

不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响

李新华¹, 郭洪海^{2*}, 朱振林¹, 董红云¹, 杨丽萍¹, 张锡金¹

(1.山东省农业可持续发展研究所, 济南 250100; 2.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘要: 为了探讨不同秸秆还田模式对土壤有机碳 (total organic carbon, TOC) 及活性碳组分的影响, 设置了秸秆不还田 (CK)、秸秆直接还田 (CS)、秸秆转化为食用菌基质, 出蘑后菌渣还田 (CMS) 和秸秆过腹还田 (CGS) 4 种还田模式。通过田间小区试验, 研究了不同秸秆还田模式下, 土壤有机碳及活性组分的变化规律。结果表明不同秸秆还田模式均提高了土壤有机碳含量, 但不同还田模式下土壤有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$), 和 CK 相比, CS、CMS 和 CGS 处理下, 土壤有机碳质量分数分别增加 9.0%、23.9% 和 26.7%。不同秸秆还田模式也提高了土壤活性碳组分含量。在不同秸秆还田模式下, 土壤溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 含量表现为 $CS>CMS>CGS>CK$, 且不同处理间差异显著 ($P<0.01$)。和 CK 相比, CS、CMS 和 CGS 处理下, 土壤 DOC 质量分数分别增加 64.6%、29.4% 和 8.9%。土壤微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 含量表现为 $CMS>CGS>CS>CK$, 且差异显著 ($P<0.05$)。和 CK 相比, CS、CMS 和 CGS 处理下, 土壤 MBC 质量分数分别增加 28.9%、84.7% 和 59.3%。土壤易氧化态碳 (easily oxidizable carbon, EOC) 含量表现为 $CMS>CS>CGS>CK$, 且差异显著 ($P<0.01$)。和 CK 相比, CS、CMS 和 CGS 处理下, 土壤 EOC 质量分数分别增加 24.1%、55.7%、和 9.3%。不同秸秆还田模式显著影响土壤活性碳组分在总有机碳中占的比例, 改变土壤有机碳质量。在不同秸秆还田模式下, DOC/TOC 表现为 $CS>CMS>CK>CGS$ 、MBC/TOC 表现为 $CMS>CGS>CS>CK$ 、EOC/TOC 表现为 $CMS>CS>CK>CGS$, 且不同处理间均差异显著 ($P<0.01$)。从提高土壤质量角度, 推荐秸秆-菌渣还田模式, 在该模式下, 土壤 MBC/TOC 和 EOC/TOC 均最大, 土壤碳素有效性高、易于被微生物利用, 有利于作物生长。从提高土壤固碳角度, 推荐秸秆过腹还田模式, 在该模式下, 土壤 DOC/TOC 最小, 且土壤有机碳含量最高, 有利于碳的固定和保存。该研究结果可为秸秆合理高效利用、改善农业土壤碳库质量提供参考。

关键词: 秸秆; 有机碳; 土壤; 还田模式; 活性碳组分

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.018

中图分类号: S158.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-09-0130-06

李新华, 郭洪海, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 张锡金. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.018 http://www.tcsae.org

Li Xinhua, Guo Honghai, Zhu Zhenlin, Dong Hongyun, Yang Liping, Zhang Xijin. 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 (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 130—135. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.018 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤有机碳 (total organic carbon, TOC) 是土壤的重要组成部分, 不仅影响土壤的物理、化学及生物性质, 在土壤肥力和植物营养中也具有重要作用^[1]。但土壤有机碳的数量只是一个矿化分解和合成的平衡结果, 不能很好地反映转化速率和土壤有机碳质量的变化^[2]。而土壤中的活性碳组分如可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、土壤微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 和易氧化态碳 (easily oxidizable carbon, EOC) 等指标虽然在有机碳中所占的比例较小, 但这些组分对不同农业

管理措施如施肥、秸秆还田及耕作方式等的变化更敏感, 因此常被用作评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标^[3-4]。研究土壤有机碳及其活性组分的变化, 有利于揭示农业措施对土壤有机碳的影响机制^[5]。

