

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.

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

董珊珊, 窦 森*

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要:为研究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,以吉林农业大学微区试验田黑土为研究对象,设置CK(未施用秸秆)、C1(秸秆浅施)和C2(秸秆深还)共3种处理,通过腐殖质组成修改法提取富里酸(Fulvic acid, FA)、胡敏酸(Humic acid, HA)和胡敏素(Humin, HM),IHSS方法提取HA样品,并测定其元素组成、红外光谱和差热性质等结构性质。结果表明:秸秆还田有利于土壤和各腐殖质组分有机碳含量提高,土壤腐殖质PQ值(HA在可提取腐殖质中所占的比例)显著增加;与CK相比,C1处理表层(0~20 cm)的SOC、HA、FA和HM有机碳含量明显增加,分别增加了21.8%、27.3%、11.5%和30%;C2处理亚表层(20~40 cm)的SOC、HA、FA和HM有机碳含量显著增加,分别增加了26.3%、32%、13.4%和31.9%。C1和C2处理均使HA的氧化度、缩合度和热稳定性降低,脂族链烃和芳香碳含量增加,结构趋于简单化。这些变化在C1处理中主要体现在表层,与CK相比,C1处理表层HA的(O+S)/C比值降低了11.3%, I_{2930}/I_{1630} 的比值增加了23.4%;C2处理主要为亚表层HA结构的变化,与CK相比,C2处理亚表层HA的(O+S)/C比值降低了9.1%, I_{2920}/I_{1630} 的比值增加了23%。这一研究结果对阐明土壤培肥机理和指导秸秆还田实践有重要意义。

关键词:玉米秸秆;不同还田方式;土壤有机碳组成;结构特征

中图分类号:X712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)02-0322-07 doi:10.11654/jaes.2016-1131

Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil

DONG Shan-shan, DOU Sen*

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The practice of corn stover application to soil is an important measure to improve soil fertility and increases soil organic matter. However, the influence of different ways of corn stover application on humus composition and humic acid structural characteristics in soil is not well understood. The black soil of micro area corn field at the Jilin Agricultural University was taken as the research object, and three treatments were set as follows: CK (No corn stover incorporated), C1 (corn stover incorporated to shallow layer), C2 (corn stover deep incorporation). Fulvic acid (FA), humic acid (HA) and humin (HM) were extracted by the modified humus component method, and purified HA was prepared by IHSS method, and to measure its structural properties of element composition, infrared spectroscopy and differential thermal property. As the results show: Corn stover application to soil improved the organic carbon contents of soil humic components significantly, PQ values of soil humus (the ratio of HA proportion in extractable humus) increased significantly. compared with CK, the C1 treatment of SOC, HA, FA and HM in the surface soil (0~20 cm) significantly increased by 21.8%, 27.3%, 11.5% and 30% respectively, The C2 treat-

收稿日期: 2016-09-01

作者简介: 董珊珊(1993—),女,硕士研究生,从事土壤有机质研究。E-mail: 781344914@qq.com

*通信作者: 窦 森 E-mail: dousen1959@126.com

基金项目: 吉林省秸秆综合利用平台项目(2014C-1);国家自然科学基金项目(41571231);国家重点研发计划项目(2016YFD0200304)

Project supported: The Jilin Provincial Straw Platform for Comprehensive Utilization, China (2014 C-1); The National Natural Science Foundation of China (41571231); National Key Research Projects of China (2016YFD0200304)

ment of SOC, HA, FA and HM in the subsurface soil (20~40 cm) significantly increased by 26.3%, 32%, 13.4% and 31.9% respectively. It was found that C1 and C2 treatments could reduce the condensation degree, oxidation degree and thermal stability of HAs, increase the content of aromatic-C and aliphatic chain hydrocarbon, and make HA simpler in structure. These changes were representative in surface soil for the HA of C1 treatment, compared with CK, the (O+S)/C ratio decreased by 11.3%, the aliphatic-C/aromatic-C ratio (2920/1620) increased obviously by 23.4%. On the other hand, for the HA of C2 treatment, above changes mainly appeared in subsurface soil, the (O+S)/C ratio was 9.1% lower than CK, the aliphatic-C/aromatic-C ratio (2920/1620) significantly increased by 23% compared with CK. It has great significance to clarify the mechanism of improving soil fertility and to guide the practice of corn stover application to soil.

