆连续翻耕还田提高了中层土壤高活性和中活性有机碳的含量及土壤碳库管理指数,秸秆浅翻还田对表层和中层低活性有机碳的影响显著高于深翻还田与覆盖还田,但短期内秸秆连续浅翻还田与深翻还田对提高土壤碳库管理指数的差异不大。研究表明,土壤高活性和中活性有机碳对耕作深度的响应更加敏感,而秸秆还田主要使低活性有机碳增加,这也是玉米增产的主要原因。

关键词:草甸土;活性有机碳;秸秆还田;耕作;土壤碳库管理指数
中图分类号:S153.6 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2021)02-0268-09 **doi**: 10.13254/j.jare.2020.0154

Effects of different straw returning methods on labile organic carbon distribution in upland meadow soil

LI Yu-mei[1], WANG Gen-lin[2*], MENG Xiang-hai[3], HU Ying-hui[3], WANG Wei[1], LI Jian-ying[4], ZHANG Dong-mei[5]

(1. Institute of Soil Fertility and Environmental Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Institute of Animal Sciences, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. Mudanjiang Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Mudanjiang 157041, China; 4. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163000, China; 5. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: This study used field positioning experiments to clarify the distribution of organic carbon under different methods in which straw was returned to upland meadow soil. The labile organic carbon components of three deep soil layers in each treatment were compared to summarize the changes in soil organic carbon and labile components under different tillage and straw return methods. The results showed that the mineralization and decomposition of organic carbon in topsoil (0~20 cm) was accelerated and its content decreased under frequent tillage methods. This content increased in the same layer under no-tillage straw returning; tillage with straw returning increased the accumulation of organic carbon in the middle layer (20~40 cm). Continuous tillage with straw returning improved high and medium labile organic carbon content in this middle layer and the soil carbon management index. Furthermore, shallow tillage with straw returning increased low labile organic carbon in the surface and middle layers significantly more than that obtained when deep tillage with straw and

收稿日期:2020-03-28 **录用日期**:2020-05-14
作者简介:李玉梅(1971—),女,四川射洪人,研究员,主要从事土壤培肥研究。E-mail:liyumeiwxyl@126.com
***通信作者**:王根林 E-mail:wanggenlin2005@163.com
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300806);黑龙江省科技厅项目(GX18B013);黑龙江省产业协同技术体系课题
Project supported: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300806); Key Fund Projects of Heilongjiang Province (GX18B013); Key Fund of Industrial Synergy Technology System of Heilongjiang Province

no-tillage with straw were used. However, the difference in the soil carbon management index under tillage with straw returning treatments was not significant in the short-term experiment. Our results indicated the high and medium labile organic carbon levels in the soil were sensitive to changes in tillage depth while straw management methods mainly increased the content of low labile organic carbon and was the main reason for the increase in maize yield.

Keywords: meadow soil; labile organic carbon; straw returning; tillage; soil carbon management index

土壤有机碳是土壤肥力的重要指标，是土壤质量和功能的核心，在土壤物理、化学和生物特性中发挥着重要作用[1]。土壤有机碳由于其化学组成的非均一性而构成不同组分[2]。土壤活性有机碳是反映土壤碳库动态变化的敏感性指标，能够反映耕作、施肥、秸秆还田等田间措施引起土壤有机碳的微小变化[2-3]。在表征土壤碳库变化方面，土壤碳库管理指数结合了土壤碳库与碳库活度指标，能够较全面地反映人类活动对土壤有机碳总量和土壤有机碳组分的影响。因此，土壤活性有机碳和土壤碳库管理指数成为评价土壤质量和土壤管理的重要指标[4]。

耕作措施和施肥是改变土壤有机碳组分的重要原因，也是影响土壤养分转化的主要驱动力。徐明岗等[5]应用活性有机碳组分和碳库管理指数客观评价了长期定位耕作和施肥对红壤、黑土等土壤质量和土壤碳库的影响。何翠翠等[3]研究发现，有机肥与无机肥配施可提高黑土活性有机质含量和土壤碳库管理指数。张霞等[6]认为，秸秆还田可有效提高黑垆土有机质含量，显著影响土壤活性碳组分在总有机碳中的占比，秸秆-菌渣、秸秆-过腹还田模式分别对土壤质量和有机碳质量的影响较大[7]。宇万太等[8]在潮棕壤上研究表明，化肥配施秸秆有助于提升土壤高活性和中活性有机质的碳库管理指数，免耕与翻耕、深松结合可提高黑垆土有机碳和易氧化碳含量[6]。因此，土壤活性有机碳组分会通过秸秆还田深度的不同而发生改变。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地，不合理的耕作和施肥导致土壤有机碳含量下降，因此了解有机碳在土壤中的动态变化、优化耕作措施与秸秆还田方式是恢复土壤地力、提高作物产量的重要措施。已有研究主要集中于南方或气温偏高的干旱区秸秆还田、施肥等方式对土壤活性碳及其组分变化的影响[2,6-10]，而研究秸秆还田对东北寒冷气候区草甸土活性有机碳及其碳库在短时间内的变化较少。本研究以东北平原黏壤质型草甸土田间试验为基础，探讨秸秆不同深度连续还田土壤有机碳及其活性组分的变化，有利于揭示寒温带气候区农业措施对土壤有机碳组分的影响机制，以期为该地区实现秸秆高效利用、改善土壤碳库质量、提高土壤肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省牡丹江市温春镇（44°60′N，129°58′E），寒温带大陆性季风气候，年平均气温5.9 ℃，年平均降雨量500~600 mm，平均活动积温2 300~2 500 ℃。土壤类型为黏壤质型草甸土，0~16 cm表土层呈粒状，结构松散。试验前土壤基础养分含量：全氮1.12 g·kg^{-1}、碱解氮101.55 mg·kg^{-1}、有效磷26.50 mg·kg^{-1}、速效钾130.28 mg·kg^{-1}，有机碳10.95 g·kg^{-1}，pH 7.93。