农作物秸秆作为物质、能量和养分的载体, 是一种宝贵的自然资源, 秸秆直接还田是当今秸秆资源利用的主渠道^[2]。研究表明秸秆还田不仅是提高土壤肥力、增加作物产量的主要农艺措施之一^[6-7], 但也带来了播种质量差、与饲料争资源、病虫害大面积发生及影响温室气体排放等问题^[8-9]。秸秆还田后, 由于增加了土壤外源有机物的投入, 不仅影响土壤有机碳的活性和稳定性, 改变其组成与存在方式^[10-11], 并且土壤有机碳及其活性组分对不同有机物料的响应也存在较大差异^[12-13]。秸秆也可以转化为有机肥、畜禽粪便、菌渣等不同有机物料, 通过不同途径再归还到农田。鉴于此, 为了确定秸秆合理有效的还田方式, 更好的提高土壤质量, 本研究在黄淮海小麦-玉米一年两熟制区域选择典型研究区, 设置秸秆不还田、秸秆直接还田、秸秆转化为食用菌基质, 出

收稿日期: 2015-10-29 修订日期: 2016-02-24

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目 (2012BAD14B07-1)。

作者简介: 李新华, 女, 山东曹县人, 博士, 副研究员, 主要从事环境生态与生物地球化学研究。济南 山东省农业可持续发展研究所, 250100。

Email: xinhuali_2008@163.com

*通信作者: 郭洪海, 男, 山东单县人, 研究员, 主要从事循环农业研究。济南 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 250100。

Email: honghaig@163.com

蘑菇菌渣还田和秸秆过腹还田 4 种还田模式, 开展不同秸秆还田模式对土壤有机碳含量及其活性碳组分影响的研究, 以期对秸秆合理高效利用、改善农业土壤碳库质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山东省农业科学院农业资源与环境研究所循环农业研究基地—山东省德州市平原县张华镇梨园村, 本区属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候, 冬冷夏热, 雨热同期, 四季分明。年平均气温 12.1~13.1℃, 极端最高气温 40.9℃, 极端最低气温—22.8℃。年平均降雨量 579.2~633.3 mm。试验田土壤类型为壤土, 是典型的黄河冲积平原, 耕层土壤厚约 20 cm。试验前土壤基本理化性质为: 有机质质量分数 17.8 g/kg、TOC 9.56 g/kg、TN 1.04 g/kg、DOC 151.68 mg/kg、MBC 9.38 mg/kg、EOC 0.85 mg/kg、A-P15.58 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2012 年 10 月—2014 年 10 月进行。试验设 4 个处理, 分别为 1) 秸秆不还田 (CK), 小麦、玉米收获后, 人工移除秸秆及根系。2) 秸秆直接还田 (CS), 小麦、玉米收获后, 用小型秸秆粉碎机将秸秆粉碎, 然后全部还田; 小麦、玉米秸秆的含水率分别为 10.6% 和 11.2%; 总有机碳质量分数分别为 47.1% 和 43.3%。3) 秸秆过腹还田 (CGS), 小麦、玉米秸秆收获后, 作为牛的饲料, 然后购买牛粪, 用塑料薄膜密封、腐熟后还田。牛粪的含水率为 80.2%, 总有机碳质量分数为 42.7%。4) 秸秆转化为食用菌基质, 出蘑菇菌渣还田 (CMS), 菌渣来自山东省农业科学院食用菌试验示范基地, 为栽培双孢菇之后产生的菌渣, 菌渣的含水率为 49.8%, 总有机碳质量分数为 39.8%。菌渣通过堆沤、发酵、腐熟转化后还田。小麦、玉米季不同处理下具体还田量见表 1。小区面积为 7 m×10 m=70 m², 每个处理设 3 个重复, 共 12 个小区。

表 1 不同秸秆还田模式下的还田量
Table 1 Amount of straw return under different modes
kg·hm⁻²

处理 Treatment	小麦季 Wheat season	玉米季 Corn season
不还田 CK	0	0
秸秆粉碎还田 CS	8 100	8 400
秸秆-菌渣还田 CMS	16 200	16 800
秸秆过腹还田 CGS	4 050	1 848

注: 秸秆还田量为多年秸秆的平均产量; 秸秆到牛粪产量约为秸秆量的 2 倍; 小麦秸秆到菌渣的转化率约为 50%, 玉米秸秆到菌渣的转化率约为 22%。
Note: The amount of straw return is the average of multiple years; The yield of cattle manure from straw is about two times of the amount of straw; The conversion rate of wheat straw to mushroom residue is about 50%, and the conversion rate of corn straw to mushroom residue is about 22%.

