

郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 等. 秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 727–733.

GUO Rui-hua, JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, et al. Effects of returning patterns of straw to field on soil organic carbon and soil humus composition in rice-wheat double cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 727–733.

秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响

郭瑞华^{1,2}, 靳红梅^{1,2*}, 常志州^{1,2}, 王海候³, 孙小祥^{1,2,4}, 沈明星³, 陆长婴³

(1.江苏省农业科学院循环农业中心/江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 南京 210014; 2.农业部长江中下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3.江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215155; 4.盐城师范学院城市与规划学院, 江苏 盐城 224007)

摘要:通过9年水稻-小麦轮作田间定位试验,探讨南方稻麦两熟制农田秸秆还田模式对土壤有机碳(SOC)和腐植酸(HE)的影响。试验设置仅麦秆还田(W)、仅稻秆还田(R)、稻麦两熟均还田(RW)和秸秆均不还田(CK)共4个处理。结果表明,秸秆还田显著($P<0.05$)提高了0~10 cm土层SOC,对土壤总氮(TN)无明显影响;不同秸秆还田模式处理下,0~10 cm土层SOC及TN大小为 $W>RW>R>CK$;10~20 cm SOC及TN大小均为 $W>CK>RW>R$,但各处理之间的差异均不显著。秸秆还田处理中,0~10 cm土层土壤HE、富里酸(FA)和胡敏酸(HA)均低于CK,而在10~20 cm土层则高于CK。不同秸秆还田方式间,0~10 cm土层的HE、FA和HA以W处理为最高,其土壤腐殖化程度最大;而10~20 cm土层则以RW处理为最高,W处理的土壤腐殖化程度最小。相比其他秸秆还田模式,麦秸秆还田能更好地提高土壤表层有机碳含量和腐殖质品质。

关键词:秸秆还田;模式;有机碳;腐植酸;富里酸;胡敏酸

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)04-0727-07 doi:10.11654/jaes.2016-1364

Effects of returning patterns of straw to field on soil organic carbon and soil humus composition in rice-wheat double cropping systems

GUO Rui-hua^{1,2}, JIN Hong-mei^{1,2*}, CHANG Zhi-zhou^{1,2}, WANG Hai-hou³, SUN Xiao-xiang^{1,2,4}, SHEN Ming-xing³, LU Chang-ying³

(1.Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China; 2.Department of Agriculture Agricultural Environment Key Laboratory of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Plain, Nanjing 210014, China; 3.Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China; 4.Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: A 9-years field experiment was conducted in Suzhou, Jiangsu Province of China, to study the effects of returning patterns of straw to field on soil organic carbon(SOC) and humus composition in the Taihu Lake Region, a typical rice-wheat rotation region. Four returning patterns were operated, i.e., only wheat straw returning to field(W), only rice straw returning to field(R), both rice and wheat straw returning to field(RW) and no straw returning to field(CK). Soil samples from 0~10 cm and 10~20 cm soil layers were collected to analyze contents of SOC, total nitrogen(TN), humus acid(HE), fulvic acid(FA) and humic acid(HA). The results indicated that returning straw could significantly($P<0.05$) increase SOC contents in 0~10 cm soil layer, compared with that of CK, while no significant effects were found on TN contents. The contents of SOC and TN at 0~10 cm and 10~20 cm soil layers showed the orders of $W>RW>R>CK$ and $W>CK>RW>$

收稿日期:2016-10-27

作者简介:郭瑞华(1986—),女,河南周口人,硕士,研究实习员,主要从事农业废弃物资源化利用和环境影响评价研究。E-mail:ruizhongrui@163.com

*通信作者:靳红梅 E-mail:hmjin@jaas.ac.cn

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(12)1002]

Project supported: The Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund of Jiangsu Province, China[CX(12)1002]

R, respectively. However, no significant differences of SOC and TN contents were found between the three straw returning patterns at the two soil layers. Compared with CK, HE, FA and HA were lower at 0~10 cm soil layer of straw returning treatments; whereas they were higher than that in CK at 10~20 cm soil layer. The contents of HE, FA and HA were the highest in soils from W treatment, while those were highest in soils from RW treatment. The PQ value (HA/HE) in W treatment was the highest at 0~10 cm soil layer, while the lowest at 10~20 cm soil layer. The results from this study showed that only wheat straw returning to field was the best pattern to improve SOC content and the soil humus quality at 0~10 cm soil layer, compared with other straw returning patterns.