Keywords: corn stover; different application ways; soil organic C composition; structural characteristics

土壤有机碳是土壤碳库的重要组成部分,对土壤物质能量循环起关键作用,是评价土壤质量和土地可持续发展的重要指标,其组成和结构变化直接影响土壤性质与肥力的改变^[1]。实践证明,秸秆还田是实现土壤固碳和农田温室气体(CO₂)减排最简单、可行的秸秆利用措施,能有效改善土壤理化性状,提高农田蓄水保墒能力,增加土壤有机质含量和作物产量,对土壤碳库的形成转化产生重要影响^[2-3]。

目前对于秸秆还田的研究多集中于比较秸秆覆盖和浅施对土壤结构^[4-6]、微生物活性^[7]和有机碳含量^[8-9],及秸秆深还对于土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响^[10]。Hammerbeck 等^[4]和赵红等^[5]研究表明:秸秆覆盖能提高团聚体稳定性,改善土壤结构,降低土壤紧实度。Spaccini 等^[6]对比试验表明,稻秆浅施比稻秆覆盖更能提高土壤结构的稳定性。Giacomini 等^[7]研究表明,秸秆与土壤混合比覆盖处理更有利于土壤微生物繁殖和提高土壤活性有机碳含量。刘玲等^[8]和郑立臣等^[9]研究表明,秸秆粉碎还田方式下土壤微生物对秸秆的腐殖化作用更强,对土壤有机碳、全氮和微生物碳氮含量贡献最大,有机肥还田增产效果显著。张艳鸿等^[10]研究表明,秸秆深还及秸秆配施化肥对不同土层土壤有机碳含量以及腐殖质各组分含碳量均有显著积累作用,除了分子结构芳香性提高以外,前者还使 HA 的疏水性提高,而后者分子结构变复杂。

施用秸秆后不仅土壤有机碳数量增加,其结构也发生相应变化,而农业生产过程中秸秆还田对土壤培肥的效果需要同时考虑土壤有机碳数量和质量方面。土壤腐殖质结构中如脂族链烃的增加有利于

增加其结构活性,对农田固碳和土壤培肥具有重要影响^[10]。现阶段对于不同方式还田后土壤有机碳结构特征的变化差异还少有研究。本文通过对秸秆浅施和深还进行比较,研究了两者对土壤有机碳组成和结构影响的差异,以期为土壤固碳和培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试土壤

试验所用黑土采自吉林农业大学资源与环境学院微区试验田(2005年开始),土壤类型为黑土,相当于美国系统分类的粘淀湿润软土(Argiudolls),其基本性质见表1^[11]。

1.1.2 供试玉米秸秆

试验所用玉米秸秆(包括玉米叶片茎秆)采自吉林农业大学教学试验田,用粉碎机粉碎至5 mm。该玉米残体性质如下:有机碳 338.6 g·kg⁻¹,全氮 6.87 g·kg⁻¹,C/N 为 49.3。

1.2 试验方法

试验设置3种处理:未施秸秆及化肥进行常规耕作(CK)、秸秆浅施入0~20 cm与土壤混合(C1)、秸秆深还入土20~40 cm(C2)。试验于2014年10月进行,还田量 12 000 kg·hm⁻²,并配施尿素 160 kg·hm⁻²(调节 C/N 比 25:1)。C1 处理:将表层 0~20 cm 土壤与玉米秸秆均匀混合后,还至小区形成两垄并自然沉降。C2 处理:人工开挖出上底宽 50 cm,下底宽 40 cm,深 40 cm,截面为倒置等腰梯形的深还沟,下底中央位置

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the soil for experiment

深度 Depth/cm	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	pH
0~20	21.22	1.46	0.52	167.2	6.5
20~40	19.84	1.27	0.45	152.1	6.3

对应两垄玉米之间垄沟处,将玉米秸秆均匀平铺至深还沟中,按 20~40、0~20 cm 顺序将土还至沟中,形成大垄,自然沉降。

试验微区为钢筋水泥槽,小区面积为 2.1 m×1.1 m=2.31 m²,各处理 3 次重复,随机排列,各处理小区间设置 30 cm 水泥保护行。各小区共两垄,每垄种植玉米 5 株,均进行相同田间管理,玉米品种为中金 368(北京金粒粒金种子有限公司)。于 2015 年 10 月采集表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)土壤进行分析测定。