1.2 试验设计

试验于2016年9月—2019年10月进行，共设6个处理：免耕（NT）、浅翻20 cm（ST）、深翻35 cm（DT）和免耕秸秆覆盖地表（NTS）、秸秆浅翻还田20 cm（STS）、秸秆深翻还田35 cm（DTS）。其中：①秸秆翻耕还田方式为每年秋季玉米收获后，将秸秆粉碎至小于10 cm平铺于地表，大型机械带动翻转犁将秸秆翻埋于20 cm或35 cm土层；②秸秆不还田采取人工移走秸秆方式；③免耕与免耕秸秆覆盖除免耕机播种外，整个生育期均无中耕作业；④小区面积234 m^2，每个处理3次重复，共18个小区。玉米施肥N-P_2O_5-K_2O分别为180、115、75 kg·hm^{-2}。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集

2019年秋季玉米成熟期，用环刀、土钻采集0~20、20~40、40~60 cm土层土壤，每小区采集3点均匀混合成1个样品，3次重复，一部分测土壤容重，一部分土样自然风干后测试土壤全量养分、有机碳及其组分。

1.3.2 测定方法

土壤容重测定采用环刀法[11]；土壤全氮、全磷、全钾、有机碳测定采用常规方法[11]。

土壤活性有机碳测定采用高锰酸钾氧化法[12]。称取约含15 mg碳的土壤样品（2.0~3.0 g）于50 mL塑料旋盖离心管中，加入25 mL 333 mmol·L^{-1}高锰酸钾

溶液，振荡1.5 h后离心（4 000 r·min^{-1}）5 min，上清液用去离子水稀释250倍，分光光度计（565 nm）测定吸光率。通过不加样品的空白与土壤样品的吸光率之差计算$KMnO_4$浓度的变化及被氧化碳，即活性有机碳（LOC）含量。被33 mmol·L^{-1}和167 mmol·L^{-1}高锰酸钾溶液氧化的碳分别为土壤高活性有机碳（H-LOC）和中活性有机碳（M-LOC），活性有机碳与高活性有机碳和中活性有机碳含量差则为土壤低活性有机碳（L-LOC）[12]。

测产：在玉米成熟期每小区选取代表性3点进行测产。

1.4 数据分析

活性有机碳（LOC）=（A_0-A×0.765 3）×25×250×9/（m×1 000）

式中：A_0为空白$KMnO_4$溶液吸光率，mmol·L^{-1}；A为测定土样$KMnO_4$溶液吸光率；m土壤质量，g。

$$有机碳储量(SOCs)=\sum_{i=1}^{n}(C_i \times P_i \times T_i)\times 0.1$$

式中：SOCs为某深度的土壤有机碳储量，t·hm^{-2}；C_i为第i层土壤有机碳含量，g·kg^{-1}；P_i为第i层土壤容重，g·cm^{-3}；T_i为第i层土壤厚度，cm；n为土层数。

碳库指数（CPI）=样品全碳含量（g·kg^{-1}）/参考土壤全碳含量（g·kg^{-1}）

碳库活度（L）=活性碳含量/非活性碳含量（NLOC）

碳库活度指数（LI）=样品碳库活度/参考土壤碳库活度

碳库管理指数（CMI）=CPI×LI[12]

采用Microsoft Excel 2017绘制图表，用SPSS 19.0软件对数据进行方差及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下土壤基础理化指标及产量

由表1可见，秸秆翻耕还田STS和DTS处理，0~20 cm表土层容重比秸秆覆盖（NTS）平均降低0.17 g·cm^{-3}，而20~60 cm土层比NTS平均增加0.11 g·cm^{-3}；连续免耕（NT）和NTS处理，0~20 cm表土层容重增加，20~60 cm土层容重有降低趋势。不同秸秆还田方式对土壤全氮和全磷含量影响较大。各处理0~20 cm土层全氮含量变化不显著，但STS和DTS显著增加了20~60 cm土层全氮含量，在40~60 cm土层，其与秸秆不还田和NTS处理间差异显著。秸秆不还田条件下，ST和DT处理土壤全磷含量随土层加深而降低，秸秆翻耕还田STS和DTS处理增加了40~60 cm土层全磷含量，与秸秆不还田和NTS处理差异显著。与秸秆不还田比较，秸秆还田3年玉米产量平均增加4.3%，但3种还田方式间差异不显著。