Keywords: straw returning; patterns; soil organic carbon; humus acid (HE); fulvic acid (FA); humic acid (HA)

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,以其作为肥料直接还田是当今秸秆资源利用的主要途径^[1~2]。大量研究表明,秸秆还田在农业生态系统中发挥着重要的作用^[3~5],特别是秸秆还田后,土壤外源有机物投入的增加,不仅影响土壤有机碳(SOC)的活性和稳定性,而且能改变其组成与存在方式^[6]。

SOC 是土壤的重要组成部分,但 SOC 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 SOC 质量的变化^[1]。土壤腐殖质是有机物经过微生物分解后,再合成的一类组成和结构复杂的深色非均质化合物。它是 SOC 的重要组成部分^[7],在 SOC 的循环和转化中起到积极作用,在全球碳平衡中有着重要的影响^[8~10]。腐殖质可以通过改善土壤物理、化学及生物学性质来提高土壤自修复能力及肥力,胡敏酸(HA)是土壤腐殖质中的活跃物质,其变化与土壤的保肥和供肥性质密切相关^[11],对土壤养分循环和农业生态系统稳定平衡具有重要作用^[12~14]。

由于 SOC 和土壤腐殖质在土壤改良中的重要作用,二者在秸秆还田后的变化研究逐渐受到学者们的重视^[3,15]。已有研究表明,秸秆还田不仅可以增加土壤微生物碳,进而增加土壤碳库存量,还可以明显改善 SOC 的活性和质量^[16~19]。Henriksen 等^[20]研究报道,麦秸还田后发生激发效应,使土壤中矿物氮的含量显著增加,进而促进秸秆碳的矿化,提高 SOC 的含量。邹洪涛等^[15]研究发现秸秆还田后 SOC 增加,腐植酸(HE)含量下降,而富里酸(FA)、HA 及 HA 与 HE 的比值(PQ)都有所增加,土壤腐殖化程度加深;辛励等^[21]研究发现,长期定位条件下秸秆还田能明显提高 SOC 及腐殖质含量。进入土壤中有机物料的数量和种类是 SOC 数量和品质最直接和最主要的影响因子之一^[22]。因此,研究不同秸秆还田模式下 SOC 和腐植酸含量的变化趋势,更有利于优化秸秆还田模式,平衡秸秆还田对农田土壤肥力提升正效应与环境风险物质增排负效应之间的矛盾。

稻麦两熟是我国长江下游地区农田的重要种植生产模式之一,也是江苏省最主要的粮食生产模式^[23]。稻麦两熟地区常规的秸秆还田模式主要有 3 种:仅麦秸稻季还田、仅稻秸麦季还田、秸秆稻麦季均还田。本文以苏南地区稻麦两熟制农区为研究对象,通过 9 年的田间定位试验,研究这 3 种秸秆还田模式对 SOC 和 HE 含量的影响,以期对稻麦两熟农区秸秆资源的合理利用与土壤培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江苏省苏州市现代农业(水稻)示范区(31°27'45"N, 120°25'57"E)。该地区属于北亚热带季风气候,年日照时数 3039 h,降雨量 1128 mm,平均温度 15.7 °C,有效积温(>10 °C) 4947 °C。秸秆还田模式定位试验始于 2007 年 6 月水稻生长季,试验土壤类型属壤质黄泥土。试验前,0~20 cm 耕层土壤 pH 6.1,容重 1.1 g·cm⁻³,SOC、总氮(TN)和总磷(TP)含量分别为 17.2、1.6、1.0 g·kg⁻¹,土壤速效磷和速效钾分别为 38.7、115.2 mg·kg⁻¹。种植制度主要实行夏水稻-冬小麦轮作。

