

秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、 碳储量及水稻产量的影响

吴玉红¹, 郝兴顺¹, 田霄鸿², 陈艳龙², 张春辉¹,

陈浩¹, 李厚华¹, 秦宇航¹, 黄重¹

(1. 汉中市农业科学研究所, 陕西 汉中 723000; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 721000)

摘要: 为探索稻麦或稻油轮作制下, 小麦、油菜秸秆还田对汉中盆地稻田土壤碳库组分的变化, 设置小麦秸秆不还田(WSN)、小麦秸秆常规还田(WS)、小麦秸秆促腐还田(WSM)、油菜秸秆不还田(RSN)、油菜秸秆常规还田(RS)、油菜秸秆促腐还田(RSM), 共6个处理, 通过大田试验研究了不同秸秆类型及还田方式对稻田0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—25 cm 5个土壤层次中的土壤容重、总有机碳(TOC)、活性有机碳(LOC)、活性有机碳效率(A_{CL})、碳储量(SCS)、碳库管理指数(CPMI)及水稻产量的影响。结果表明: 秸秆还田显著降低0—15 cm土层容重, 对15—25 cm并未产生显著影响。与不还田相比, 秸秆还田明显增加了各层次土壤有机碳库指标含量, 但TOC和LOC含量均随土壤深度的增加而减少, 两者在0—15 cm土层含量较高, 具有明显的表层富集现象; 与不还田相比, 小麦及油菜秸秆还田后可明显增加稻田0—25 cm土层中的土壤碳储量(SCS), 增幅可达21.9%~23.5%和1.7%~6.7%。不同土层中的LOC、 A_{CL} 、CPMI对秸秆类型的响应不同, 具体表现为小麦秸秆还田(WS、WSM)对0—15 cm土层具有显著促进作用, 而油菜秸秆还田(RS、RSM)对15—25 cm土层中的有显著促进作用。产量方面, 秸秆促腐还田模式下(WSM、RSM)水稻产量最高, 常规还田模式(WSN、RSN)次之, 而不还田时产量最低。相关分析显示0—10 cm土壤活性有机碳效率与水稻产量显著相关。秸秆还田是提高汉中盆地稻田土壤有机碳和产量较为有效的农田管理措施。两种轮作模式下, 小麦秸秆全量旋耕还田更有利于固持稻田土壤有机碳和增加水稻产量增加。

关键词: 汉中盆地; 稻麦或稻油轮作; 秸秆还田; 土壤有机碳; 碳储量; 固碳效率

中图分类号: S153.62; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0325-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.051

Effect of Straw Returning on the Contents of Soil Organic Carbon Fractions, Carbon Storage and Crop Yields of Paddy Field in Hanzhong Basin

WU Yuhong¹, HAO Xingshun¹, TIAN Xiaohong², CHEN Yanlong², ZHANG Chunhui¹,

CHENG Hao¹, LI Houhua¹, QI Yuhang¹, HUANG Chong¹

(1. Hanzhong Agricultural Science Research Institute, Hanzhong, Shaanxi 723000;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: A field experiment was carried out in rice-wheat or rice-rape rotation field in Hanzhong basin, Shaanxi Province, China, to investigate the effect of wheat or rape straws returning on soil bulk density, soil nutrients, total organic carbon (TOC), active organic carbon (LOC), active organic carbon efficiency (ACL), organic carbon storage (SCS), carbon management index (CPMI) and rice yield. Six treatments were set up, including no straw returning (WSN), conventional wheat straw returning (WS), decayed wheat straw returning (WSM), no rape straw returning (RSN), conventional rape straw returning (RS) and decayed rape straw returning (RSM). Soil samples were collected at the depth of 0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm, 15—20 cm and 20—25 cm soil layers, respectively. Results showed that straw returning significantly reduced soil bulk density of 0—15 cm soil layer, however, this kind of treatment had no significant effect on soil bulk density of 15—25 cm soil layer. Compared to no straw returning treatment, the soil organic carbon contents significantly increased in the wheat or rape straw returning treatments. Meanwhile, the TOC and

收稿日期: 2017-03-16

资助项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL02-21, 2016KTZDNY03-01); 省农业科技创新与攻关项目(2016NY-180)

第一作者: 吴玉红(1983—), 女, 甘肃民勤人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分资源高效利用研究。E-mail: wuyuhong_yang@163.com

通信作者: 郝兴顺(1966—), 男, 陕西蒲城人, 大学本科, 研究员, 主要从事废弃农业资源循环利用研究。E-mail: 372770515@qq.com

LOC in soil decreased with the increasing of soil depth, and TOC and LOC in 0—15 cm soil layer were both higher, and had an obvious surface enrichment phenomenon. Compared to no straw returning treatment, SCS of 0—30 cm soil layer significantly increased by 21.9%~23.5% and 1.7%~6.7% in the wheat straw return treatments and rape straw return treatments, respectively. Compared to the rape straw return treatments (RS, RSM), wheat straw returning significantly increased LOC, ACL, and CPIM of 10—15 cm soil layer; whereas, LOC, ACL, and CPIM of 15—25 cm soil layer in the rape straw returning treatments were significant higher than those in the wheat straw returning treatments (WS, WSM). As for rice yield, value was the highest under WSM and RSM treatments, followed by WSN and RSN treatments, and the yield was the lowest when there was no straw returning. Correlation analysis showed that rice yield positively related with ACL of 0—10 cm soil layer. The straw returning treatment was one of the most effective farming practices to improve soil organic carbon, and crop yield in Hanzhong basin. Full wheat straw returning to field with rotary tillage significantly increased soil carbon sequestration and rice yield under the wheat- rice rotation system.