本区的种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟制, 每年 10 月中上旬种植冬小麦, 6 月中上旬种植玉米。供试小麦品种为济麦 22, 玉米品种为郑丹 958。小麦分别于 2012 年在 10 月 8 号、2013 年在 10 月 11 号播种, 2013 年 6

月 6 号、2014 年 6 月 8 号收获。玉米分别于 2013 年 6 月 8 号、2014 年 6 月 10 号种植, 2013 年 10 月 6 号、2014 年 10 月 7 号收获。

不同秸秆还田处理后, 小麦、玉米均统一种植, 并统一水肥管理。肥料的使用量为优化的经济施肥量, 其中小麦季氮、磷、钾肥 (分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾) 用量折合成纯养分 N-P₂O₅-K₂O 205-124-135 kg/hm², N 肥一半作为基肥, 一半在拔节期追施, 磷和钾全部作为基肥。玉米季氮、磷、钾肥 (分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾) 用量折合成纯养分 N-P₂O₅-K₂O 234-102-190 kg/hm², 全部做底肥。其他田间管理均相同。

1.3 样品采集与分析

2014 年 10 月玉米收获时, 在每个小区内采用“S”型采样法采集 5 个样点, 采集深度为 0~20 cm。将每个样区采样点的土样混合均匀, 采用多点采集方法形成混合样品。一份拣去植物根系、碎屑等杂物, 过 2 mm 土壤筛, 储藏于 4℃冰箱中用于测定土壤微生物量碳、土壤可溶性有机碳; 另一份风干后过 0.25 mm 筛, 用于测定其他指标。

土壤 TOC 采用重铬酸钾高温氧化法测定^[14]; DOC 采用去离子水浸提法测定^[15]; MBC 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定^[16]; EOC 采用高锰酸钾氧化法测定^[17]。

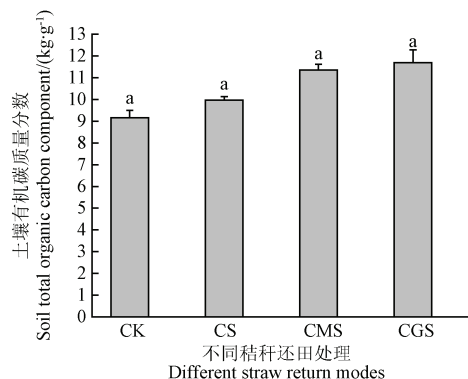
1.4 数据处理

运用 Excel 2007 进行数据处理计算, Origin7.5 进行绘图, SPSS 13.5 等软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田模式对土壤有机碳的影响

不同秸秆还田模式下, 土壤有机碳的变化见图 1。



注: CK, 不还田; CS, 秸秆粉碎还田; CMS, 秸秆-菌渣还田; CGS, 秸秆过腹还田。下同。

Note: CK, non-straw return; CS is direct straw return; CGS is straw return after mushroom cultivation; CGS is straw return after livestock digestion. The same as below.

图 1 不同秸秆还田模式下耕层土壤有机碳含量变化

Fig.1 Changes in topsoil organic carbon content under different straw return modes

由图 1 可知, 不同秸秆还田模式均增加了土壤有机碳含量, 但增加幅度不同。4 种处理下, 土壤有机碳质量分数分别为 CGS (11.69±0.59) g/kg、CMS (11.35±0.34) g/kg、CS (9.98±0.27) g/kg、CK (9.16±0.15) g/kg。方差分析结果表明, 不同秸秆还田模式下土壤有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$), 这可能与土壤有机碳对短期内秸秆还田响应

不敏感有关^[18]。其中在秸秆过腹还田模式中, 土壤有机碳含量增加最多, 这是因为施用禽畜粪便可以增加农田土壤有机碳输入量, 促进土壤中水稳性团粒结构的形成, 加速土壤有机碳积累^[19]。同时, 禽畜粪便含有丰富的氮素等养分, 可以促进作物生长, 增加作物根际对土壤有机碳库的输入^[20]。