2.2 不同秸秆还田方式下土壤活性有机碳组分

2.2.1 土壤有机碳含量

连续3年定位耕作使不同土层有机碳含量发生变化（图1）。总体上，土壤有机碳含量随土层深度增加而降低，秸秆还田可减缓有机碳下降。不同处理0~60 cm土层有机碳平均含量差异较大，其中STS、DTS土壤有机碳平均含量为11.79、11.28 g·kg^{-1}，分别较DT、ST增加1.41、1.65 g·kg^{-1}和0.90、1.14 g·kg^{-1}，而NT与NTS处理差异不大。无论秸秆是否还田，频繁的翻耕降低了0~20 cm土层有机碳含量。其中，秸秆不还田处理ST与DT有机碳含量较NT分别显著降低1.05、1.95 g·kg^{-1}（P<0.05）。秸秆还田处理STS、DTS

表1 不同处理土壤基础理化指标和产量

Table 1 The soil basic physical and chemical properties and yields under different treatments

处理 Treatments	0~20cm 全氮 TN/（g·kg^{-1}）	0~20cm 全磷 TP/（g·kg^{-1}）	0~20cm 全钾 TK/（g·kg^{-1}）	0~20cm pH	0~20cm 容重 BD/（g·cm^{-3}）	20~40 cm 全氮 TN/（g·kg^{-1}）	20~40 cm 全磷 TP/（g·kg^{-1}）	20~40 cm 全钾 TK/（g·kg^{-1}）	20~40 cm pH	20~40 cm 容重 BD/（g·cm^{-3}）	40~60 cm 全氮 TN/（g·kg^{-1}）	40~60 cm 全磷 TP/（g·kg^{-1}）	40~60 cm 全钾 TK/（g·kg^{-1}）	40~60 cm pH	40~60 cm 容重 BD/（g·cm^{-3}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）
NT	0.97a	0.68c	21.14a	7.81a	1.54a	0.70c	0.75a	19.25b	8.17a	1.51a	0.61c	0.65b	19.97a	7.99a	1.41b	11 163.15a
ST	0.98a	0.75b	21.18a	7.89a	1.26c	0.78b	0.62b	22.21a	8.01ab	1.55a	0.62c	0.61b	20.92a	7.89a	1.48ab	10 694.28b
DT	0.96a	0.80a	20.19ab	7.78a	1.29c	0.89ab	0.74a	19.46b	7.87b	1.50a	0.75b	0.65b	18.30b	8.08a	1.49ab	11 360.49a
NTS	0.98a	0.82a	19.12b	7.90a	1.56a	0.81b	0.75a	19.96b	8.07a	1.44b	0.69c	0.64b	19.03ab	8.12a	1.39b	11 263.78a
STS	1.05a	0.74b	20.44a	7.82a	1.38b	1.04a	0.78a	17.87c	8.04a	1.49a	0.98a	0.79a	19.44a	8.07a	1.54a	11 472.30a
DTS	0.98a	0.84a	19.12b	7.83a	1.40b	0.91ab	0.73a	17.85c	8.07a	1.50a	0.90a	0.77a	20.69a	8.05a	1.56a	12 181.72a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments（P<0.05）. The same below.

有机碳含量较NTS分别降低0.85、1.11 g·kg^{-1}（P>0.05）。秸秆还田深度同样影响土壤有机碳含量，在20~60 cm土层，翻耕还田的有机碳含量显著高于覆盖还田。其中，在20~40 cm土层，STS、DTS较NTS分别增加1.38、1.27 g·kg^{-1}，增幅为12.7%、11.6%（P<0.05）；在40~60 cm土层，STS、DTS较NTS分别增加0.89、0.33 g·kg^{-1}（P<0.05）。

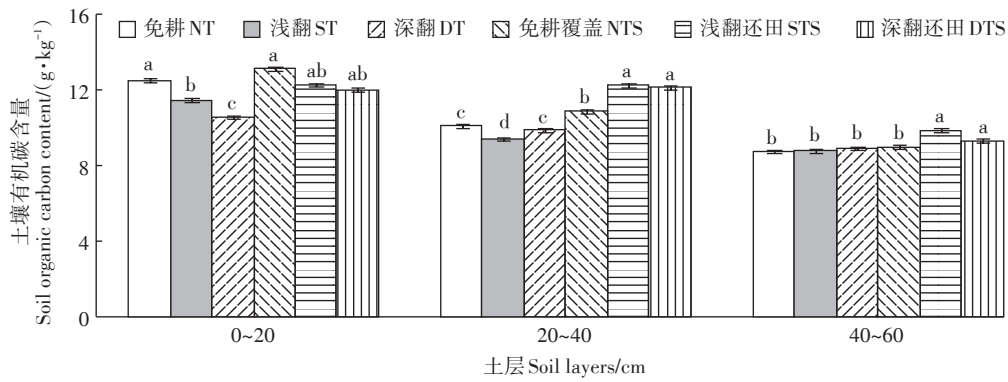
2.2.2 土壤活性有机碳组成

由表2可见，土壤活性有机碳（LOC）中低活性有机碳（L-LOC）含量较高，在0.54~1.37 g·kg^{-1}之间，占比为26.2%~53.3%；其次是中活性有机碳（M-LOC），含量为0.29~1.38 g·kg^{-1}，占比18.9%~46.4%；高活性有机碳（H-LOC）含量最低，为0.25~0.70 g·kg^{-1}，占比14.7%~27.4%。