1.3 分析方法

土壤腐殖质组成提取与有机碳测定:采用腐殖质组成修改法^[12]提取胡敏酸(HA)、富里酸(FA)和胡敏素(HM)。HA 和 FA 有机碳含量采用岛津 TOC-Vcpn 分析仪测定,土壤有机碳(SOC)和 HM 有机碳采用重铬酸钾外加热法测定。

HA 样品提取和纯化:采用国际土壤腐殖质协会推荐的 IHSS 方法^[13]进行提取纯化。

HA 元素组成测定:采用德国 Vario EL III 型元素分析仪在 CHN 模式下进行测定,其中 C、H、N 元素含量为实测值,O+S 元素含量采用差减法计算。

HA 红外光谱分析采用美国 Nicolet-AV360 红外光谱仪,采用 KBr 压片法,测试范围为 4000~500 cm⁻¹,通过 OMNIC 软件对红外谱图进行特征峰选取,对不同波数的特征吸收峰进行半定量分析。

HA 差热分析采用德国 NETZSCH STA2500 热重分析仪,称取样品量为 3~5 mg,在 60 mL·min⁻¹ 的空气流量条件下,以 15 ℃·min⁻¹ 的升温速率由 35 ℃升至 600 ℃,用仪器自带 Proteus Analysis 软件分析样品差热和热重曲线,进行半定量分析。

1.4 数据处理

用 Microsoft Office Excel 2013 对数据进行处理,SPSS Statistics19.0 软件进行单因素方差分析(LSD-*t* 检验, $P<0.05$),不同字母代表差异显著。红外光谱图和差热分析图使用 Origin7.5 软件作图。

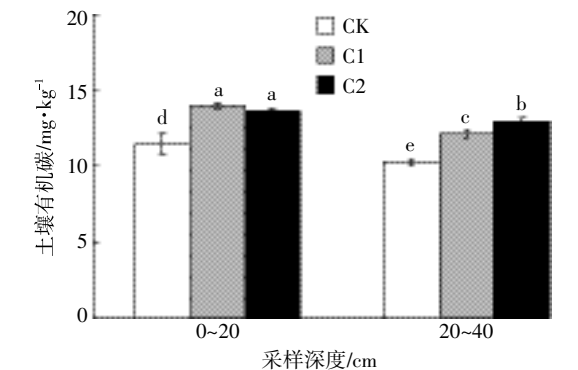
2 结果与分析

2.1 玉米秸秆还田对土壤有机碳组成的影响

各处理土壤有机碳含量如图 1 所示。秸秆还田后土壤有机碳含量明显增加,与 CK 相比,C1 和 C2 处理表层和亚表层土壤有机碳含量均高于 CK,且差异显著($P<0.05$)。表层 C1 和 C2 处理土壤有机碳含量与 CK 相比分别增加了 21.77%和 18.61%;亚表层则表现为 C2 处理土壤有机碳含量相比于 C1 处理增加更显著,较 CK 上升了 26.32%。

各处理表层和亚表层土壤腐殖质组分有机碳含量如表 2 所示,均表现为 HM>HA>FA,土壤腐殖质各组间差异显著($P<0.05$)。与 CK 相比,表层 C1 和 C2 处理的 HA 有机碳含量分别增加了 27.33%、19.85%,FA 有机碳含量分别增加了 11.55%、9.85%,HM 有机碳含量分别增加了 29.97%、22.90%;与 CK 相比,亚表层则表现为 C2 处理各腐殖质组分有机碳含量增加更明显,HA、FA 和 HM 有机碳含量相比 CK 分别增加了 31.99%、13.38%和 33.85%。

PQ 值是 HA 在可提取腐殖质中所占的比例,用以表示土壤有机质腐殖化程度。与 CK 相比,C1 和 C2



不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 玉米秸秆还田对土壤有机碳的影响

Figure 1 Effect of different ways of corn stover application on soil organic carbon

表 2 玉米秸秆还田对土壤腐殖质组分有机碳含量的影响

Table 2 Effect of different ways of corn stover application on composition and PQ value of soil humus