2.2 不同秸秆还田模式对土壤有机碳不同活性碳组分的影响

不同秸秆还田模式下, 土壤活性碳组分的变化见表 2。由表可知, 和土壤有机碳含量的变化相同, 不同秸秆还田处理下, 土壤活性碳组分含量也均增加。

表 2 不同秸秆还田模式下, 土壤活性碳组分含量

Table 2 Fractions of soil active carbon components under different straw return modes

处理 Treatment	溶解性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)	土壤微生物量碳 Microbial biomass carbon MBC/(mg·kg ⁻¹)	土壤易氧化态碳 Easily oxidizable carbon EOC/(g·kg ⁻¹)
CK	140.62±5.30 d	83.36±1.25d	2.23±0.41d
CS	231.49±2.31A	107.46±3.27c	2.76±0.53B
CMS	205.73±2.66 B	153.99±4.84a	3.47±0.82A
CGS	158.85±1.21C	132.83±3.04b	2.44±0.36c

注: 表中同列不同小写字母分别表示差异显著 ($P<0.05$); 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$); Different large letters in the same column mean great significant difference ($P<0.01$). The same as below.

对于土壤可溶性有机碳来说, 在不同秸秆还田模式下, 土壤 DOC 含量表现为 CS>CMS>CGS>CK, 且不同还田处理间差异显著 ($P<0.01$)。和 CK 相比, 在 CS、CMS 和 CGS 模式下, 土壤 DOC 质量分数分别增加 64.6%、29.4%和 8.9%。秸秆直接还田模式下, 土壤 DOC 含量最高, 分别比 CS、CGS 模式增加 11.1%和 31.4%。

对于土壤微生物量碳来说, 在不同秸秆还田模式下, 土壤 MBC 含量表现为 CMS>CGS>CS>CK, 且不同还田处理间差异显著 ($P<0.05$)。和 CK 相比, 在 CS、CMS 和 CGS 模式下, 土壤 MBC 质量分数分别增加 28.9%、84.7%和 59.3%。其中 CMS 模式下, 土壤 MBC 质量分数最高, 均值为 153.99 mg/kg, 分别比 CS、CGS 模式增加 30.2%和 13.7%。这可能与菌渣具有较高的 C/N, 导致土壤微生物在分解过程中对碳素进行固定, 从而增加土壤 MBC 含量^[21]。

对于土壤易氧化性碳来说, 在不同秸秆还田模式下, 土壤 EOC 含量均增加, 表现为 CMS>CS>CGS>CK, 且不同还田处理间差异显著 ($P<0.01$)。和 CK 相比, 在 CS、CMS 和 CGS 模式下, 土壤 EOC 质量分数分别增加 24.1%、55.7%和 9.3%。其中 CMS 模式下, 土壤 EOC 质量分数最高, 均值为 3.47 g/kg, 分别比 CS、CGS 模式增加 20.4%和 29.7%。

2.3 不同秸秆还田模式对土壤碳质量的影响

不同秸秆还田模式下, 土壤中活性碳组分与有机碳的比值见表 3。由表可知, 在不同秸秆还田模式下, 土壤活性碳组分在有机碳中占的比例变化不同。其中 DOC/TOC 在不同秸秆还田模式下, 表现为 CS>CMS>

CK>CGS。和 CK 相比, CS 和 CMS 还田处理均使 DOC/TOC 提高, 而 CGS 处理则使 DOC/TOC 降低。方差分析表明, 不同秸秆还田模式下, DOC/TOC 差异显著 ($P<0.01$)。说明不同秸秆还田模式, 能显著改变土壤中 DOC/TOC 的数值, 从而改变土壤质量。在 CS 和 CMS 还田模式下, DOC/TOC 均增加, 说明这 2 种还田处理能提高土壤有机碳中 DOC 的占有比例, DOC 属于易移动性物质, 在有机碳中占有比例高, 不利于有机碳的积累。在 CGS 还田模式下, DOC/TOC 减少, 说明土壤有机碳中 DOC 占有的比例降低, 而 DOC 是土壤微生物重要的物质和能量来源^[22], DOC/TOC 比值小不利于土壤有机碳的矿化, 但提高了土壤有机碳的稳定性^[23]。

表 3 不同秸秆还田模式下土壤活性碳组分的分配比率

Table 3 Fractions of soil active carbon in soil total organic carbon under different straw return modes