Keywords: Hanzhong basin; rice-wheat or rice-rape rotation; straw returning; soil organic carbon; carbon storage; carbon sequestration efficiency

土壤有机碳库的变化与组分转化对全球碳素循环具有重要意义,藏碳于土是温室气体减排的潜力途径。土壤有机碳也是表征土壤肥力的敏感指标,是预警耕地质量变化的重要依据^[1]。近年来,土壤有机碳碳库的演变已成为国内外科学家研究的热点领域^[1-3]。随着我国现代农业的快速发展,集约化生产已成为其显著特点,在生产规模和效益不断增强的同时,土壤退化问题也日益凸显,尤其是土壤有机碳下降趋势愈来愈明显^[3]。如何增强土壤汇碳功能是维持全球碳素平衡及农业可持续发展的保障。耕作、施肥、秸秆还田等农业活动对农田土壤有机碳的影响较大^[4],有研究表明秸秆还田是我国农田土壤固碳速率增加的主导因素^[5]。秸秆还田后秸秆碳矿化速率及土壤有机碳累积、组分转化受气候条件、土壤类型、耕作制度、秸秆种类等不同而存在差异。当前针对北方旱地、南方双季稻田秸秆还田对土壤有机碳影响的研究较多^[3-6],而陕西南部水稻—油菜或水稻—小麦轮作系统中秸秆还田效应研究较为缺乏。汉中盆地是陕西省重要的粮油生产基地,也是南水北调中线工程水源涵养地,因此,探索提升耕地质量的有效措施对保障该地区粮油产量及一江清水送北京具有重要意义。汉中盆地以黄褐土型潜育性水稻土为主,质地黏重,土壤耕性差,长期水旱轮作处于氧化还原交替状态,形成了特殊的发生层,层段较为明显,因此,研究秸秆还田后不同土层固碳效应,旨在探索适宜当地生产和生态条件的秸秆还田方式,为完善该地区秸秆还田技术、提高土壤生产力以及保护生态环境提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省勉县汉中市农业科学研究所试验示范站(33°09′38″N, 106°54′56″E),海拔约 600 m,属易

湿润区,年均气温 14 ℃左右,年均降水量 800~1 000 mm,无霜期 260 d,≥10 ℃年积温为 4 480 ℃。供试土壤类型为黄褐土型潜育性水稻土。试验前土壤基本理化性质为 pH 5.19,有机质含量 18.8 g/kg,全氮含量 1.25 g/kg,全磷含量 0.95 g/kg,全钾含量 14.2 g/kg,速效磷含量 35.3 mg/kg,速效钾含量 78.9 mg/kg。

1.2 试验设计

于 2016 年 4 月开始试验,水稻季共设置 6 个处理,分别为小麦秸秆不还田(WSN)、小麦秸秆常规还田(WS)、小麦秸秆促腐还田(WSM)、油菜秸秆不还田(RSN)、油菜秸秆常规还田(RS)、油菜秸秆促腐还田(RSM),具体操作见表 1。水稻品种为中籼稻黄华占,于 2016 年 4 月 10 日育秧,5 月 30 日机械插秧,9 月 23 日收获。施肥量分别为 N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 105 kg/hm²,其中氮肥分移栽前基施、移栽后 5 d 追施、移栽后 10 d 追施,比例为 6:2:2,磷钾肥一次基施。肥料使用尿素(46%)、洋丰复合肥(14-15-16)、氯化钾(60%)。秸秆腐熟剂采用山东君德牌高活性秸秆腐熟剂(枯草芽孢杆菌,有效活菌数≥20 亿/g,使用量 30 kg/hm²)。

试验小区面积 0.12 hm²,东西长 80 m,南北宽 15 m,每个处理 0.36 hm²。为便于机械化作业,采用大区试验设计,随机排列,每个处理重复 3 次,3 个小区顺序排列。

1.3 项目测定与方法

水稻测产:每个处理按“S”形选取 5 个 5 m×5 m 的样方,单收脱粒后晒干称量测产。

2016 年 9 月水稻收获后,分 5 个层次(0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—25 cm)采集环刀样,每个小区采集 9 个样点,测定土壤容重后将同层次样品混合,作为该小区的混合样;剔除植物残体和其他杂物,

置于阴凉通风处摊晾干,粉碎,过 0.15 mm 筛备用。
2016 年 12 月进行土壤样品分析。土壤总有机碳
(TOC)采用重铬酸钾外加热法^[7]测定;活性有机碳

