

DOI: 10.11766/trxb201510210437

# 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\*

张艳鸿 窦森<sup>†</sup> 董珊珊 谭岑 李立波 林琛茗

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

**摘要** 中国每年农作物秸秆总量巨大, 大部分农民选择焚烧, 焚烧秸秆会减少表层土壤有机质, 损害土壤墒情, 引起环境污染, 进而危害人类健康。将玉米秸秆施入土壤亚表层 (20~40 cm 之间), 即“秸秆深还” (Corn stover deep incorporation, CSDI), 可以有效解决秸秆利用问题, 以及由于焚烧秸秆造成的诸多问题, 继而达到固碳、蓄水、培肥、稳产的目的。以吉林农业大学试验站玉米连作耕地 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤为研究对象, 设 CK (未施用秸秆)、CS (秸秆深还)、NPK (单施化肥)、CS+NPK (秸秆深还配施化肥) 4 种处理, 主要研究秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸 (HA) 结构的影响。腐殖质组成采用腐殖质组成修改法测定, 胡敏酸样品采用 IHSS 方法提取纯化, 其结构经元素组成、红外光谱进行研究。结果表明: 秸秆深还及秸秆配施化肥对不同土层土壤有机碳 (SOC) 含量以及腐殖质各组分含碳量均有显著积累作用, PQ 值 (胡敏酸在腐殖酸中所占的比例) 无显著变化。秸秆深还及秸秆配施化肥均能使 HA 分子的芳香结构比例增加, 但 CS 处理还能同时增加脂族链烃的比例; 而 CS+NPK 处理则使 HA 的缩合度提高, 氧化度下降。说明 CS 和 CS+NPK 使 HA 变稳定的机制有所不同, 除了分子结构芳香性提高的作用以外, 前者还体现在疏水性的提高上; 而后者则体现在分子结构变复杂上。

**关键词** 秸秆深还; 土壤腐殖质; 胡敏酸; 元素组成; 红外光谱

**中图分类号** S151.9 **文献标识码** A

农作物秸秆是籽实收获后剩下的农作物残留物, 是物质、能量和养分的载体, 是一种多用途、可再生的宝贵生物资源<sup>[1-2]</sup>。我国每年农作物秸秆总量巨大, 但利用率较低。大部分农民选择焚烧, 但是焚烧秸秆会减少表层土壤有机质, 损害土壤墒情, 并且引起环境污染, 进而危害人类健康<sup>[3-4]</sup>。秸秆还田可以大批量处理剩余秸秆, 是秸秆利用的主要方式之一。前人对秸秆还田做了大量研究, 相关研究表明秸秆还田可以改善土壤理化性状, 提高土壤有机质、水稳性团聚体、土壤养分的含量, 增强土壤保水性能和微生物活性, 提高农作物的产量

和品质等<sup>[5-9]</sup>。但目前秸秆覆盖或浅还还存在一定问题, 比如增加病虫害的发生, 整地质量差, 地温低等<sup>[10]</sup>。

为了解决上述问题, 将玉米秸秆施入土壤亚表层 (20~40 cm 之间), 即“秸秆深还”, 这样既解决了目前土壤耕层变浅, 缺少有机肥, 土壤蓄水能力下降等问题, 又减少了由于焚烧秸秆造成的环境污染, 达到保碳、蓄水、培肥、稳产的目的。崔婷婷等<sup>[11]</sup>关于秸秆深还对土壤腐殖质组成及胡敏酸结构特征影响的研究表明: 秸秆深还可促使土壤表层中胡敏酸 (HA)、富里酸 (FA) 和胡敏素

\* 国家自然科学基金项目 (41571231)、吉林省重点科技攻关项目 (2011CB100503NY) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571231) and the Key Science and Technology Projects of Jilin Province (No. 2011CB100503NY)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dousen1959@126.com