处理 Treatment	DOC/TOC	MBC/TOC	EOC/TOC
CK	1.54C	0.91D	24.30C
CS	2.32 A	1.08C	27.67B
CMS	1.81B	1.36A	30.58A
CGS	1.36D	1.14B	20.9D

在不同秸秆还田模式下, MBC/TOC 均增加, 说明秸秆不论以何种方式还田, 均可以改变土壤微生物的种群和数量, 加快非活性有机碳向活性有机碳转变, 提高了土壤有机碳的有效性。方差分析表明不同秸秆还田模式下, MBC/TOC 差异显著 ($P<0.01$), 说明秸秆还田模式对 MBC/TOC 影响显著。既在不同秸秆还田模式下, 非活性有机碳向活性有机碳的转变量差异显著, 表现为 CMS>CGS>CS>CK。

在不同秸秆还田模式下, EOC/TOC 表现为 CMS>CS>CK>CGS。和 CK 相比, CS 和 CMS 还田模式均提高了 EOC/TOC。而 CGS 还田模式则使 EOC/TOC 降低。方差分析表明不同秸秆还田模式下, EOC/TOC 差异显著 ($P<0.01$), 说明不同秸秆还田模式, 均能显著改变土壤中易氧化碳在总有机碳中所占的比例, 从而改变土壤质量。

3 讨论

3.1 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及活性碳组分的影响

在本研究中, 秸秆以不同形式还田后, 土壤 TOC 含量均增加。这与田慎重等^[24]、王丹丹等^[25]、及 Li 等^[26]等的研究结果相一致。但在不同秸秆还田模式下, 土壤 TOC 含量的增加幅度不同。本研究表明, 在秸秆过腹还田模式下, 土壤有机碳含量增加最多, 与试验开始前土壤有机碳含量 (均值 9.56 g/kg) 相比, 增加了 18.2%, 这是因为秸秆通过畜禽转化为粪便, 施加到农田后, 一方面增加土壤有机碳输入量, 促进土壤中水稳性团粒结构的形成, 加速土壤有机碳积累^[19]; 另一方面禽畜粪便含有丰富的氮素等养分, 可以促进作物生长, 增加作物对土壤有机碳库的输入^[20-23]。而在秸秆不还田模式下, 土壤有机碳含量比试验开始前减少 4.3%, 表现为土壤有机碳库的亏损。这是由于秸秆被移除, 相当于仅施加了化

学肥料,而仅施加化学肥料会增强土壤有机质分解,从而使 TOC 含量降低^[27]。Paustain 等^[28]研究也表明,每年至少应向土壤归还秸秆 2~4 mg/hm²,才可以维持土壤碳库的收支平衡。

不同秸秆还田模式不仅增加了土壤有机碳含量,也改变了土壤活性碳组分含量。在本研究中,不同秸秆还田模式下,土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量均增加,但增加量不同。这是因为秸秆、牛粪和菌渣的投入,相当于增加了外源有机物的投入,可为微生物提供充足的碳源,促进微生物生长、繁殖,提高土壤微生物活性,而微生物分解的有机物质以及秸秆腐解物是活性碳组分的主要来源,所以土壤中活性碳组分含量均增加^[29]。土壤中 DOC、MBC 和 EOC 在不同秸秆还田模式下增加量不同,可能与秸秆及其秸秆转化后产生的有机物料(牛粪和菌渣)组成成分不同,尤其与 C/N 不同有关。其中在秸秆直接还田模式下,土壤 DOC 含量增加最多,比试验开始前土壤 DOC 含量(151.68 mg/kg)增加 52.6%。这可能是秸秆直接还田尤其在玉米季,实行免耕播种,相当于秸秆粉碎后直接覆盖在地表,降低了土壤表面的径流,并增加了土壤温度,从而提高了土壤可溶性碳含量。在秸秆菌渣还田模式下,土壤 MBC 和 EOC 含量增加最多,分别比试验前(表 2)增加 59.2%和 46.5%,说明秸秆菌渣还田能显著提高土壤中 MBC 和 EOC 的含量。这是因为菌渣具有较高的 C/N,导致土壤微生物分解过程中对碳素的固定,从而提高了土壤 MBC 和 EOC 含量。而在秸秆不还田处理下,土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量均比试验前降低,这是因为由于秸秆被移除,相当于仅施加了化肥,主要是增加非活性有机碳的含量^[30-31]。