(LOC)采用 0.33 mol KMnO₄ 氧化—紫外分光光度
计法^[8]测定;非活性有机碳含量为总有机碳和活性有
机碳含量之差。

表 1 试验设计

秸秆类型	还田方式	田间操作
小麦	不还田(WSN)	小麦机械化收获,低留茬,将秸秆移出田块,施肥旋耕,机械插秧
	常规还田(WS):旋耕还田	小麦机械化收获,低留茬,撒施肥料后将留茬和秸秆旋入土壤(0—15 cm),机械插秧
	促腐还田(WSM):撒施秸秆腐熟剂、旋耕还田	小麦机械化收获,低留茬,将肥料和腐熟剂混匀撒施后秸秆旋入土壤(0—15 cm),机械插秧
油菜	不还田(RSM)	油菜机械化收获,将秸秆移出田块,施肥旋耕,机械插秧
	常规还田(RS):旋耕还田	油菜机械化收获,撒施肥料后将残茬和秸秆旋入土壤(0—15 cm),机械插秧
	促腐还田(RSM):撒施秸秆腐熟剂、旋耕还田	油菜机械化收获,将肥料和腐熟剂混匀撒施后留茬秸秆旋入土壤(0—15 cm),机械插秧

以小麦或油菜秸秆不还田处理的各土层碳含量
作为参考,计算碳库管理指数为:

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量/参考土壤
总有机碳含量

碳库活度(A)=活性有机碳含量/非活性有机
碳含量

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤
活度

碳库管理指数(CPIM)=碳库指数×碳库活度
指数×100=CPI×AI×100

活性有机碳有效率 $A_{LC}(\%)$ = 活性有机碳/总有
机碳×100

以油菜秸秆不还田处理为对照,参考蔡岸冬等^[9]
方法计算碳固持速率和碳固持效率土壤有机碳储量。

$$SOC_{stock} = SOC_{content} \times BD \times H \tag{1}$$

式(1)中: SOC_{stock} 和 $SOC_{content}$ 分别为土壤有机碳储量
(t/hm²)和有机碳含量(g/kg); BD 为土壤容重(g/
cm³); H 为土层厚度,本研究中为 0.25 m。

$$\Delta SOC_{stock} = SOC_{stock-t} - SOC_{stock-c} \tag{2}$$

$$SOC_{SR} = \frac{\Delta SOC_{stock}}{n} \tag{3}$$

$$SOC_{SE} = \frac{\Delta SOC_{stock}}{C_{stock-t} - C_{input-c}} \tag{4}$$

式(2)~(4)中: $SOC_{stock-t}$ 、 $SOC_{stock-c}$ 和 ΔSOC 分别为
各处理下的有机碳储量、对照有机碳储量和储量增加
量; SOC_{SR} 、 SOC_{SE} 分别为土壤固碳速率和固碳效率; n
代表外源有机碳输入的年份; $C_{input-t}$ 和 $C_{input-c}$ 分别为
处理和对照的有机碳输入量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图,
采用 DPS 7.05 统计分析软件对数据进行方差分析
及差异显著性检验(LSD法, $P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 油菜、小麦秸秆还田对稻田土壤容重的影响

土壤容重是反映土壤质量的重要物理指标之一,
改善稻田土壤黏重的质地是提高其综合生产力的重
要措施。从表 2 可以看出,油菜和小麦秸秆还田显著

降低 0—5 cm 土层的土壤容重,较秸秆不还田处理容
重降幅分别为 17.7%和 5.5%;油菜秸秆还田显著降
低 0—25 cm 各土层的土壤容重,小麦秸秆还田对 5
cm 以下土层土壤容重影响较小;0—25 cm 各土层不
同处理土壤容重变化趋势较为一致,均表现为随着土
层深度的增加土壤容重呈明显增加趋势。秸秆还田
对 0—15 cm 土层土壤容重影响较大,对 15 cm 以下
土层土壤容重的影响较小,这可能是由于土壤深层没
有土壤扰动和植物残体的输入。

表 2 不同秸秆还田处理对土壤容重的影响

单位:g/cm³

处理	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—25 cm
RSN	1.24b	1.40a	1.68a	1.72a	1.79a
RS	1.02e	1.32bc	1.36e	1.63c	1.71b
RSM	1.18d	1.29c	1.51d	1.72a	1.77a
WSN	1.27a	1.35b	1.56b	1.72a	1.78a
WS	1.21c	1.32b	1.55bc	1.70b	1.73b
WSM	1.20c	1.34b	1.52cd	1.69b	1.73b