1.2 供试材料

在 9 年秸秆还田试验中,水稻品种为常规粳稻苏香粳 1 号,5 月中旬播种,6 月下旬人工移栽,移栽规格为行距 23.3 cm、株距 13.3 cm,每穴 3 苗,10 月 28 日左右收获。小麦品种为扬麦系列(2008—2010 年为扬麦 19 号,2011—2016 年为扬麦 22 号),在上茬水稻收获前 10 d 左右套播,播种量为 150 kg·hm⁻²,5 月底收获。还田秸秆为试验田上茬收获的作物秸秆,水稻生产季的麦秸(碳含量约为 46.5%、氮含量约为 0.48%)还田量约为 4.5 t·hm⁻²、小麦生产季的稻秸(碳含量约为 42.3%、氮含量约为 0.72%)还田量约为 6.0 t·hm⁻²。稻麦秸秆还田前机械粉碎均为 5~10 cm。

1.3 试验处理

试验设置 3 种秸秆还田模式处理,即仅麦秸稻季

还田(W)、仅稻秸麦季还田(R)、稻麦季秸秆均还田(RW);同时设置对照处理,即稻麦季秸秆均不还田(CK)。每个处理3次重复,小区面积32.5 m²(6.5 m×5.0 m)。

1.4 田间管理

不同还田模式连续9年处理的秸秆还田方式:麦秸稻季旋耕还田(旋耕深度约13 cm)、稻秸麦季免耕覆盖还田。水稻季氮肥(纯氮)、磷肥(五氧化二磷)和钾肥(氧化钾)用量分别为225、90、180 kg·hm⁻²,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3施用,磷肥一次性基施,钾肥作基肥和穗肥施用,每次50%,分蘖肥和穗肥分别于6月27日、8月6日前后施用。水稻生长期水分管理采用前期浅水(移栽至7月25日)、中期烤田(7月26日至8月9日)、后期干湿交替(8月10日至收获前15 d)的管理模式,其他田间管理措施同一般高产大田。小麦季氮肥(纯氮)、磷肥(五氧化二磷)和钾肥(氧化钾)用量分别为180、90、120 kg·hm⁻²,氮肥按基肥:越冬肥:拔节返青肥=5:3:2施用,磷钾肥一次性基施,越冬肥和拔节返青肥分别于1月15日、3月5日前后施用。小麦生长期田间管理措施同一般高产大田。各处理9年的施肥量及肥料运筹均相同。

1.5 样品采集与测定

1.5.1 土壤样品采集

于2016年5月底小麦收获后,每个小区按“S”形分别采集0~10 cm、10~20 cm土层土壤,混匀之后风干、研磨并过100目筛,密封干燥保存备用。

1.5.2 指标测定

土壤pH用pH计电位法测定(土:水=1:5);利用环刀法测定土壤容重^[24];SOC采用K₂Cr₂O₇氧化外加热法测定;土壤TN用半微量凯氏定氮法测定^[24]。

土壤HE及其组分的测定:称取3 g土样,取浓度均为0.1 mol·L⁻¹的Na₄P₂O₇和NaOH的混合液20 mL作为浸提液,机械振荡24 h后4000 r·min⁻¹离心过滤,再用15 mL浸提液重复上述步骤两次,将所有离心后的上清液混合均匀,取部分过0.45 μm滤膜,用TOC仪(multi N/C 3100,德国)测HE碳含量;另取20 mL上清液,用2.5 mol·L⁻¹ HCl酸化至pH=1.5,将酸化了的混合液离心,离心管中沉淀即为HA,上清液即为FA,将上清液过0.45 μm滤膜,用TOC仪测FA碳含量,HA碳含量即为HE碳含量与FA碳含量的差值。