作者简介: 张艳鸿 (1989—), 女, 硕士研究生, 从事土壤环境与生物化学研究。E-mail: 527697557@qq.com

收稿日期: 2015-10-21; 收到修改稿日期: 2016-01-02

(HM) 的含碳量增加, 同时使HA分子的缩合度、氧化度和热稳定性提高, 分子结构变复杂。王胜楠等<sup>[12]</sup>认为秸秆深还促使土壤水分利用效率提高, 并且有利于土壤有机碳的固定。殷世伟等<sup>[13]</sup>研究表明麦秸深埋可以提高水稻产量, 改善稻米品质。朱姝等<sup>[14]</sup>的研究表明秸秆深还有利于优势粒级团聚体的形成, 同时促使优势粒级团聚体中有机碳增多, 土壤表层和亚表层各粒级团聚体中HA的缩合度、氧化度和热稳定性下降, 结构简单化、年轻化。相比秸秆浅施, 秸秆深还不仅明显降低土壤容重, 提高土壤有机碳含量, 而且能显著增加土壤有益微生物数量、耕层土壤酶活性和作物产量<sup>[15-16]</sup>。同时秸秆深层还田对土壤中HA、FA和HM的积累作用也较秸秆浅施明显<sup>[17]</sup>。

目前, 关于秸秆深还的研究主要集中在秸秆深还后土壤蓄水能力、微生物活性、作物生长、土壤固碳能力、土壤团聚体组成、腐殖质结构变化等方面, 而关于秸秆深还配施化肥对土壤腐殖质影响研究较少。因此, 本文主要研究秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响。以期如何合理利用秸秆深还提高土壤固碳能力以及构建合理耕层提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于吉林省长春市净月区吉林农业大学试验站玉米连作耕地 (N43°48'43.57", E125°23'38.50"), 供试土壤类型为半湿温半淋溶土亚纲黑土类, 相当于美国土壤系统分类的黏淀湿润软土 (Argiudolls)。具体见参考文献 [14]。

### 1.2 田间试验设计

试验设CK、CS、NPK、CS+NPK 4种不同处理, 分别代表未施用秸秆、秸秆深还、单施化肥、秸秆深还配施化肥。各处理设3次重复, 随机排

列。秸秆深还试验于2012年11月进行。深还方法参照朱姝2011年的试验<sup>[14]</sup>。具体操作为: 于收获后人工开挖深还沟, 其横截面为倒置等腰梯形, 上底宽60 cm, 下底宽40 cm, 深40 cm, 下底中央位置对应两垄玉米之间垄沟处。在挖沟的同时, 将0~20 cm和20~40 cm挖出的土壤分开放置。将玉米收获后的秸秆粉碎至长度为3~5 cm, 均匀平铺至深还沟中, 还田量12 000 kg hm<sup>-2</sup>, 一次性全量还田, 在秸秆施于沟中后, 按20~40 cm、0~20 cm顺序还土至沟中, 形成大垄并自然沉降。于2014年10月采集各处理表层 (0~20 cm) 和亚表层 (20~40 cm) 的土壤进行测定。

各处理中, 涉及施用化肥处理的每年化肥施用量为N: 200 kg hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 50 kg hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O: 50 kg hm<sup>-2</sup>。

供试土壤基本理化性质见表1。

### 1.3 分析方法

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法, 碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法, 速效钾采用火焰光度计法, pH采用电位法<sup>[18]</sup>测定。

腐殖质组成采用腐殖质组成修改法<sup>[19]</sup>提取。提取剂为0.1 mol L<sup>-1</sup>焦磷酸钠和0.1 mol L<sup>-1</sup>氢氧化钠混合液 (pH=13)。腐殖物质 (HE) 含碳量、HA含碳量采用重铬酸钾氧化法测定, FA含碳量采用差减法得到, 即FA含碳量=HE含碳量-HA含碳量。PQ值=HA含碳量/HE含碳量。

HA样品采用IHSS方法提取纯化, 风干土样经0.1 mol L<sup>-1</sup> NaOH溶液提取, 提取液经HCl酸化至pH 1.5得到粗HA, 后经离心、电渗析、旋转蒸发、冻干等过程后得到HA干样, 具体步骤见文献 [20]。

HA的元素组成采用德国产VARIO EL III型元素分析仪测定型元素分析仪在C\H\N模式下进行测定, 其中HA的C、H、N元素含量为实测值, O和S元素含量的总和采用差减法计算获得; HA的红

表1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the soil for experiment

采样深度 Depth (cm)	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkalytic N (mg kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	pH
0~20	18.57	82.44	24.02	86.02	6.54
20~40	15.34	74.09	17.46	75.93	6.39

外光谱在AVATAR 360傅里叶变换红外光谱仪上测定。采用KBr压片法(HA和KBr的质量比例约为1:250),测试范围为4 000~500  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数128次,分辨率8  $\text{cm}^{-1}$ 。