注:表中数字后不同小写字母表示相同土壤层次不同处理间差异
显著($P<0.05$)。下同。

2.2 油菜、小麦秸秆还田对稻田土壤总有机碳的影响

从图 1 可以看出,不同处理土壤总有机碳
(TOC)含量均随土层深度的增加依次降低,其变化
趋势表现为 0—5,5—10 cm 土壤有机碳含量较高,
10—15 cm 呈下降趋势,15—25 cm 仅为 0—5 cm 的
1/3。小麦秸秆还田稻田土壤有机碳增加更明显,0—
5 cm 两种秸秆还田不同处理有机碳均显著高于不还
田处理,增幅为 16.9%~27.4%,而常规秸秆还田和
秸秆促腐还田两种处理间差异不显著;5—10 cm 小
麦常规秸秆还田(WS)有机碳含量最高,显著高于其
他处理,油菜秸秆还田不同处理间 TOC 含量差异不
显著,小麦秸秆还田较不还田 TOC 显著增加,增幅
为 7.4%~15.4%;10—15 cm 油菜秸秆常规还田
(RS)有机碳含量最高,较 RSN 增加 48.9%,小麦秸秆促
腐还田(WSM)次之,且显著高于其他处理,较 WSN 增
加 32.9%;15—20,20—25 cm 均表现为小麦秸秆常规还
田(WS)有机碳含量最高,且显著高于其他处理,增幅分
别为 8.8%~62.9%和 7.4%~66.7%。

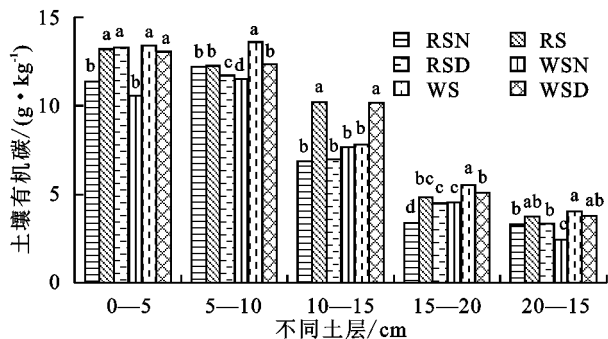


图 1 不同秸秆还田处理对 0—25 cm 土壤有机碳的影响

不同处理土壤碳储量总体的变化趋势为 5—10 cm>0—5 cm>10—15 cm>15—20 cm>20—25 cm (图 2),各土层中 15—20 cm 碳储量最低。0—15 cm 土层 SCS 占 0—25 cm 碳储量的 66%以上,说明试验区稻田耕层土壤碳主要储存于 0—15 cm,同一层次小麦秸秆还田更有利于土壤碳储量的提高;0—25 cm 小麦秸秆还田(WS)碳储量最高,达 $35.17 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$,其次是小麦秸秆促腐还田(WSD),二者差异不显著,但均显著高于其他处理,其中小麦秸秆不还田处理最低。小麦秸秆常规还田(WS)和促腐还田(WSM)碳储量较 WSN 处理分别提高了 23.5%和 21.9%,油菜秸秆常规还田(RS)和促腐还田(RSM)碳储量较 RSN 处理分别提高了 6.7%和 1.7%。

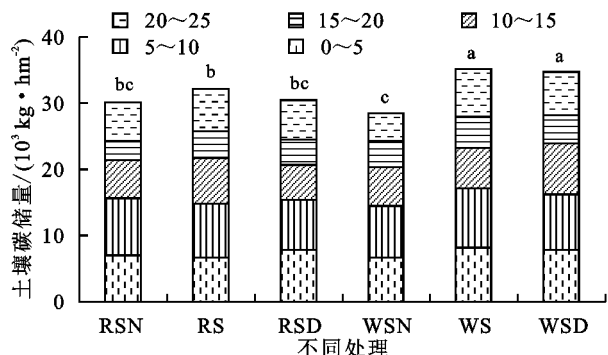


图 2 不同秸秆还田处理对 0—25 cm 土壤有机碳储量的影响

油菜和小麦秸秆不还田处理中有机碳输入主要来源于残留的根茬。从表 3 可以看出,以油菜秸秆不还田处理(RSN)为对照计算各处理的固碳效率,小麦秸秆还田(WS)和小麦秸秆促腐还田(WSD)土壤固碳速率和固碳效率均显著高于油菜秸秆还田处理;小麦秸秆还田(WS)固碳速率和固碳效率最大分别为 $6.62 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 4.36%,分别是 WSD、RS、RSD 的 1.26 倍和 1.20 倍、4.24 倍和 6.23 倍、4.63 倍和 6.81 倍。小麦秸秆不还田与油菜秸秆不还田相比,碳的矿化作用高于固持作用,秸秆还田和秸秆促腐还田土壤固碳效率相近。

2.3 油菜、小麦秸秆还田对稻田活性有机碳及其效率的影响

土壤活性有机碳(LOC)是预测土壤肥力演变的

重要指标。从表 4 可以看出,LOC 变化趋势同 TOC 一致,即 LOC 含量均随土层深度的增加依次降低。总体而言,5 个土层均表现为与秸秆不还田相比,常规秸秆还田和秸秆促腐还田活性有机碳含量显著增加。0—5, 5—10 cm 土层小麦秸秆促腐还田(WSM)处理 LOC 含量较高,较小麦秸秆不还田增幅分别为 56.3%和 35.6%,较油菜秸秆不还田增幅分别为 80.5%和 58.8%。10—15 cm 土层小麦秸秆常规还田(WS)处理 LOC 含量最高,较 WSN 和 RSN 增幅分别为 66.9%和 82.9%。15—20,20—25 cm 土层 LOC 含量最高的分别是油菜秸秆促腐还田(RSM)和油菜秸秆常规还田(RS),且显著高于其他处理,较油菜不还田增幅分别为 116.4%和 97.5%,较小麦秸秆不还田增幅为 155.9%和 229.2%。