1.6 数据处理与分析

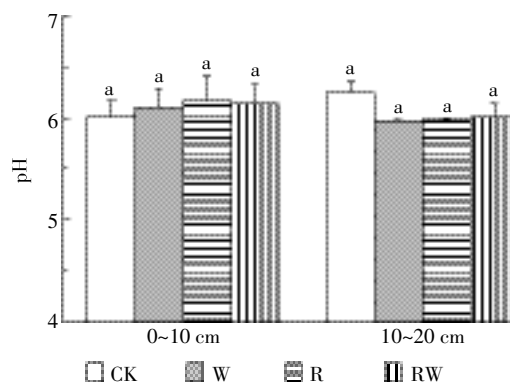
各理化指标在不同秸秆还田模式处理间的差异

采用单因素方差分析(ANOVA)。试验数据整理采用Microsoft Excel 2010完成,统计分析采用SPSS 20.0,作图采用Origin 8.5完成。

2 结果与讨论

2.1 秸秆还田模式对土壤pH的影响

土壤pH是土壤的基本理化指标,直接或间接影响土壤结构、土壤生物活性和植物生长等,进而影响土壤肥力。各处理不同土层土壤pH特征详见图1。与CK处理相比,秸秆还田对0~10 cm、10~20 cm土层土壤pH均无显著影响。但从整体上看,秸秆还田有提高0~10 cm土层土壤pH的趋势,各处理间大小为R>RW>W>CK,前三者分别比CK处理高0.17、0.14、0.10个单位;而在10~20 cm土层,秸秆还田有降低土壤pH的趋势,各处理间大小为CK>RW>R>W,后三者分别比CK处理低0.24、0.27、0.29个单位。



CK为稻麦季秸秆均不还田;W为仅麦秸稻季还田;R为仅稻秸麦季还田;RW为稻麦季秸秆均还田。不同小写字母表示同一土层不同秸秆还田模式处理差异显著($P<0.05$)。下同
CK indicated no straw returning to field; W indicated wheat straw returning to field; R indicated rice straw returning to field; RW indicated both rice and wheat straw returning to field. Different small letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同秸秆还田模式下的土壤pH

Figure 1 pH values of soils under different straw returning patterns

2.2 秸秆还田模式对土壤容重的影响

土壤容重是衡量土质疏松程度的指标之一,它影响土壤的孔隙度与孔隙度大小分配,以及土壤的穿透阻力,进而影响土壤水、肥、气、热条件与作物根系在土壤中的分布。本研究中秸秆还田模式对土壤容重的影响详见图2。在0~10 cm土层,土壤容重在处理间大小为CK>R>W>RW,且RW处理的土壤容重显著低于其他处理;在10~20 cm土层,各处理间土壤容

重差异不显著。这说明,在 0~10 cm 土层,秸秆还田处理土壤容重相应减少,土壤表层相对蓬松,可能导致 HE 容易随雨水或灌溉不断地下渗到更深的土层,进而影响 SOC 及土壤质量。