深度/cm	处理	胡敏酸 HA/g·kg ⁻¹	富里酸 FA/g·kg ⁻¹	胡敏素 HM/g·kg ⁻¹	PQ 值/%
0~20	CK	3.49±0.11c	1.99±0.09bc	5.26±0.22d	63.73±0.29bc
	C1	4.44±0.09a	2.22±0.09a	6.83±0.12a	66.72±1.09a
	C2	4.18±0.16b	2.18±0.05a	6.46±0.10ab	65.70±1.31ab
20~40	CK	3.06±0.08d	1.87±0.16c	4.64±0.11e	62.11±1.68c
	C1	3.67±0.09c	2.07±0.08ab	5.68±0.34c	63.89±0.66bc
	C2	4.04±0.07b	2.12±0.04ab	6.13±0.25b	65.58±0.75ab

处理表层和亚表层土壤 PQ 值均有不同程度增加,且差异显著($P<0.05$)。表层中 C1 处理增加最明显,与 CK 相比从 63.73%增加为 66.72%;亚表层中则 C2 处理增加最多,相比 CK 从 62.11%增加为 65.58%。

各处理土壤腐殖质组分有机碳相对含量如表 3 所示。与 CK 相比,表层 C1 和 C2 处理中 HA 有机碳相对含量分别增加了 1.33%、0.25%,FA 有机碳相对含量分别降低了 1.46%、1.30%,HM 有机碳相对含量分别增加了 2.99%、1.56%;亚表层则表现为 C2 处理下 HA 和 HM 有机碳相对含量增加最多,分别为 1.35%、2.00%;FA 有机碳相对含量降低最多,为 1.86%。说明秸秆还田后土壤 HA 和 HM 有机碳相对含量呈上升趋势,FA 与之相反。

2.2 玉米秸秆还田对土壤 HA 元素组成的影响

元素组成是判断土壤 HA 官能团特征的重要手段,通常以 H/C 和(O+S)/C 的摩尔比值来表征 HA 的缩合度和氧化度强弱^[14]。H/C 比值越大表示含有的脂肪族结构越多,反之芳香化程度越高;O/C 比值则与含氧基团数量成正比^[15]。各处理土壤 HA 元素组成变化如表 4 所示。与 CK 相比,C1 和 C2 处理的土壤 HA 的 C、N 和 H 元素含量均有不同程度上升,O 元素含量较 CK 有所下降,秸秆还田促进了 HA 的 C、N 和 H 元素含量的提高和 O 元素的消耗。C1 和 C2 处理表层和亚表层 HA 的(O+S)/C 比值均低于 CK,其中 C1

处理的表层(O+S)/C 比值降低最多,为 11.34%;C2 处理的亚表层(O+S)/C 比值降低最明显,为 9.15%。C1 和 C2 处理表层和亚表层 HA 的 H/C 比值均高于 CK,其中 C1 处理 HA 的 H/C 比值增加趋势表现为表层>亚表层,C2 处理与之相反,为亚表层>表层。

2.3 玉米秸秆还田对土壤 HA 红外光谱的影响

图 2 为各处理土壤 HA 的 FTIR 变化。各处理的图谱形状相似,2920 cm^{-1} 处代表不对称脂族 C-H 伸缩振动峰,2850 cm^{-1} 处代表-CH₂-对称脂族 C-H 伸缩振动峰,1720 cm^{-1} 处代表羧基 C=O 伸缩振动的吸收峰,1620 cm^{-1} 处代表芳香 C=C 伸缩振动的吸收峰,

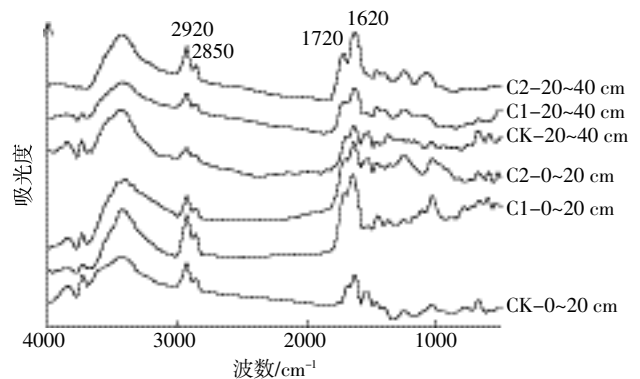


图 2 玉米秸秆还田对土壤中 HA 的 FTIR 谱图的影响

Figure 2 Effect of different ways of corn stover application on FTIR spectra of HA in soil