表 3 不同秸秆还田处理对 0—25 cm 土层土壤固碳效率的影响

处理	有机碳输入量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	固碳速率/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	固碳 效率/%
RSN(CK)	0.23	0	0
RS	2.46	1.56c	0.70b
RSD	2.46	1.43c	0.64b
WSN	0.24	—	—
WS	1.68	6.62a	4.36a
WSD	1.68	5.26b	3.62a

注:以油菜秸秆不还田处理(RSN)为对照处理计算固碳效率,小麦根冠比 0.14,油菜根冠比 0.092,一表示负值。

从表 4 还可看出,不同处理对不同土层活性有机碳效率的影响差异较大。与秸秆不还田相比,各土层常规秸秆还田和秸秆促腐还田处理活性有机碳有效率显著增加。0—5 cm 和 5—10 cm 土层小麦秸秆促腐还田(WSM)处理 A_{LC} 均为最高,且显著高于其他处理,油菜秸秆不还田处理最低。油菜秸秆 0—5 cm 和 5—10 cm 土层油菜秸秆常规还田(RS)活性有机碳效率高于油菜秸秆促腐还田(RSM),但差异不显著,而 10—15,15—20,20—25 cm 则表现为 RSM 活性有机碳效率高于 RS 处理;小麦秸秆 0—5 cm 和 5—10 cm 土层 WSM 活性有机碳效率显著高于 WS,而 10—15,15—20,20—25 cm 表现为 WS 处理活性有机碳效率高于 WSM 处理,但差异不显著。

2.4 油菜、小麦秸秆还田对稻田土壤碳库管理指数的影响

不同处理对土壤碳库管理指数的影响见表 5。0—10 cm 土层均以小麦秸秆促腐还田(WSM)处理土壤碳库管理指数最高,且显著高于其他处理;10—15,15—20,20—25 cm 土壤碳库管理指数最高的依次为小麦秸秆常规还田(WS)、油菜秸秆促腐还田(RSM)、小麦秸秆促腐还田(WSM),表明小麦秸秆还田有利于提高 0—15 cm 土层土壤碳库管理指数,油菜秸秆还田有利于提高 15—25 cm 土层土壤碳库管理指数。

表 4 不同秸秆还田处理对土壤活性有机碳含量(LOC)及其效率(A_{LC})的影响

处理	LOC/(g·kg ⁻¹)					A _{LC} /%				
	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—25 cm	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—25 cm
RSN	2.46e	1.99c	1.35b	1.10e	0.80d	21.63c	16.26e	19.61b	32.45c	24.71cd
RS	3.62b	2.23b	2.12a	1.97b	1.58a	27.37b	18.27d	20.84b	40.53b	42.24a
RSM	3.31c	1.97c	2.14a	2.38a	0.96c	24.99b	16.77de	30.68ab	52.99a	28.67bc
WSN	2.84d	2.33b	1.48b	0.93f	0.48e	24.81b	20.26c	19.32b	20.60d	20.18d
WS	3.33bc	3.12a	2.47a	1.72c	1.19b	26.99bc	22.92b	36.19a	31.42c	29.47bc
WSM	4.44a	3.16a	2.28a	1.51d	1.19b	34.01a	25.63a	22.38ab	29.77c	31.63b

注:LOC 为活性有机碳;A_{LC}为活性有机碳效率。下同。

表 5 不同秸秆还田处理对土壤碳库管理指数(CPMI)的影响

处理	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—25 cm
RSN	1.00c	1.00c	1.00b	1.00d	1.00b
RS	1.62ab	1.16b	1.62ab	2.03b	2.59a
RSM	1.43b	1.04c	1.97a	3.10a	1.27b
WSN	1.00c	1.00c	1.00b	1.00d	1.00b
WS	1.14c	1.39a	2.27a	2.16b	2.79a
WSM	1.73a	1.45a	1.61ab	1.84c	2.93a

2.5 不同土层土壤有机碳与水稻产量之间的相关性分析

不同处理水稻产量差异性见图 3。小麦秸秆促腐还田(WSM)产量最高,与小麦秸秆常规还田(WS)外相比,差异不显著,但显著高于其他处理,WSM 较 WSN 增产 14.2%,较 RSN 增产 41.5%,差异均达显著水平。油菜—水稻轮作体系中,油菜秸秆促腐还田(RSM)水稻产量最高,较不还田(RSN)增产显著,增幅 19.8%,较常规还田(RS)增产 11.3%,但差异不显著。总体而言,小麦秸秆还田较油菜秸秆还田更有利于水稻增产。