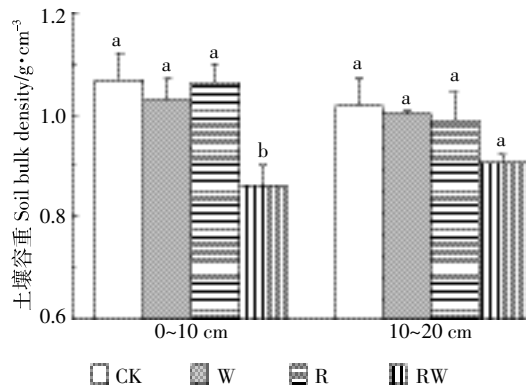


图2 不同秸秆还田模式下的土壤容重

Figure 2 Soil bulk density under different returning patterns of straw to field

2.3 秸秆还田模式对 SOC、TN 和 C/N 的影响

本研究中不同土层 SOC、TN 和 C/N 比详见图 3。结果显示,各处理 0~10 cm 土层 SOC 的大小为 W>RW>R>CK。秸秆还田显著($P<0.05$)提高了 0~10 cm 土层 SOC 含量,与已有研究结果一致^[25-26]。W、R 和 RW 处理与 CK 相比,增幅分别为 23.31%、17.02%、20.18%(图 3 A)。这主要是由于秸秆还田后腐解,为农田土壤提供大量的外源有机碳输入,从而提高土壤微生物量及其活性,进而增加 SOC 含量^[27]。但不同秸秆还田模式间 0~10 cm 土层 SOC 大小无显著差异。各处理 10~20 cm 土层 SOC 的大小为 W>CK>RW>R,与 CK 处理相比,W 处理 SOC 提高了 11.12%,而 RW 和 R 处理分别降低 2.81%、9.46%。但秸秆还田各处理间差异不显著(图 3 A)。可见,秸秆还田可显著增加 0~10 cm 土层的 SOC,主要与前期(8 年)连续秸秆还田向土壤中输入大量碳(W、R 和 RW 处理的碳累计输入量分别为 16.72、20.30、37.02 t·hm⁻²)有关。但秸秆输入量与 SOC 的含量并不成正比,W 处理反而更有利于 SOC 的累积。这可能因为 W 处理下,麦秸稻季还田后,在水稻田高温高湿及厌氧好氧的条件下,秸秆更容易腐解。具体原因有待深入研究。

各处理 0~10 cm 土层 TN 的大小顺序与同层 SOC 相同,但秸秆还田仅小幅增加了 0~10 cm 土层 TN 含量,与 CK 处理相比,W、R 和 RW 处理增幅分别为 1.92%、0.96%、1.91%(图 3 B)。各处理 10~20 cm 土

层 TN 的大小顺序与同层 SOC 相同。与 CK 处理相比,W 处理 TN 提高了 9.09%,而 RW 和 R 处理分别降低 2.27%、9.09%(图 3 B)。不同秸秆还田模式对 10~20 cm 土层 TN 的影响均不显著(图 3 B)。一方面,秸秆自身含有相当数量的氮元素,还田即可直接提高氮素供应^[28-29];另一方面,秸秆还田还可以通过促进固氮微生物的固氮作用,间接地增加土壤中的氮素含量^[30]。

土壤 C/N 比的变化会引起土壤微生物活性及矿化率变化,进而影响土壤质量和土壤碳氮循环。本研究结果显示,0~10 cm 土层土壤 C/N 大小为 W>R>RW>CK,与 CK 处理相比,前三者增幅分别为 9.90%、7.66%、7.04%,而 10~20 cm 土层土壤 C/N 大小为 CK>W>RW>R,与 CK 相比,后三者分别降低了