表 3 玉米秸秆还田对土壤腐殖质组分有机碳相对含量的影响

Table 3 Effect of different ways of corn stover application on relative contents of the components of soil humus

深度/cm	处理	胡敏酸 HA/%	富里酸 FA/%	胡敏素 HM/%
0~20	CK	30.43±1.25ab	17.31±0.50ab	45.88±2.47ab
	C1	31.76±0.32a	15.85±0.82b	48.87±0.42a
	C2	30.68±0.66ab	16.01±0.60b	47.44±0.16ab
20~40	CK	29.84±0.22b	18.22±1.35a	45.23±0.87b
	C1	30.12±1.01ab	17.03±0.75b	46.65±2.66ab
	C2	31.19±1.07ab	16.36±0.27b	47.23±2.46ab

表 4 玉米秸秆还田对土壤中 HA 元素组成的影响

Table 4 Effect of different ways of corn stover application on elemental composition of HA in soil

深度/cm	处理	各元素含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				摩尔比		
		C	N	H	O+S	C/N	(O+S)/C	H/C
0~20	CK	530.3	35.59	52.04	382.1	17.38	0.540	1.178
	C1	552.8	38.42	55.63	353.2	16.78	0.479	1.208
	C2	543.8	37.38	53.79	365.0	16.97	0.503	1.187
20~40	CK	519.7	35.13	50.42	394.8	17.26	0.570	1.164
	C1	527.3	36.55	51.48	384.6	16.83	0.547	1.171
	C2	538.0	37.35	53.38	371.3	16.80	0.518	1.191

这 4 处吸收峰在强度上存在差异。对各处理 HA 红外光谱吸收峰的相对强度进行半定量分析如表 5 所示, I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2920}/I_{1620} 比值用以反映 HA 结构氧化度和脂族性与芳香性的强弱。

与 CK 相比,C1 和 C2 处理的 HA 结构在 2920、2850、1620 cm^{-1} 处的相对吸收强度增加,在 1720 cm^{-1} 的相对吸收强度降低,说明秸秆还田后 HA 的脂族链烃和芳香碳含量增加,羧基含量降低。与 CK 相比,C1 和 C2 处理表层和亚表层 HA 的 I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2920}/I_{1620} 比值均高于 CK,其中 C1 处理表层 HA 的 I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2920}/I_{1620} 比值较 CK 相比增加更明显,分别为 135.6% 和 23.43%;C2 处理则表现为亚表层 HA 的 I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2920}/I_{1620} 比值较 CK 相比增加更显著,分别为 133.3% 和 22.92%。

2.4 玉米秸秆还田对土壤 HA 热稳定性的影响

各处理 HA 的放热和失重曲线如图 3 所示。HA 样品在热解过程中表现为中温(351~360 $^{\circ}\text{C}$)放热和高温(494~521 $^{\circ}\text{C}$)放热。中温放热主要是样品结构中脂族化合物分解,高温放热是样品结构内部芳香化合物分解和完全氧化^[16]。

对不同处理 HA 热分解过程中放热和失重进行

半定量分析如表 6。与 CK 相比,C1 和 C2 处理表层和亚表层 HA 在中、高温的放热和失重量均有不同程度增加,秸秆还田使 HA 脂族和芳香化合物含量增加。不同土层 C1 和 C2 处理下 HA 的热量高/中比值和失重高/中比值均小于 CK,其中:表层 C1 处理较 CK 降低明显,分别为 37.67%、10.25%;亚表层则 C2 处理较 CK 降低明显,分别为 33.04%、13.29%。

3 讨论

3.1 不同还田方式对土壤有机碳组成的影响

本研究表明:秸秆还田有利于土壤和各腐殖质组分有机碳含量的积累,秸秆浅施对表层土壤有机碳组分含碳量增加明显,秸秆深还更利于亚表层土壤有机碳组分的改善。秸秆还田为土壤微生物的生长繁殖、代谢活动提供了充足的碳源,从而导致土壤微生物量碳含量增加^[17]。秸秆浅施使秸秆与土壤充分接触,加速了微生物对秸秆分解和表层有机碳的积累^[18],因秸秆施入土层较浅,未触及亚表层,故亚表层受秸秆影响较小。与秸秆粉碎浅施相比,秸秆深还将秸秆还于亚表层,在土壤深层形成秸秆层,能有效避免营养元素的径流和挥发^[19],使深层“饥饿”的土壤充分与秸秆