3.2 不同秸秆还田模式对土壤有机碳质量的影响

土壤中活性碳组分占有机碳的比例可在一定程度上反映土壤有机碳的质量和稳定程度。该比例越高表示碳素有效性高,易被微生物分解矿化、周转期较短或活性高,比例小则表示土壤有机碳较稳定,不易被生物所利用^[32]。本研究表明,不同秸秆还田模式显著影响土壤活性碳组分在有机碳中所占的比例,改变了土壤质量。这是因为秸秆、牛粪和菌渣等外源有机物料进入土壤,腐烂分解后增加了土壤微生物的数量,提高了微生物的活性,养分进入土壤活性碳库,有助于土壤活性碳库的积累^[24]。

在不同秸秆还田模式下,DOC/TOC 表现为 CS>CMS>CK>CGS,说明在秸秆直接还田模式下,更有利于提高土壤 DOC 在总有机碳中的比例,有利于养分分解供作物利用;但从土壤固碳的角度看,土壤中 DOC/TOC 数值大则降低土壤有机碳的稳定性,不利于碳的保存。这可能是因为秸秆直接还田尤其在玉米季,实行免耕播种,相当于秸秆粉碎后直接覆盖在地表,降低了土壤表面的径流,并增加了土壤温度^[33],有利于提高土壤 DOC 含量。在秸秆-菌渣还田模式中,MBC/TOC 和 EOC/TOC 均最大,说明秸秆-菌渣还田模式更有利提高土壤 MBC 和 EOC 在有机碳中的比例,这与王义祥等^[34]的研究结果相一致。在该模式下,土壤有机碳的含量也较高(图 1),这是因为食用菌菌渣中有机质含量高,具有较高的 C/N,导致土

壤微生物在分解过程中对碳素进行固定,从而增加了土壤微生物量碳含量^[21],并且菌丝在生产过程中分泌的一些生物活性物质,能够分解复杂的有机物,从而有利于土壤活性碳组分的积累^[35]。可见在秸秆-菌渣还田模式下,有利于提高土壤微生物的活性,从而增加土壤有机碳的积累,并且提高了土壤碳素的有效性、氧化稳定性,有利于提高农田土壤有机碳质量。

4 结 论

1) 不同秸秆还田模式均能增加土壤有机碳含量,且增加量不同,但不同秸秆还田模式处理下,土壤有机碳含量差异不显著($P>0.05$)。4 种处理下,土壤有机碳含量表现为出磨后菌渣还田 CGS>秸秆过腹还田 CMS>秸秆还田 CS>秸秆不还田 CK。和 CK 相比,CS、CMS 和 CGS 处理下,土壤有机碳质量分数分别增加 9.0%、23.9%和 27.6%。

2) 不同秸秆还田模式也提高了土壤活性碳组分含量。在不同秸秆还田模式下,土壤 DOC 含量表现为 CS>CMS>CGS>CK,且不同处理间差异显著($P<0.01$)。和 CK 相比,CS、CMS 和 CGS 处理下,土壤 DOC 质量分数分别增加了 64.6%、29.4%和 8.9%。土壤 MBC 含量表现为 CMS>CGS>CS>CK,且差异显著($P<0.05$)。和 CK 相比,CS、CMS 和 CGS 处理下,土壤 MBC 含量分别增加 28.9%、84.7%和 59.3%。土壤 EOC 质量分数表现为 CMS>CS>CGS>CK,且不同处理间差异显著($P<0.01$)。和 CK 相比,CS、CMS 和 CGS 处理下分别增加 24.1%、55.7%和 9.3%。

3) 不同秸秆还田模式显著影响土壤活性碳组分在有机碳中占有比例,改变土壤有机碳质量。在不同秸秆还田模式下,DOC/TOC 表现为 CS>CMS>CK>CGS; MBC/TOC 表现为 CMS>CGS>CS>CK; EOC/TOC 表现为 CMS>CS>CK>CGS,且不同处理间差异显著($P<0.01$)。

4) 从提高土壤质量看,在秸秆-菌渣还田模式下,MBC/TOC 和 EOC/TOC 最大,有利于提高土壤微生物活性,也能一定程度的增加土壤有机碳积累,从而提高土壤碳素的有效性、氧化稳定性,有利于改善农田土壤有机碳质量。从提高土壤固碳量来看,在秸秆过腹还田模式下,DOC/TOC 最小,且土壤有机碳含量最高,土壤有机碳稳定性高,有利于土壤有机碳的积累和保存。

[参 考 文 献]

- [1] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 82—293.
- [2] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522—528.
Lu Wentao, Jia Zhikuan, Zhang Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 522—528.(in Chinese with English abstract)
- [3] Lefroy R D B, Lisle L. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1997, 48: 1049—1058.