频繁的翻耕是提高土壤M-LOC含量的主要原因，而NT和NTS处理各土层M-LOC含量低于翻耕与秸秆翻耕还田处理（表2）。其中，20~40 cm土层，DTS较STS、NTS分别提高0.61、0.89 g·kg^{-1}，0~40 cm土层，DT、ST较NT分别平均提高0.32、0.28 g·kg^{-1}。总体上，翻耕对土壤M-LOC影响大于秸秆翻耕还田，秸秆深翻还田大于秸秆浅翻还田。

不同处理下土壤L-LOC量在20~40 cm土层分布较高（表2）。秸秆不还田条件下，连续深耕打破了坚实的犁底层，DT处理土壤L-LOC降幅较大。其中，0~20 cm土层，DT较ST、NT分别降低0.34、0.27 g·kg^{-1}，40~60 cm土层，分别降低0.21、0.11 g·kg^{-1}；秸秆还田深度影响土壤L-LOC的转化，其中STS处理土壤L-LOC的增幅较大。其中，0~20 cm土层，STS较DTS、NTS分别增加0.16、0.13 g·kg^{-1}，增幅为19.75%、15.48%。20~40 cm土层，STS较DTS、NTS分别增加0.36、0.55 g·kg^{-1}，增幅为35.64%、67.07%。40~60 cm土层，STS与DTS处理L-LOC含量也有一定升高，但差异不大。

由于翻耕增强了对土壤的扰动，秸秆还田使秸秆



同一土层不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同

The different lowercase letters in the same soil layer indicate significant differences among treatments（P<0.05）. The same below

图1 不同处理下土壤有机碳含量

Figure 1 Soil organic carbon contents under different treatments

表2 不同处理土壤活性有机碳各组分含量（g·kg^{-1}）

Table 2 The composition of soil liable organic carbon under different treatments（g·kg^{-1}）

处理 Treatments	0~20 cm			20~40 cm			40~60 cm		
	H-LOC	M-LOC	L-LOC	H-LOC	M-LOC	L-LOC	H-LOC	M-LOC	L-LOC
NT	0.45c	0.78c	0.82c	0.35c	0.47d	0.86c	0.31d	0.29d	0.65c
ST	0.32d	0.90a	0.89b	0.43c	0.91b	0.90c	0.54b	0.63b	0.75b
DT	0.57b	0.97a	0.55d	0.65a	0.92b	0.87c	0.70a	0.62b	0.54d
NTS	0.52b	0.75c	0.84c	0.36d	0.49d	0.82c	0.25d	0.33d	0.61c
STS	0.60a	0.81b	0.97a	0.58b	0.77c	1.37a	0.46c	0.58c	0.89a
DTS	0.59a	0.85b	0.81c	0.69a	1.38a	1.01b	0.38cd	0.72a	0.93a

注：H-LOC代表高活性有机碳，M-LOC代表中活性有机碳，L-LOC代表低活性有机碳。

Note：H-LOC stands for highly activated organic carbon，M-LOC stands for medium activated organic carbon，and L-LOC stands for low activated organic carbon.

的输入量增加，因而不同深度土壤LOC组分的分布具有差异。由表2和图2可见，NT和NTS处理土壤LOC组分含量随土层加深呈下降趋势，可代表原位土壤LOC的分布特征。秸秆不还田条件下，除0~20 cm表土层外，频繁的翻耕对土壤H-LOC组分影响大于NT。其中，20~40 cm土层ST、DT较NT处理分别提高24.6%、86.9%。40~60 cm土层提高73.8%、125.4%，差异显著（$P<0.05$）。DT处理对H-LOC的影响大于ST和NT处理，尤其是40 cm以下土层；与秸秆不还田条件下类似，秸秆翻耕还田对土壤H-LOC的影响大于NTS，其中，20~40 cm土层DTS、STS较NTS增幅达91.6%、61.3%，40~60 cm土层增幅分别为45.4%、79.3%。

2.3 不同秸秆还田方式下土壤有机碳储量

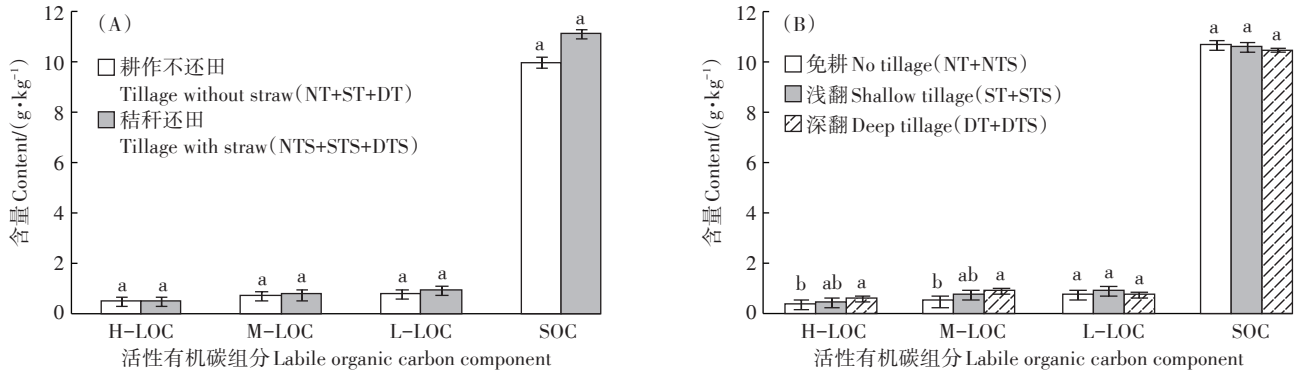
2.3.1 土壤有机碳储量

根据等深度储量方法计算土壤有机碳储量，从图3可以看出，经过3年不同耕作与秸秆还田处理，0~60 cm土层有机碳储量变化趋势为STS>DTS>NTS>NT>DT>ST。与ST处理相比，STS和DTS处理增幅最大，分别为20.9%和17.9%，其次为NTS和NT，增幅分别为13.6%和9.1%，而DT与ST间差异不大。