表 5 玉米秸秆还田对土壤 HA 的 FTIR 光谱主要吸收峰相对强度的影响

Table 5 Effect of different ways of corn stover application on relative intensity of the main absorption peaks in FTIR spectra of HA in soil

深度/cm	处理	相对强度/%				比值	
		2920 cm^{-1}	2850 cm^{-1}	1720 cm^{-1}	1620 cm^{-1}	I_{2920}/I_{1720}	I_{2920}/I_{1620}
0~20	CK	3.697	1.417	7.517	8.071	0.680	0.634
	C1	7.201	2.429	6.008	12.31	1.603	0.782
	C2	5.442	1.959	6.356	10.40	1.164	0.711
20~40	CK	3.399	1.373	8.039	7.908	0.593	0.603
	C1	5.038	1.883	6.514	10.23	1.063	0.677
	C2	6.205	2.268	6.119	11.42	1.385	0.742

注: I_{2920}/I_{1720} 为 $I_{(2920+2850)}/I_{1720}$; I_{2920}/I_{1620} 为 $I_{(2920+2850)}/I_{1620}$ 。

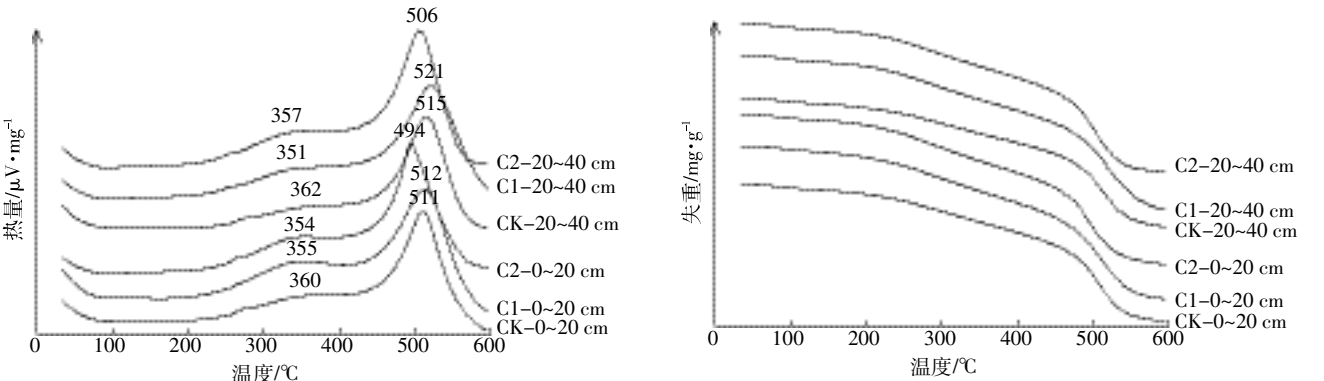


图 3 玉米秸秆还田对土壤 HA 的放热和失重的影响

Figure 3 Effect of different ways of corn stover application on exothermic heat and mass loss curve of HA in soil

表 6 玉米秸秆还田对土壤 HA 的放热和失重的影响

Table 6 Effect of different ways of corn stover application on exothermic heat and mass loss of HA in soil

深度/cm	处理	放热量/ $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$		热量高/中比值	失重/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$		失重高/中比值
		中温	高温		中温	高温	
0~20	CK	0.288 3	3.732	12.94	209.3	501.9	2.398
	C1	0.579 0	4.670	8.066	255.6	550.1	2.152
	C2	0.379 3	4.036	10.64	240.5	548.8	2.282
20~40	CK	0.245 4	3.613	14.72	188.0	488.0	2.596
	C1	0.355 9	4.387	12.33	229.5	537.6	2.342
	C2	0.451 1	4.447	9.858	246.0	553.7	2.251

接触,提高了微生物代谢活性,有利于亚表层土壤腐殖质形成和土壤固碳^[20]。本试验中秸秆还田后土壤 HA、HM 相对含量呈上升趋势,FA 呈下降趋势,可能是因为秸秆在分解过程中较多的转化为腐殖质组分 HA 和 HM,使土壤有机碳中 FA 的比例相对降低。