- [4] Yan Dezhi, Wang Dejian, Yang Linzhang. 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] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 345–353.
- [6] 唐海明, 汤文光, 肖小平, 等. 中国农田固碳减排发展现状及其战略对策[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1755–1759. Tang Haiming, Tang Wenguang, Xiao Xiaoping, et al. Current situation and countermeasures of China's C sequestration and mitigation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1755–1759. (in Chinese with English abstract)
- [7] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 81–85. Mu Ping, Zhang Enhe, Wang Hanning, et al. Effects of continuous returning straw to maize till soil on chemical character and microbial biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 81–85. (in Chinese with English abstract)
- [8] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisols influenced by wheat residue amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67: 147–157.
- [9] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2362–2367. Li Chengfang, Kou Zhikun, Zhang Zhisheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362–2367. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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: 133–139.
- [11] 王虎, 王旭东, 田宵鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. *中国应用生态学报*, 2014, 25(12): 3491–3498. Wang Hu, Wang Xudong, Tian Xiaohan. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3491–3498. (in Chinese with English abstract)
- [12] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Goedermia*, 2009, 149: 318–324.
- [13] 胡诚, 曹志平, 叶钟年, 等. 不同的土壤培肥措施对低肥力农田土壤微生物生物量碳的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 808–814. Hu Cheng, Cao Zhiping, Ye Zhongnian, et al. Impact of soil fertility maintaining practice on soil microbial biomass carbon in low production agro-ecosystem in northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 808–814. (in Chinese with English abstract)
- [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: 147–195.
- [15] Liangb C Mackenzie A F, Schnitzer M. Management-induced changes in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26: 88–94.
- [16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1987, 19: 703–704.
- [17] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47–52.
- [18] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221–268.
- [19] 陈泮勤 主编. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 198–244.
- [20] Dendoncker N, Van Wesemael B, Rounsevell M D A, et al. Belgium's CO₂ mitigation potential under improved cropland management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 103(1): 101–116.
- [21] 黄小林. 菌渣还田对农田温室气体排放的影响研究[D]. 四川农业大学, 2012: 17–38. Huang Xiaolin. Effects of Mushroom Residues on GHS Emissions from Soils under Rice-wheat Rotation[D]. Sichuan Agricultural University, 2012: 17–38. (in Chinese with English abstract)
- [22] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 84–87. Xu Qiufang, Jiang Peikun. Study on active organic carbon of soils under different types of vegetation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 84–87. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1407–1414. Li Ling, Chou Shaojun, Liu Jingtao, et al. Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: A review[J]. 2012, 23(5): 1407–1414. (in Chinese with English abstract)
- [24] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 373–378. Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Wang Yu, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 373–378. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 735–740. Wang Dandan, Zhou Liang, Huang Shengqi, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 735–740. (in Chinese with English abstract)
- [26] Li C F, Yue L X, Kou Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 119: 31–37.
- [27] 曹丛丛, 齐玉春, 董云社, 等. 氮沉降对陆地生态系统关键有机碳组分的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 323–332. Cao Congcong, Qi Yuchun, Dong Yunshe, et al. Effects of nitrogen deposition on critical fractions of soil organic carbon in terrestrial ecosystems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 323–332. (in Chinese with English abstract)
- [28] Paustian K, Andren O, Janzen H H, et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions[J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(4): 230–244.
- [29] 徐国伟, 常二华, 蔡建. 秸秆还田的效应及影响因素[J]. 耕作与栽培, 2005(1): 6–9. Xu Guowei, Chang Erhua, Cai Jian. Effects of the crop residue incorporation and its influencing factors[J]. *Tillage and Cultivation*, 2005(1): 6–9. (in Chinese with English abstract)