#### 1.4 数据处理

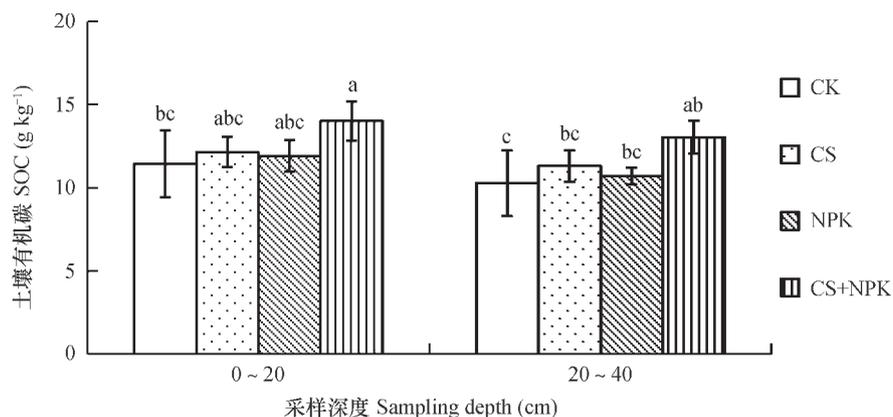
采用Microsoft Office Excel 2007软件进行数据分析处理,采用SPSS Statistics 17.0统计分析并进行差异显著性检验。

红外光谱图通过OMNIC软件对谱线选取特征峰,采用Origin 7.5的分峰拟合功能,对不同波数的特征吸收峰进行峰面积计算,用某一峰面积占各峰总面积的百分比表示其峰强度。

## 2 结果

### 2.1 秸秆深还及配施化肥对土壤有机碳的影响

从图1中可以看出秸秆深还及配施化肥对土壤有机碳的影响,各处理表层与亚表层土壤有机碳含量变化规律相似:CS+NPK > CS > NPK > CK。单施秸秆与单施化肥相比,前者对土壤有机碳的积累效果优于后者,但不如秸秆与化肥配施效果显著。就表层土壤而言,与CK相比,NPK、CS、CS+NPK处理有机碳含量分别增加了0.70、0.47和2.57  $\text{g kg}^{-1}$ ,可以看出CS+NPK处理对土壤有机碳的积累效果较其他处理显著。对亚表层土壤而言,NPK、CS、



注:CK为未施用秸秆,CS为秸秆深还,NPK为单施化肥,CS+NPK为秸秆深还配施化肥。小写字母代表不同土层不同处理间SOC含量的显著性差异,显著水平 $p < 0.05$ 。下同 Note: CK represents no-corn stover incorporated, CS represents CSDI, NPK represents fertilizers applied only, CS + NPK represents CSDI plus fertilizers application. The lower-case letters in the same column mean

significant difference at level  $p < 0.05$ . The same below

图1 秸秆深还及配施化肥对土壤有机碳的影响

Fig. 1 Effect of CSDI and fertilizers application on soil organic carbon

CS+NPK有机碳含量较CK分别增加了1.02、0.43、2.75  $\text{g kg}^{-1}$ ,变化规律与表层类似。相比表层与亚表层SOC含量变化可以得出:秸秆深还可以显著提高土壤有机碳含量,配施化肥效果更加显著。其中对亚表层SOC的积累作用较表层明显。

### 2.2 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成的影响

土壤腐殖质组分有机碳含量如表2所示,不同土层各处理土壤腐殖质组分间含碳量均表现为HM > HA > FA,不同土层各处理表层土壤腐殖质组分含碳量均高于亚表层。0~20 cm土层CS、NPK和CS+NPK处理的HA含碳量较CK分别增加了16.6%、6.8%和24.6%;FA含碳量的表现为:NPK处理降低,CS和CS+NPK分别较CK增加了0.13和0.50  $\text{g kg}^{-1}$ ,差异均较显著;与CK相比,其他3个处理HM含碳

量均增加,CS增加最少,为10.5%,CS+NPK最大,达到32.1%。对亚表层(20~40 cm)土壤而言,CS、NPK和CS+NPK处理HA含碳量较CK均有所增加,分别增加了11.0%、6.2%和29.0%;FA含碳量的变化趋势表现为CS+NPK > CS > CK > NPK,而HM则表现为CS+NPK > NPK > CS > CK。