秸秆还田后土壤 PQ 值显著增加,秸秆浅施处理下表层 PQ 值增加明显,秸秆深还对亚表层 PQ 值影响更大。这可能是因为,秸秆还田后土壤 HA 有机碳含量积累,提高了土壤腐殖化程度,促进了土壤腐殖质品质的改善^[10]。秸秆浅施和深还对土壤 HA 在表层和亚表层的影响不同,前者对表层 HA 增加明显,深还对亚表层 HA 累积效果更好,因此二者对 PQ 值的影响在不同土层上存在差异。

3.2 不同还田方式对土壤 HA 结构的影响

本研究试验分析结果表明:秸秆还田后土壤 HA 结构氧化度和缩合度降低,脂族链烃和芳香碳含量增加,羧基碳含量减少,热稳定性降低。Al-Faiyz^[21]通过¹³C NMR 对比分析作物秸秆、棕榈叶和动物粪便堆肥后土壤胡敏酸结构特征表明,作物秸秆堆肥下胡敏酸中碳水化合物低于其他处理,其脂肪族含量最高,脂族性最强。Brunetti 等^[22]认为施用有机肥后土壤 HA 结构缩合度下降,脂族性增强,芳香性减弱,HA 结构趋于脂族化。本文得出类似结论可能是因为:秸秆还田后,土壤微生物数量和活性增加,土壤中结构复杂的 HA 在微生物代谢过程中被分解^[23],使 HA 结构稳定性降低;且秸秆分解向土壤输入大量氨基化合物、碳水化合物、脂肪化合物和芳香化合物,使 HA 脂族 C-H 和芳香族 C=C 伸展增强,脂肪族和芳香族结构增加;新形成的 HA 含氧官能团较少,氧化度和缩合度较低,结构趋于简单化、年轻化。

秸秆浅施后表层 HA 氧化度显著降低,脂族性增强,而秸秆深还则显著降低了亚表层 HA 氧化度,增加了 HA 脂族性。土壤由于受作物根系和人为耕作的

影响,土壤透气性、透水性和微生物活性均高于亚表层。秸秆浅施在耕作基础上加深了表层土壤扰动,改变了气体扩散和团聚体结构,充足的氧气和秸秆刺激了微生物分泌和土壤酶活性提高,较多的 HA 结构被分解,同时随着秸秆腐解,土壤中新形成大量结构较为简单、脂族性强的 HA 分子;而秸秆浅施并未对亚表层进行扰动,只是在还田过程中有小部分秸秆接触到亚表层,因而对亚表层影响较小。亚表层由于根系很少深入,透气性差,土壤腐殖质进入缩合过程,结构较为复杂^[24]。秸秆深还改变了这一状态,加深了亚表层土壤扰动。由于深层秸秆层的存在,使土壤易氧化性碳增多,刺激了亚表层土壤微生物活性,微生物新陈代谢速率提高,促进了氧化度和缩合度高的 HA 结构分解;另一方面秸秆腐解产生大量脂族碳和芳香碳,使亚表层新形成的 HA 结构脂族性较强,热稳定性相对较低。同时,秸秆深还使土壤表层和亚表层在一定程度上形成一个共同变化的整体,促进了表层和亚表层腐殖质的更新和活化^[25]。

4 结论

与 CK 相比,秸秆还田显著增加了土壤和各腐殖质组分有机碳含量,HA 和 HM 占土壤有机碳比例呈上升趋势,FA 与之相反,土壤 PQ 值增加,秸秆浅施对表层有机碳组成累积效果明显,秸秆深还则对亚表层培肥效果显著;秸秆还田后 HA 结构氧化度和缩合度呈下降趋势,脂族链烃和芳香碳含量增加,热稳定性下降,HA 结构简单化、年轻化,秸秆浅施对表层 HA 结构影响更明显,秸秆深还则对亚表层 HA 结构特征变化影响更显著。

参考文献:

- [1] 张 鹏,李 涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2518-2525.