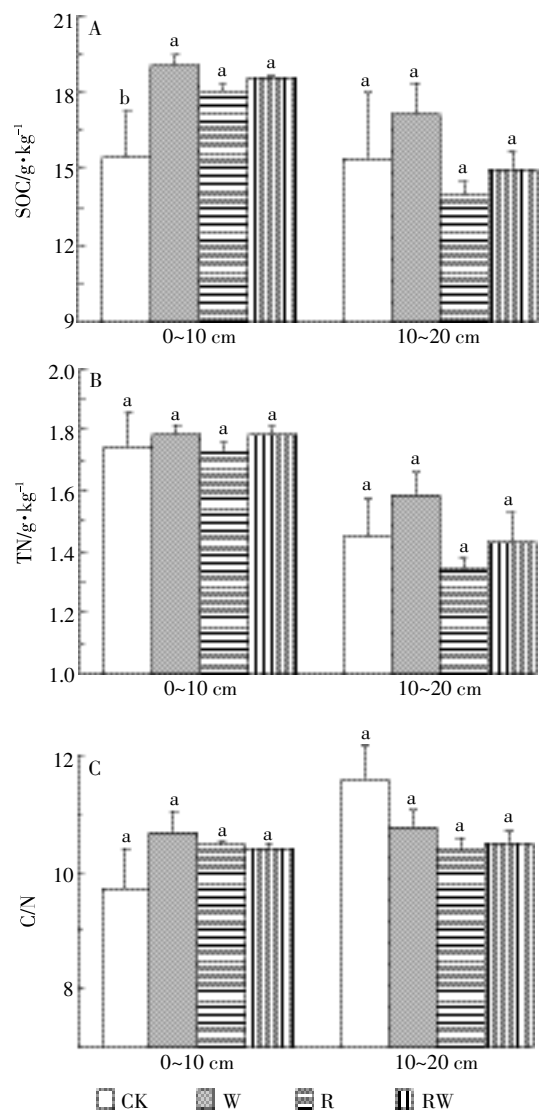


图3 不同秸秆还田模式下的 SOC、TN 和 C/N

Figure 3 SOC, TN and C/N under different returning patterns of straw to field

7.14%、9.44%、10.47%(图 3 C)。这主要与秸秆浅层还田方式有关,秸秆浅层还田后 SOC 主要集中在土壤浅层。

2.4 秸秆还田模式对农田土壤 HE 及其组分的影响

如图 4 所示,秸秆还田处理中,0~10 cm 土层土壤 HE、FA 及 HA 含量均低于 CK 处理,而在 10~20 cm 土层则相反。各处理 0~10 cm 土壤 HE 大小为 CK>W>RW>R,与 CK 相比,后三者分别降低了 12.77%、17.65%、18.98%;而 10~20 cm 土壤 HE 大小为 RW>W>R>CK,与 CK 相比,前三者分别增加了 32.40%、24.88%、14.07%(图 4 A)。秸秆还田之所以有利于 HE 在 10~20 cm 土层的积累,主要有两方面的原因:一是麦秸旋耕还田和稻秸免耕覆盖还田两种方式还田后,秸秆均主要集中在土壤表层,使土壤表层相对蓬松

(土壤容重较小),进而导致 HE 很容易随雨水或灌溉不断地下渗到更深的土层;另一方面可能和作物的根系分布及微生物的分布有关。相比 0~10 cm 土层,作物根系在 10~20 cm 土层的分布量更多,无论是秸秆输入的有机碳还是作物的根系分泌物,都会刺激土壤微生物的发展,进而促进有机碳的分解和 HE 的形成。不同秸秆还田方式之间,0~10 cm 表现为 W 处理的 HE 最高,而 10~20 cm RW 处理的 HE 最高,且 HE 与土壤 pH 值大小呈相反的趋势。这主要是因为,相比 R 处理,W 处理麦秸旋耕还田经过稻田水浸泡,高温高湿的环境使其更容易腐解;而与 RW 相比,后者的土壤由于还田秸秆量更多,土壤容重更低,土壤相对疏松,HE 更容易从 0~10 cm 土层淋溶到 10~20 cm 土层。

FA、HA 与 HE 趋势基本一致。不同还田模式 0~10 cm 土壤 FA 大小为 CK>RW>W>R,与 CK 相比,后三者土壤 FA 分别降低了 15.48%、16.75%、18.13%;而 10~20 cm 土壤 FA 大小为 W>RW>R>CK,与 CK 相比,前三者增幅分别为 40.89%、40.43%、20.25%(图 4 B)。HA 是土壤腐殖质中的活跃物质,其变化与土壤的保肥和供肥性质相关。不同还田模式 0~10 cm 土壤 HA 大小为 CK>W>RW>R,与 CK 相比,后三者分别降低了 9.67%、19.34%、19.64%;而 10~20 cm 土壤 HA 大小为 RW>W>R>CK,与 CK 相比,前三者分别增加了 26.91%、13.91%、9.98%(图 4 C)。

PQ 值为 HA 在 HE 中所占比例,反映有机质腐殖化程度的高低。由图 5 可知,在 0~10 cm 土层,不同秸秆还田模式 PQ 大小为 W>CK>R>RW,其中 W 比 CK 的 PQ 值高 3.67%,而 R、RW 处理比 CK 的 PQ 值分别降低 0.88%、3.22%;在 10~20 cm 土层,不同秸秆还田模式 PQ 大小为 CK>R>RW>W,与 CK 相比,后三者分别降低 3.10%、3.19%、8.21%(图 5)。这说明在 0~