NT与NTS处理由于连续3年未扰动土壤，土壤碳库储量随土层加深有降低趋势，但0~20 cm有机碳储量高于翻耕与秸秆翻耕还田；秸秆翻耕还田增加了20~60 cm土层有机碳储量。其中，20~40 cm土层，DTS、STS较NTS有机碳储量分别增加3.52、3.12 t·hm^{-2}，40~60 cm土层，DTS、STS较NTS有机碳储量分别增加3.78、6.54 t·hm^{-2}；秸秆不还田处理土壤有机碳库储量变化以表层（0~20 cm）为主，秸秆翻耕还田后，土壤有机碳储量变化主要发生在中层（20~40 cm），并有向下层（40~60 cm）转移的趋势。

2.3.2 土壤活性有机碳组分的储量

不同处理对土壤LOC组分的储量有一定影响



同一组分下不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同

The different lowercase letters for the same component indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）. The same below

图2 不同处理下土壤活性有机碳组分含量（A：不同秸秆处理方式对有机碳组分的影响；B：不同耕作深度对有机碳组分的影响）

Figure 2 Soil liable organic carbon composition contents under different treatments（A：Effects of different straw managements on organic carbon component contents; B：Effects of different tillage depths on organic carbon component contents）

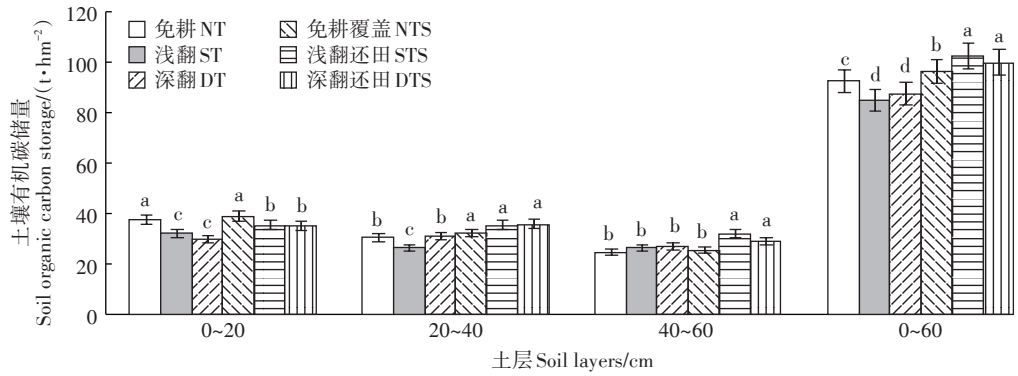


图3 不同处理下土壤有机碳储量

Figure 3 Soil organic carbon storage under different treatments

(图4A)。土壤H-LOC储量随着翻耕深度的增加呈现上升趋势;与H-LOC相似,秸秆还田条件下,深耕也会显著提高M-LOC的储量,特别是DTS处理,但总有机碳储量之间的差异不显著。由图4B、4C可以得出,耕作深度显著改变了H-LOC和M-LOC储量,深度越深,含量越高。秸秆还田措施增加了有机碳和各组分储量,但LOC组分,特别是H-LOC、M-LOC对耕作方式的改变更加敏感,而对秸秆还田措施响应不明显。秸秆还田主要通过增加L-LOC含量来提高土壤顽固性碳储量。

秸秆还田与耕作深度的双因素方差分析(表3)表明,土壤有机碳及其活性组分对秸秆还田与耕作深度的响应不同。秸秆还田对土壤L-LOC和玉米产量影响显著,而耕作深度对土壤H-LOC和M-LOC影响显著。短时间内,不同秸秆还田方式对草甸土有机碳及其活性组分的含量和储量影响差异不大,但秸秆还田后玉米产量增加,因此,秸秆还田是提高作物产量的重要措施。