- ZHANG Peng, LI Han, JIA Zhi-kuan, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of Southern Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2518-2525.
- [2] 刘定辉, 蒲波, 陈尚洪, 等. 秸秆还田循环利用对土壤碳库的影响研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(5):1316-1319.
- LIU Ding-hui, PU Bo, CHEN Shang-hong, et al. Effect of crop straw returning to paddy soil on soil carbon pool in Sichuan basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(5):1316-1319.
- [3] 陈亮, 赵兰坡, 赵兴敏. 秸秆焚烧对不同耕层土壤酶活性、微生物数量以及土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):118-122.
- CHEN Liang, ZHAO Lan-po, ZHAO Xing-min. Effect of straw burning on soil enzyme activity, soil microbial quantity and physical and chemical properties of soil in different plough layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):118-122.
- [4] Hammerbeck A L, Stetson S J, Osborne S L, et al. Corn residue removal impact on soil aggregates in a no-till corn/soybean rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4):1390-1398.
- [5] 赵红, 吕贻忠. 保护性耕作对潮土结构特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1956-1960.
- ZHAO Hong, LÜ Yi-zhong. The effect of conservation tillage on the structural characteristics of Fluvo-aquic soil[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18(5):1956-1960.
- [6] Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3/4):245-260.
- [7] Giacomini S J, Recous S, Mary B, et al. Simulating the effects of N availability, straw particle size and location in soil on C and N mineralization[J]. *Plant and Soil*, 2007, 301(1/2):289-301.
- [8] 刘玲, 刘振, 杨贵运, 等. 不同秸秆还田方式对土壤碳氮含量及高油玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):187-192.
- LIU Ling, LIU Zhen, YANG Gui-yun, et al. Effects of different modes of straw returned on contents of soil carbon and nitrogen and yield of high oil maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):187-192.
- [9] 郑立臣, 解宏图, 张威, 等. 秸秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(1):80-83.
- ZHENG Li-chen, XIE Hong-tu, ZHANG Wei, et al. Effects of different ways of returning straw to the soils on soluble organic carbon[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1):80-83.
- [10] 张艳鸿, 窦森, 董珊珊, 等. 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3):694-702.
- ZHANG Yan-hong, DOU Sen, DONG Shan-shan, et al. Effect of deep incorporation of corn stover in addition to chemical fertilization on composition of soil humus and structure of humic acid in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3):694-702.
- [11] 郝翔翔, 窦森, 安丰华, 等. 不同利用方式下土壤团聚体腐殖质组成及胡敏酸结构特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5):248-252.
- HAO Xiang-xiang, DOU Sen, AN Feng-hua, et al. Humus composition and structural characteristics of humic acid in soil aggregates under different utilization of land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5):248-252.
- [12] Kumada K, Sato O, Ohsumi Y, et al. Humus composition of maintain soil in Central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5):151-158.
- [13] Kuwatsuka S, Watanabe A, Itoh K, et al. Comparison of two methods of preparation of humic and fulvic acids, IHSS method and NAGOYA method[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(1):23-30.
- [14] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- DOU Sen. Soil organic matter[M]. Beijing:Science Press, 2010.
- [15] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6):703-707.
- [16] Francioso O, Ciavatta C, Montecchio D, et al. Quantitative estimation of peat, brown coal and lignite humic acids using chemical parameters, ¹H-NMR and DTA analyses[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 88(3):189-195.
- [17] Muhammad S, Müller T, Joergensen R G. Decomposition of pea and maize straw in Pakistani soils along a gradient in salinity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1):93-101.
- [18] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1):41-48.
- [19] 黄毅, 毕素艳, 邹洪涛, 等. 秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5):109-112.
- HUANG Yi, BI Su-yan, ZOU Hong-tao, et al. Effect of straw deep returning on corn root system and yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5):109-112.
- [20] 朱妹, 窦森, 关松, 等. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):127-136.
- ZHU Shu, DOU Sen, GUAN Song, et al. Effect of deep application of straw on composition of humin in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):127-136.
- [21] Al-Faiyz Y S S. CPMAS ¹³C NMR characterization of humic acids from composted agricultural Saudi waste[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2012, 29(12):1878-5352.
- [22] Brunetti G, Plaza C, Clapp C E, et al. Compositional and function features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(6):1355-1365.
- [23] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1):1-12.
- [24] 郝翔翔, 窦森, 韩晓增, 等. 典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体中胡敏酸的结构特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(4):824-833.
- HAO Xiang-xiang, DOU Sen, HAN Xiao-zeng, et al. Structure of humic acid in soil aggregates under different ecosystems in typical black soil region of Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4):824-833.
- [25] 朱妹, 窦森, 陈丽珍. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4):35-46.
- ZHU Shu, DOU Sen, CHEN Li-zhen. Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):35-46.