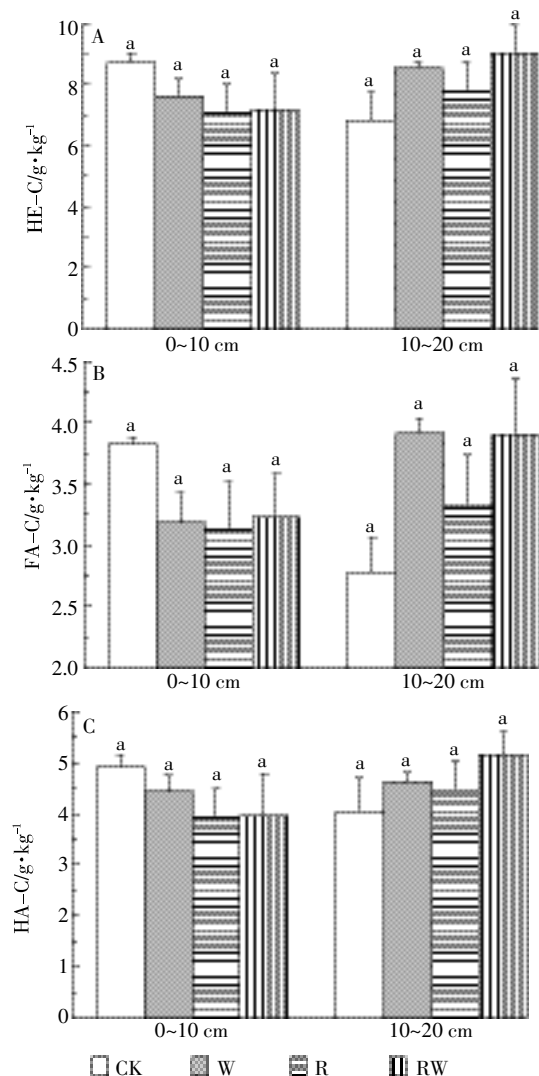


图 4 不同秸秆还田模式下的土壤 HE、FA 和 HA

Figure 4 Soil HE, FA and HA under different returning patterns of straw to field

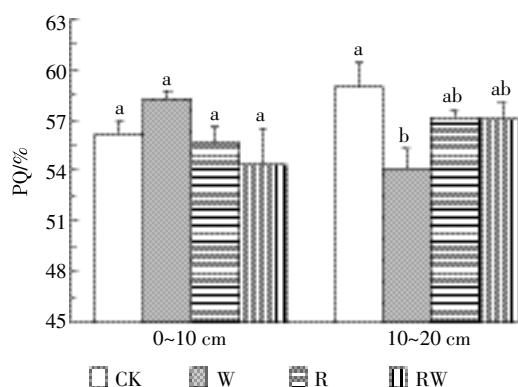


图 5 不同秸秆还田模式下的土壤 PQ 值

Figure 5 PQ under different returning patterns of straw to field

10 cm 土层, W 处理的土壤腐殖化程度最大; 而 10~20 cm 土层, W 处理的土壤腐殖化程度最小。这一方面可能因为麦秸稻季旋耕还田后, 经水浸泡, 在夏季高温高湿的环境中更容易腐解; 另一方面因为定位试验区属于黄泥土黏、闭的土壤环境, 麦秸稻季还田的旋耕深度约 13 cm, 相比 0~10 cm 被完全旋耕的土层, 10~20 cm 土层不利于土壤微生物对秸秆的降解^[31]。

3 结论

(1) 秸秆还田提高了 0~10 cm 土壤的 SOC 和 TN, 其中, 麦秸还田模式下 SOC 和 TN 均略高于其他秸秆还田处理。

(2) 秸秆还田对土壤 HE、FA 和 HA 的影响不显著, 但 0~10 cm 土层整体上表现为麦秸还田处理的 HE、FA 和 HA 含量及其土壤腐殖化程度最高; 而 10~20 cm 土层则表现为稻秸+麦秸均还田处理最高, 同时 10~20 cm 麦秸还田处理的土壤腐殖化程度最低。相比其他秸秆还田模式, 麦秸稻季还田能更好地提高土壤表层有机碳和腐殖质品质。

参考文献:

- [1] 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 Wen-tao, JIA Zhi-kuan, 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.
- [2] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [3] 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 En-he, WANG Han-ning, et al. Effects of continuous returning straw to maize tilth soil on chemical character and microbial biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 81-85.
- [4] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Sci Total Environ*, 2015, 532(1): 635-644.
- [5] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 稻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 Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, 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.
- [6] 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 Xu-dong, TIAN Xiao-hong. 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.
- [7] Vergnoux A, Guiliano M, Dirocco R, et al. Quantitative and mid-infrared changes of humic substances from burned soil[J]. *Environmental Research*, 2010, 111(2): 205-214.
- [8] 李 凯, 窦 森, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. 土壤学报, 2012, 47(3): 579-583.
LI Kai, DOU Sen, HAN Xiao-zeng, et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 47(3): 579-583.
- [9] Martinez C M, Alvarez L H, Celis L B, et al. Humus-reducing microorganisms and their valuable contribution in environmental processes[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(24): 10293-10308.
- [10] Andreas R, Zhang J. Characteristics of absorption interactions of cadmium(II) onto humin from peat soil in freshwater and seawater media[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 92(3): 352-357.
- [11] Shindo H, Yoshida M, Yamamoto A, et al. ¹³C values of organic constituents and possible source of humic substances in Japanese volcanic ash soils[J]. *Soil Science*, 2005, 170(3): 175-182.
- [12] Nichols K A, Wright S F. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(2): 215-220.
- [13] 王 晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 723-733.
WANG Jing, HE Zhong-jun, WANG Li-dong, et al. Properties of humus and content of soil aggregates in soils on Gaoligong mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 723-733.
- [14] 党亚爱, 李世清, 王国栋. 黄土高原典型区域土壤腐植酸组分剖面分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1820-1829.
DANG Ya-ai, LI Shi-qing, WANG Guo-dong. Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1820-1829.
- [15] 邹洪涛, 关 松, 凌 尧, 等. 秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1398-1402.
ZOU Hong-tao, GUAN Song, Ling Yao, et al. Effect of different straw return years on humus composition of soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1398-1402.
- [16] Potthoff M, Dyckmans J, Flessa H, et al. Dynamics of maize (*Zea mays* L.) leaf straw mineralization as affected by the presence of soil and the availability of nitrogen[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(7): 1259-1266.
- [17] Zhu L Q, Hu N J, Yang M F, et al. Effects of different tillage and straw return on soil organic carbon in a rice-wheat rotation system[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88900.
- [18] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw

- return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *CATENA*, 2015, 135: 283-289.
- [19] Zheng L, Wu W L, Wei Y P, et al. Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of Northern China[J]. *Soil Tillage Research*, 2015, 145: 78-86.
- [20] Henriksen T M, Breland T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(8): 1121-1134.
- [21] 辛 励, 刘锦涛, 刘树堂, 等. 长期定位条件下秸秆还田对土壤有机碳及腐殖质含量的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 218-223.
- XIN Li, LIU Jin-tao, LIU Shu-tang, et al. The effect of long-term straw returning treatments on soil organic carbon and humus content[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(1): 218-223.
- [22] 王 娇, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对有机肥矿化及土壤活性有机质含量影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 37-41.
- WANG Jiao, ZHANG Yu-long, ZHANG Yu-ling, et al. Effects of different irrigation patterns on mineralization of organic manure carbon and contents of soil labile organic matter[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1): 37-41.
- [23] 杨建昌, 杜 永, 刘 辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1611-1621.
- YANG Jian-chang, DU Yong, LIU Hui. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1611-1621.
- [24] 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 for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [25] 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.
- CAI Tai-yi, HUANG Hui-juan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different rates of straw mulching and returning to field on soil labile organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 964-973.
- [26] 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.
- [27] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(2): 303-322.
- [28] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(1): 68-77.
- YANG Xian-long, LU Yong-li, TONG Yan-an, et al. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 19(1): 68-77.
- [29] 陈 金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 160-167.
- CHEN Jin, TANG Yu-hai, YIN Yan-ping, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 160-167.
- [30] 孙海国, 雷浣群. 植物残体对土壤结构性状的影响[J]. 生态农业研究, 1998, 6(3): 39-41.
- SUN Hai-guo, LEI Huan-qun. Effects of plant residues on soil structure[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1998, 6(3): 39-41.
- [31] 李秋梅, 陈新平, 张福锁, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 152-156.
- LI Qiu-mei, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 152-156.