从表 6 可以看出,水稻产量与 LOC_{0—5}、A_{LC0—5}、

LOC_{5—10}、A_{LC5—10} 及 CPMI_{5—10} 显著正相关,且与 A_{LC} 相关性更高,说明 0—10 cm 土壤活性有机碳效率对水稻产量影响较大。0—5 cm 土层 LOC 与 0—15 cm 各土层有机碳指标呈显著相关,除 TOC_{5—10}、A_{LC10—15}、CPMI_{10—15} 之外;5—10 cm 土层 CPMI 与水稻产量、0—5,5—10 cm 土层 LOC、A_{LC}、TOC、CPMI 显著相关;10—15 cm 土层 LOC、TOC 与 0—5 cm 及 5—10 cm 土层相关有机碳指标显著相关,CPMI 仅与 10—15 cm LOC、A_{LC} 显著相关。

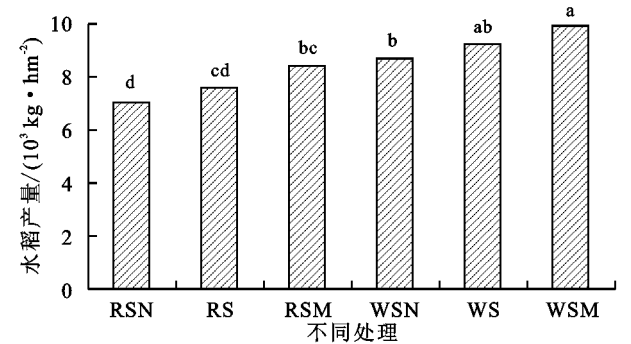


图 3 不同处理下的水稻产量

表 6 0—15 cm 土层土壤有机碳库与水稻产量之间的相关性分析

指标	产量	0—5 cm				5—10 cm				10—15 cm			
		LOC	TOC	A _{LC}	CPMI	LOC	TOC	A _{LC}	CPMI	LOC	TOC	A _{LC}	CPMI
产量	1												
LOC _{0—5}	0.55 *	1											
TOC _{0—5}	0.04	0.58 **	1										
A _{LC0—5}	0.65 **	0.87 **	0.10	1									
CPMI _{0—5}	0.20	0.79 **	0.68 **	0.54 *	1								
LOC _{5—10}	0.63 **	0.64 **	0.33	0.58 **	0.26	1							
TOC _{5—10}	-0.04	0.12	0.43	-0.12	0.08	0.58 **	1						
A _{LC5—10}	0.75 **	0.71 **	0.21	0.73 **	0.28	0.94 **	0.28	1					
CPMI _{5—10}	0.46 *	0.72 **	0.54 *	0.54 *	0.51 *	0.90 **	0.60 **	0.82 **	1				
LOC _{10—15}	0.26	0.64 **	0.71 **	0.35	0.53 *	0.59 **	0.53 *	0.47 *	0.68 **	1			
TOC _{10—15}	0.24	0.65 **	0.39	0.55 *	0.58 **	0.39	0.10	0.47 *	0.48 *	0.36	1		
A _{LC10—15}	0.05	0.05	0.27	-0.09	-0.03	0.26	0.51 *	0.09	0.25	0.55 *	-0.54 *	1	
CPMI _{10—15}	0.16	0.35	0.43	0.18	0.13	0.35	0.40	0.24	0.37	0.76 **	-0.14	0.82 **	1

注: *、* * 分别表示相关性在 0.05、0.01 水平上显著(n=18)。

3 讨论

3.1 秸秆还田对稻田不同土层土壤有机碳库的影响

本研究结果表明,小麦和油菜秸秆还田下稻田土壤总有机碳、活性有机碳、土壤碳储量、土壤碳库管理指数均显著高于秸秆不还田处理,说明秸秆还田对稻田土壤碳库相关指标的增加有重要贡献,这与胡乃娟等^[1]在南

方水田进行的秸秆还田对土壤有机碳含量影响的研究结果一致;但秸秆还田使 0—25 cm 不同土层土壤有机碳增加幅度,由于土壤有机碳含量容易受到土壤质地、气候、秸秆类型、生物量以及耕作方式等因素而存在较大差异。蔡太义等^[6]研究了玉米秸秆还田对渭北旱塬壤土有机碳的影响表明,秸秆还田显著提高 0—20 cm 土壤有机碳含量。本研究中小麦秸秆还田有利于 0—15

cm 土层土壤有机碳的提高,油菜秸秆还田有利于 15—25 cm 土层有机碳的增加,秸秆类型间的差异可能是因为本研究中土壤较为黏重,分层较为明显,小麦秸秆还田集中在 0—15 cm 土层,而油菜根系较小麦发达,深层根茬量较大有利于深层土壤有机碳的积累。从提高本地区土壤有机碳来看,小麦、水稻、油菜交替式水旱轮作体系较单一稻麦或稻油轮作更有利于土壤耕层有机碳的积累,一方面可能是由于前者轮作系统土壤微生物较为丰富,另一方面秸秆根茬全方位进入耕层有利于土壤碳素的矿化与固持,但这方面的研究仍需进一步深入进行。