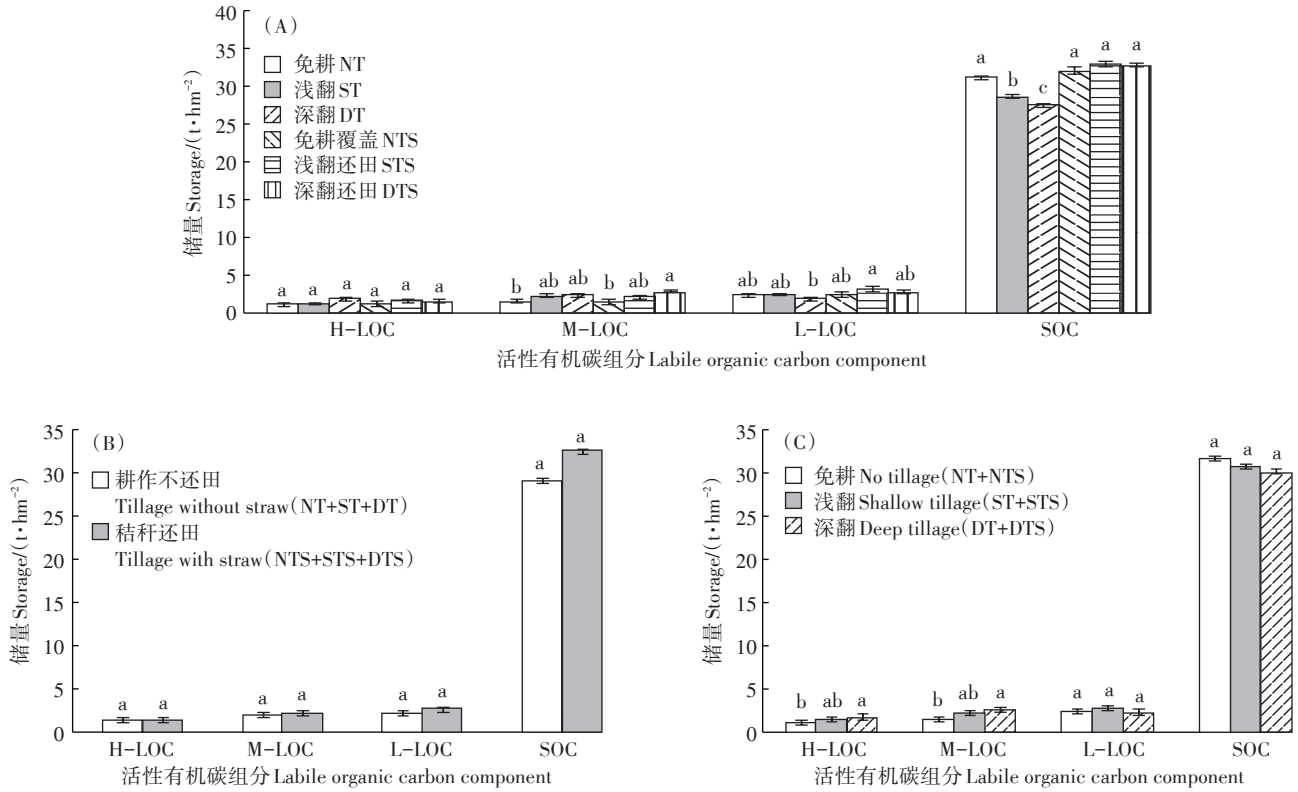


图4 不同处理下土壤活性有机碳组分储量(A:不同处理对土壤活性有机碳组分储量的影响;B:不同秸秆处理方式对土壤活性有机碳组分储量的影响;C:不同耕作深度对土壤活性有机碳组分储量的影响)

Figure 4 Soil liable organic carbon component storage under different treatments(A:Effects of different treatments on soil liable organic carbon component storage; B:Effects of straw managements on soil liable organic carbon component storage; C:Effects of tillage depths on soil liable organic carbon component storage)

表3 秸秆还田和耕作深度对土壤有机碳组分及玉米产量的影响

Table 3 The effect of tillage on SOC component contents, storages and yield

项目 Items	有机碳组分含量SOC component contents				有机碳组分储量SOC component storages				玉米产量 Maize yield
	SOC	H-LOC	M-LOC	L-LOC	SOC	H-LOC	M-LOC	L-LOC	
秸秆还田(S)	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*
耕作深度(D)	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
S×D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:*表示影响显著(P<0.05);ns表示无显著影响。

Note:* indicate significant effects(P<0.05);ns indicate no significant effects.

2.4 不同秸秆还田方式下土壤碳库管理指数

从CPI指数分析(表4),除ST处理的20~40 cm土层CPI<1,其他处理CPI>1。同一耕作方式下,秸秆还田处理的CPI大于秸秆不还田处理。20~60 cm土层,秸秆翻耕还田大于NTS,且STS和DTS处理的40~60 cm土层CPI较高;L指数分析表明,各处理土壤碳库活度中20~40 cm土层最高,40~60 cm土层最低。秸秆不还田条件下,DT处理20~40 cm土层L值较高。秸秆翻耕还田提高了20~40 cm土层L值,DTS和STS较NTS平均提高0.15;CMI指数分析表明,秸秆不还田条件下,连续的ST和DT处理0~40、0~20 cm土层的CMI较NT处理有降低趋势。不同秸秆还田方式对表层CMI影响不大,但秸秆翻耕还田显著提高了20~60 cm土层CMI值,其中,在20~40 cm土层,STS和DTS较NTS平均提高1.01,在40~60 cm土层,STS和DTS较NTS平均提高0.46,而各土层中STS与DTS处理CMI值差异不大。

3 讨论

3.1 秸秆还田方式对土壤有机碳的影响

秸秆中富含大量的碳、氮,是增加土壤有机碳的重要来源,秸秆还田可有效改善土壤结构,提高土壤氮、磷、钾和有机质含量,而与耕作措施配合的秸秆还田是提升土壤地力的主要措施[7,10,13-14]。本研究表明,连续翻耕造成深层土壤紧实度增加,土壤库容量降低,不利于创造良好的土体结构。无论秸秆是否还田,频繁的翻耕破坏了表层土壤结构,降低有机碳的物理保护作用从而加速了表层(0~20 cm)有机质的分解,土壤有机碳含量降低,与梁爱珍等[15]研究一致。秸秆还田后由于连续翻耕,秸秆可以深入中层和深层土体,导致20~60 cm土层土壤有机碳含量增加。