- [30] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1646—1655.
Zhang Lu, Zhang Wenju, Xu Minggang, et al. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1646—1655. (in Chinese with English abstract)
- [31] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445—1451.
Zang Yifei, Hao Mingde, Zhang Liqiong, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1445—1451. (in Chinese with English abstract)
- [32] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(2): 167—172.
- [33] 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 9—11.
Tang Tao, Hao Mingde, Shan Fengxia. Effects of straw mulch application on water loss and soil erosion under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1): 9—11. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王义祥, 王峰, 叶菁, 等. 不同菌渣施用量对柑橘园土壤有机碳及其组分的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 650—655.
Wang Yixiang, Wang Feng, Ye Jing, et al. Effect to organic carbon pool and fractions in citrus orchard soils by adding different edible fungus residues[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(4): 650—655. (in Chinese with English abstract)
- [35] 宫志远, 韩建东, 魏建林, 等. 金针菇渣有机肥在油菜上施用技术研究[J]. 中国食用菌, 2012, 31(5): 42—44.
Gong Zhiyuan, Han Jiandong, Wei Jianlin, et al. Application effect of organic fertilizer made by spent flammulina velutipe substrate on oilseed rape[J]. *Edible Fungi of China*, 2012, 31(5): 42—44. (in Chinese with English abstract)

Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon

Li Xinhua¹, Guo Honghai^{2*}, Zhu Zhenlin¹, Dong Hongyun¹, Yang Liping¹, Zhang Xijin¹

(1. Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Ji'nan 250100, China;

2. Institute of Resource and Environment, SAAS, Ji'nan 250100, China)

Abstract: To assess the effects of different straw return modes on the content of soil organic carbon and the fraction of soil active carbon, we investigated 4 different straw return modes, non-straw return (CK), direct straw return (CS), straw return after mushroom cultivation (CMS), and straw return after livestock digestion (CGS) using field plot experiment. The results showed that different straw return modes all increased the content of soil organic carbon, but the increases in soil organic carbon content by different straw return modes did not exhibit significant difference ($P>0.05$). The increases in soil organic carbon content were found in the order of CGS > CMS > CS > CK. In comparison to CK mode, the contents of soil organic carbon with CS, CMS and CGS modes increased by 9.0%, 23.9% and 26.7%, respectively. In addition, different straw return modes all improved the content of soil active carbon. Under different straw return modes, the contents of dissolved organic carbon (DOC) were in the order of CS > CMS > CGS > CK, and significant differences were observed among different return modes ($P<0.01$). Compared to CK mode, the contents of DOC in the treatments of CS, CMS and CGS increased by 64.6%, 29.4% and 8.9%, respectively. The contents of microbial biomass carbon (MBC) followed the order of CMS > CGS > CS > CK, and their differences were significant ($P<0.05$). The contents of MBC in the treatments of CS, CMS and CGS increased by 28.9%, 84.7%, and 59.3%, respectively, compared to the CK treatment. Similarly, the contents of soil easily oxidizable carbon (EOC) were in the order of CMS > CS > CGS > CK, and their differences were significant ($P<0.01$). Compared to CK mode, the contents of EOC in the treatments of CS, CMS and CGS increased by 24.1%, 55.7% and 9.3%, respectively. Straw return modes also significantly affected the fraction of soil active carbon in the soil total organic carbon (TOC) and changed the quality of soil organic carbon. Under different straw return modes, the ratios of DOC/TOC, MBC/TOC and EOC/TOC were in the orders of CS > CMS > CK > CGS, CMS > CGS > CS > CK and CMS > CS > CK > CGS, respectively. From the perspective of improving soil quality, CMS is the recommended mode, which has the greatest ratios of MBC/TOC and EOC/TOC, as well as a higher soil carbon effectiveness that facilitates the carbon utilization by the microorganisms, thus benefiting the growth of crops. On the other hand, from the perspective of soil carbon sequestration, CGS is the recommended mode, which has the lowest fraction of DOC/TOC and the highest content of soil organic carbon, thus facilitating the carbon sequestration. The results of the study can provide the basic data for the rational and efficient utilization of straw, as well as the improvement of the quality of agricultural soil carbon pool.

Keywords: straw; organic carbon; soils; straw return mode; fraction of soil active carbon