本研究表明土壤总有机碳、活性有机碳从土壤表层到底层依次降低,且有机碳主要集中在 0—15 cm。李硕等^[4]研究了关中平原麦玉轮作体系中秸秆还田对土壤有机碳的影响结果表明麦玉秸秆还田土壤有机碳主要集中于 0—20 cm,这可能因土壤类型、耕作方式、还田方式、秸秆种类等因素不同而引起的差异。

3.2 秸秆常规还田与促腐还田对 0—25 cm 容重及土壤有机碳库的影响

秸秆还田是降低表层土壤容重并作为改良黏重质地的有效措施。本研究中小麦或油菜秸秆还田处理均显著降低了 0—15 cm 土壤容重,这与胡宏祥等^[10]油菜秸秆还田显著降低 0—20 cm 土层容重而对 20 cm 以下土层影响相对较小研究结果一致,主要是因为本研究中浅旋耕秸秆还田后与 0—15 cm 土层土壤混合较为均匀。

添加秸秆腐熟剂是加速秸秆腐解的重要措施之一^[11]。已有研究证实,秸秆促腐还田可以加速秸秆腐解进程,提高土壤微生物活性,改善土壤养分状况和增加作物产量^[12-13]。本研究中就小麦秸秆而言,与秸秆不还田(WSN)相比,常规还田(WS)和促腐还田(WSM)均有利于增加 0—25 cm 土层有机碳,增幅度分别为 23.6%和 21.9%;就油菜秸秆而言,与秸秆不还田(WSN)相比,常规还田(WS)和促腐还田(WSM)增加 0—25 cm 土层有机碳,增幅分别为 6.7%和 1.3%。秸秆不还田条件下,油菜茬口较小麦茬口有利于增加稻田 0—25 cm 土层有机碳,增幅为 5.7%。不同作物生产体系有机碳效率差异较大,秸秆还田是提高土壤汇碳功能的有效途径^[9],本研究中秸秆不还田条件下小麦茬口较油菜茬口稻田土壤碳矿化作用强,说明无秸秆投入的情况下,油菜—水稻轮作系统更有利于土壤表土有机碳的积累。秸秆还田条件下,小麦秸秆还田土壤固碳速率及固碳效率显著高于油菜秸秆还田,小麦—水稻轮作系统较油菜—水稻轮作更有利于稻田表土有机碳的积累。

本研究中秸秆促腐还田较常规还田对土壤有机

碳提升并未表现出优势,这一结果不同于相关研究,可能是因为秸秆促腐效应因腐熟剂种类^[14]、土壤性质、秸秆种类、轮作体系^[15]、气候条件差异性较大^[16]。马超等^[17]研究了小麦—玉米轮作体系中秸秆常规还田及促腐还田对砂姜黑土土壤有机碳的影响,结果表明秸秆促腐还田较常规秸秆还田更利于提高有机碳中活性组分含量及其有效率和土壤碳库管理指数。李继福等^[6]研究了麦秆还田配施不同腐秆剂对潜育性水稻土有机质的影响,表明不同腐秆剂处理小麦秸秆碳化速率存在差异。罗文丽等^[18]研究结果显示秸秆切碎+腐熟剂腐解速率高于秸秆原状+腐熟剂。汪季涛等^[19]研究表明油菜秸秆长度为 5 cm 时腐解较快,说明秸秆还田长度对促腐效果影响较大。陈帅等^[20]研究了腐秆剂用量对水稻秸秆腐解特征的影响,表明腐秆剂用量为还田秸秆质量的 1%时腐解较快。本研究中秸秆还田长度 15 cm 左右,小麦秸秆还田量约为 4 000 kg/hm²,油菜秸秆还田 6 000 kg/hm²,而秸秆腐熟剂使用量仅为 30 kg/hm²。可能是因为腐秆剂使用量偏低使得腐熟剂促腐效果不佳,促腐还田优势不强所致。

3.3 不同土层有机碳组分与作物产量相关性分析

秸秆还田的增产作用在众多研究中已得到证实^[3,21]。本研究表明,小麦、油菜秸秆还田对常规水稻有增产作用,且小麦秸秆还田增产更明显。分析其原因可能在淹水条件下,油菜秸秆还田量相对较大,腐解速度较快,产生的有机酸易对苗期水稻产生毒害从而影响水稻的生长^[10]。

不同土层有机碳组分与作物产量相关性分析显示,水稻产量与 0—10 cm 土层有机碳显著相关,与活性有机碳效率(A_{LC})相关性更高,说明活性有机碳有效率可作为表征该研究区稻田土壤生产力的依据。