秸秆还田深度影响有机碳的矿化与积累,NTS对表层(0~20 cm)有机碳增加作用较大,而翻耕还田更有利于中层(20~40 cm)土壤有机碳的提高,并有向下层(40~60 cm)转移的趋势,这是因为NT减少了对耕层的扰动,土壤结构趋于稳定,表土层有机碳分解速率降低[12]。土壤有机碳储量分析也表明,NT与NTS由于连续3年对土壤不进行扰动,表层土壤有机碳储量高于翻耕与秸秆还田处理,与杨永辉等[16]研究一致。秸秆不还田条件下,土壤有机碳库储量以表层(0~20 cm)为主,秸秆还田后,下层土壤有机碳储量有增加的趋势。

表4 不同处理下土壤碳库管理指数

Table 4 Soil carbon pool management index under different treatments

土壤深度 Soil depth/cm	指数 Index	NT	ST	DT	NTS	STS	DTS
0~20	CPI	1.197	1.183	1.078	1.149	1.195	1.170
	L	0.240	0.220	0.240	0.230	0.240	0.250
	LI	0.952	0.913	0.992	0.966	0.971	0.983
	CMI	1.14	1.08	1.07	1.11	1.16	1.15
20~40	CPI	1.143	0.983	1.180	1.241	1.339	1.325
	L	0.270	0.270	0.327	0.275	0.422	0.423
	LI	1.234	1.247	1.291	1.254	1.926	1.932
	CMI	1.41	1.23	1.52	1.56	2.58	2.56
40~60	CPI	1.278	1.282	1.302	1.311	1.529	1.360
	L	0.156	0.161	0.209	0.130	0.178	0.188
	LI	0.769	0.793	0.883	0.639	0.878	0.928
	CMI	0.98	1.02	1.15	0.84	1.34	1.26

注:CPI-碳库指数,L-碳库活度,LI-碳库活度指数,CMI-碳库管理指数。

Note: CPI-carbon stock index, L-carbon stock lability, LI-carbon stock lability index, CMI-carbon stock management index.

3.2 秸秆还田方式对土壤活性碳组分的影响

土壤碳库的变化主要发生在LOC部分[13]。LOC在土壤中周转快、稳定性差、具有较高的微生物活性,虽然仅占总有机碳很小一部分,却是土壤碳循环的关键和动力。秸秆还田后,由于投入了外源有机物,加速了有机碳不同组分之间的周转,从而影响了土壤有机碳的活性和稳定性,改变其组成与存在方式[7]。本研究表明,与NTS比较,秸秆翻耕还田使不同土层H-LOC含量都有一定的提高,影响最大的土层为20~40 cm土层,其次是40~60 cm土层。这可能是由于翻耕破坏了土壤对有机碳的物理保护,加速了L-LOC的分解,促进H-LOC的生成[17],同时腐解的秸秆为微生物提供能源,增强微生物活性,进而促进土壤H-LOC的生成[17]。本试验中深耕对土壤H-LOC的影响大于浅耕和免耕,也证明了这一点;无论秸秆是否还田,连续的翻耕均提高了土壤M-LOC含量,且0~40 cm土层变化较大。上砂下黏的土壤质地、长期的旋耕整地方式导致在15~20 cm土层形成一个紧实的犁底层,短期内连续的深耕打破了犁底层,因而促进了稳定性有机碳的分解,使L-LOC含量降低。

另外,土壤有机碳不同组分对环境改变的敏感性存在差异。耕作对土体的扰动使得深层土壤暴露于表面,整体土层性质相对均一化[18-19],有机碳各组分含量和储量的变化规律基本一致,随着翻耕深度的增加,土壤有机碳总量有降低趋势,但是LOC组分却呈现了上升趋势,可能是因为耕作破坏了土壤结构,减

少了有机碳的物理保护，增强了微生物对有机碳的利用和周转，从而增加了有机碳的活性组分含量[14]。

纤维素是土壤中分布最广、含量最多的多糖，也是作物秸秆的主要成分。纤维素作为一种大分子多糖，其降解周期较长，是土壤中的非活性有机碳。而周转时间较长且降解难度较大，可在土壤中保留较长时间，又是土壤中稳定的有机碳组分。所以秸秆还田对土壤LOC组分的影响较小，这与本研究结果一致。土壤中的秸秆通过一年的腐解，其降解率可以超过70%，是土壤有机碳的重要来源[19]。本研究中，秸秆还田措施对土壤LOC组分含量的影响并不显著。因此，秸秆还田主要通过增加土壤中非活性有机碳组分提升有机碳含量，从而增加作物产量。

3.3 秸秆还田方式对土壤碳库管理指数的影响

有研究认为，CMI指数高，土壤肥力上升，反之则肥力下降[17]。其原因在于CMI指数增加，加快了土壤不稳定有机碳的更新速度，促进土壤腐殖质的形成，以及土壤孔隙和通气结构的改善[20]。本研究表明，秸秆不还田条件下，与NT相比，连续3年DT与ST降低了0~20 cm和20~40 cm土层土壤容重，土壤通气透水性增强，同时增加了上层和中层土壤有机碳的矿化分解，CMI降低；不同秸秆还田方式对表层（0~20 cm）CMI影响不显著，但秸秆翻耕还田增加了中层和下层（20~60 cm）CMI，其中，20~40 cm土层的CMI增幅大于40~60 cm土层。韩晓增等[21]研究提出，将秸秆深混至0~35 cm土层，可培育一个肥沃深厚的耕层。影响土壤CMI变化的因素较多[3,5-6]，本研究表明，短期内秸秆连续还田条件下，翻耕深度对草甸土CMI的影响不显著，可能与机械作业水平、取样点分布、土壤质地等因素有关，下一步将继续进行相关研究与分析。

4 结论

（1）秸秆还田方式对不同深度土层碳库积累和更新的影响不同，免耕秸秆覆盖促进了表层（0~20 cm）土壤有机碳的增加，而秸秆翻耕还田更有利于中层（20~40 cm）和下层（40~60 cm）土壤有机碳库的积累和碳库管理指数的提高。

（2）秸秆还田措施显著增加了土壤低活性有机碳含量并提高了作物产量，而耕作深度对高活性有机碳和中活性有机碳的影响较大，深翻显著提高了两者的储量。

（3）短期内秸秆翻耕还田深度的变化对土壤碳库积累的影响不显著。针对目前农田土壤频繁翻耕导致的表土流失加剧的问题，秸秆周期轮耕还田是提高土壤肥力的有效解决措施。

参考文献：

[1] 于荣，徐明岗，王伯仁，等. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料，2005(2)：49-52. YU Rong, XU Ming-gang, WANG Bo-ren. Study on methods for determining labile organic matter of soils[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(2):49-52.

[2] 王海候，金梅娟，陆长婴，等. 秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J]. 自然资源学报，2017, 32(5)：755-764. WANG Hai-hou, JIN Mei-juan, LU Chang-ying, et al. Effects of patterns of returning straw to field on soil carbon pool and yield in rice-wheat double cropping systems[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 755-764.

[3] 何翠翠，王立刚，王迎春，等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报，2015, 52(1)：194-202. HE Cui-cui, WANG Li-gang, WANG Ying-chun, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1):194-202.

[4] Yan D Z, Wang D J, Lin Z Y. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soil*, 2007, 44(1):93-101.

[5] 徐明岗，于荣，孙小凤，等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2006, 12(4)：459-465. XU Ming-gang, YU Rong, SUN Xiao-feng, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):459-465.

[6] 张霞，杜昊辉，王旭东，等. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J]. 自然资源学报，2018, 33(12)：2223-2237. ZHANG Xia, DU Hao-hui, WANG Xu-dong, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool management index and its composition in Weibei highland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12):2223-2237.

[7] 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.

[8] 宇万太，赵鑫，马强，等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报，2008, 39(3)：539-544. YU Wan-tai, ZHAO Xin, MA qiang, et al. Effect of long-term fertilization on available carbon pool and carbon pool management index in an aquic brown soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 539-544.

[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. LI Xin-hua, GUO Hong-hai, ZHU Zhen-lin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of

soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9):130-135.

[10] Paustian K, Andren O, Janzen H H, et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO_2 emissions[J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(4):230-244.

[11] 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, 2000:147-195. LU Ru-kun. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000:147-195.

[12] 胡海清, 陆昕, 孙龙. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. 森林工程, 2012, 28(5):18-22. HU Hai-qing, LU Xin, SUN Long. Research review on soil active organic carbon fractionation and analytical methods[J]. *Forest Engineering*, 2012, 28(5):18-22.

[13] 田慎重, 张玉凤, 边文范, 等. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2):185-190. TIAN Shen-zhong, ZHANG Yu-feng, BIAN Wen-fan, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil labile organic carbon fractions in continue rotary tillage cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2):185-190.

[14] 闫洪奎, 王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32:250-255. YAN Hong-kui, WANG Xin-ran. The effects of straw returned form a complete set of deep scarification to soil properties and maize yield under a long-term trial[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32:250-255.

[15] 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8):2801-2808. LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, et al. Short-term impacts of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in black soil of northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8):2801-2808.

[16] 杨永辉, 武继承, 丁晋利, 等. 长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9):173-183. YANG Yong-hui, WU Ji-cheng, DING Jin-li, et al. Effects of long-term no-tillage on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2017, 48(9):173-183.

[17] 郭宝华, 范少辉, 杜满义, 等. 土地利用方式对土壤活性碳库和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3):723-728. GUO Bao-hua, FAN Shao-hui, DU Man-yi, et al. Effect of land-use type on soil labile carbon pool and carbon management index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(3):723-728.

[18] 周艳翔, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013(1):48-53. ZHOU Yan-xiang, LÜ Mao-kui, XIE Jin-sheng, et al. Sources characteristics and stability of organic carbon in deep soil[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2013(1):48-53.

[19] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):156-161. WANG Jin-zhou, LU Chang-ai, ZHANG Wen-ju, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):156-161.

[20] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18):3767-3775. FAN Ru-qin, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(18):3767-3775.

[21] 韩晓增, 邹文秀. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12):2996-3002. HAN Xiao-zeng, ZOU Wen-xiu. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12):2996-3002.