4 结论

(1)汉中盆地稻田土壤有机碳、活性有机碳含量随着土层深度的增加依次降低,具有明显的表聚现象,土壤碳主要储存于 0—15 cm 土层。

(2)小麦、油菜秸秆还田后,稻田土壤有机碳含量显著增加,0—15 cm 土层的容重显著降低。秸秆还田较不还田处理水稻产量显著提高,固碳速率及固碳效率显著增加。因此,秸秆还田是提高汉中盆地稻麦油轮作制下稻田土壤汇碳功能和水稻产量有效的农田管理措施。

(3)小麦秸秆还田处理后稻田土壤固碳速率及固碳效率显著高于油菜秸秆还田,小麦—水稻轮作系统较油菜—水稻轮作更有利于稻田表土有机碳的固持和水稻产量增加。

参考文献:

- [1] 胡乃娟,张四伟,杨敏芳,等. 秸秆还田与耕作方式对稻麦轮作农田土壤碳库及结构的影响[J]. 南京农业大学学报,2013,36(4):7-12.
 - [2] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, et al. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68(1): 402-409.
 - [3] 慈恩,王莲阁,丁长欢,等. 垄作免耕对稻田垅埂土壤有机碳累积和作物产量的影响[J]. 土壤学报,2015,52(3):576-586.
 - [4] 李硕,李有兵,王淑娟,等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1215-1222.
 - [5] 蔡太义,黄会娟,黄耀威,等. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 自然资源学报,2012,27(6):964-973.
 - [6] 李继福,鲁剑巍,李小坤,等. 麦秆还田配施不同腐秆剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(35):270-276.
 - [7] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
 - [8] 于荣,徐明岗,王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料,2005(2):49-52.
 - [9] 蔡岸冬,张文菊,申小冉,等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1431-1438.
 - [10] 胡宏祥,程燕,马友华,等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报,2012,20(3):297-302.
 - [11] 丁文成,李书田,黄绍敏. 氮肥管理和秸秆腐熟剂对¹⁵N标记玉米秸秆氮有效性及去向的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(14):2725-2736.
 - [12] 于建光,常志州,黄红英,等. 秸秆腐熟剂对土壤微生物及养分的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(3):563-570.
 - [13] 蔡立群,牛怡,罗珠珠,等. 秸秆促腐还田土壤养分及微生物量的动态变化[J]. 中国生态农业学报,2014,22(9):1047-1056.
 - [14] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等. 3种腐熟剂促进玉米秸秆快速腐解特征[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(5):432-436.
 - [15] 胡诚,陈云峰,乔艳,等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(1):59-66.
 - [16] 周桂香,陈林,张丛志,等. 温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J]. 土壤,2015,47(5):911-918.
 - [17] 马超,周静,刘满强,等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报,2013,50(5):915-921.
 - [18] 罗文丽,周柳强,谭宏伟,等. 水稻秸秆腐解规律及养分释放特征[J]. 南方农业学报,2014,45(5):808-812.
 - [19] 汪季涛,朱世东,胡克玲,等. 油菜秸秆适宜发酵条件研究[J]. 中国农学通报,2006,22(12):373-376.
 - [20] 陈帅,刘峙嵘,曾凯. 腐秆剂对水稻秸秆腐解性能的影响[J]. 环境工程学报,2016,10(2):839-844.
 - [21] 王淑兰,王浩,李娟,等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(5):1530-1540.
- (上接第288页)
- [8] 施泽升,续勇波,雷宝坤,等. 洱海北部地区不同施氮强度对水稻季稻田氨挥发的影响[J]. 土壤通报,2014,45(3):672-678.
 - [9] 朱坚,石丽红,田发祥,等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1129-1138.
 - [10] 李艳,唐良梁,陈义,等. 嘉兴地区稻田氨挥发及其影响因素的研究[J]. 中国土壤与肥料,2015(5):7-12.
 - [11] 陈振华,陈利军,武志杰,等. 辽河下游平原不同水分条件下稻田氨挥发[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2771-2776.
 - [12] 林超文,罗付香,朱波,等. 四川盆地稻田氨挥发通量及影响因素[J]. 西南农业学报,2015,28(1):226-231.
 - [13] 朱小红,马中文,马友华,等. 施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响[J]. 生态学报,2012,32(7):2119-2126.
 - [14] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社,2007:265-268.
 - [15] 吴萍萍. 不同施肥制度下红壤稻田氨挥发与氧化亚氮排放的研究[D]. 南京:南京农业大学,2008.
 - [16] 俞映惊,薛利红,杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(8):1682-1689.
 - [17] 周亮,荣湘民,谢桂先,等. 不同氮肥施用对双季稻稻田氨挥发及其动力学特性的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):143-147.
 - [18] 徐久凯,李絮花,李伟,等. 缓释尿素与普通尿素配施对氨挥发和土壤氮素动态变化过程的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(6):23-27.
 - [19] 朱坚,纪雄辉,石丽红,等. 稻田氨挥发及控制技术研究进展[J]. 湖南农业科学,2011(23):73-75.
 - [20] 王霞,崔键,周静. 典型红壤区稻田树脂包膜控释氮肥氨挥发研究[J]. 土壤,2011,43(1):56-59.