PQ值是指胡敏酸在腐殖酸中所占的比例,用来反映土壤的腐殖化程度,两者呈正相关。从表2可以看出虽然土壤表层和亚表层秸秆深还及配施化肥处理HA和FA含碳量均有增加,但PQ值变化均不显著。相比于CK,表层中,CS、NPK和CS+NPK处理均使腐殖质PQ值略升高,从56.58%分别增加至59.13%、60.37%和57.87%;亚表层中,CS、NPK和CS+NPK的变化幅度分别为3.35%、9.60%和3.73%。

表2 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和PQ值的影响

Table 2 Effects of CSDI and fertilizers application on composition and PQ value of soil humus

采样深度 Depth (cm)	处理 Treatment	胡敏酸 HA (g kg <sup>-1</sup> )	富里酸 FA (g kg <sup>-1</sup> )	胡敏素 HM (g kg <sup>-1</sup> )	PQ值 PQ value (%)
0~20	CK	3.25 ± 0.37cde	2.49 ± 0.19ab	4.67 ± 0.29bc	56.58 ± 2.42a
	CS	3.79 ± 0.28ab	2.62 ± 0.22ab	5.16 ± 0.66ab	59.13 ± 1.10a
	NPK	3.47 ± 0.16bcd	2.30 ± 0.52ab	6.04 ± 0.49a	60.37 ± 5.94a
	CS+NPK	4.05 ± 0.11a	2.99 ± 0.66a	6.17 ± 1.07a	57.87 ± 4.55a
20~40	CK	2.90 ± 0.39e	2.36 ± 0.23ab	3.84 ± 0.56c	54.98 ± 2.25a
	CS	3.22 ± 0.37de	2.44 ± 0.19ab	4.59 ± 0.82bc	56.82 ± 1.98a
	NPK	3.08 ± 0.06de	2.04 ± 0.33b	5.01 ± 0.77abc	60.26 ± 3.66a
	CS+NPK	3.74 ± 0.21abc	2.86 ± 0.64ab	5.11 ± 0.22ab	57.03 ± 4.04a

注：CK为未施用秸秆，CS为秸秆深还，NPK为单施化肥，CS+NPK为秸秆深还配施化肥。小写字母代表不同土层不同处理间各组分含量的显著性差异，显著水平 $p < 0.05$ 。下同 Note: CK represents no-corn stover incorporated, CS represents CSDI, NPK represents fertilizers applied only, CS + NPK represents CSDI plus fertilizers application. The lower-case letters in the same column mean significant difference at level  $p < 0.05$ . The same below

### 2.3 秸秆深还及配施化肥对土壤HA元素组成的影响

土壤腐殖质的主体是由羧基-COOH和羟基-OH取代的芳香结构，烷烃、脂肪酸、碳水化合物和含氮化合物结合于芳香结构上<sup>[21]</sup>。H/C和(O+S)/C(摩尔比)用来表征HA分子缩合度和氧化度的强弱，H/C与缩合度呈反相关，(O+S)/C与氧化度呈正相关<sup>[22]</sup>。有机质中H/C比值越小则腐殖质的芳香性越强，反之含有较多脂肪族化合物<sup>[18]</sup>。而O/C比值越大表示有机物中含有的羧基酚基官能团或者碳水化合物就越多<sup>[23]</sup>。

对HA元素组成研究表明(如表3所示)：HA的C含量范围在501.6~549.5 g kg<sup>-1</sup>之间，O+S含量为373.3~429.0 g kg<sup>-1</sup>，H和N含量范围分别为

43.72~45.01 g kg<sup>-1</sup>和28.47~36.70 g kg<sup>-1</sup>，说明HA的元素组成以C和O+S为主。就不同处理而言，2个土层HA的C含量均依次为：CS+NPK > NPK > CK > CS。说明秸秆深还配施化肥使土壤HA中C含量增加，秸秆深还与之相反；CS的2个土层H/C和(O+S)/C均高于CK，CS+NPK与之相反。表明秸秆深还使HA分子缩合度降低，氧化度增加，而秸秆深还配施化肥使HA分子缩合度增加，氧化度降低。

### 2.4 秸秆深还及配施化肥对土壤HA红外光谱的影响

土壤HA的红外光谱(FTIR)如图2所示。HA的主要征峰出现在2 920、2 850、1 720、1 620、1 400、1 230和1 034 cm<sup>-1</sup>处。分别代表：2 920 cm<sup>-1</sup>

表3 秸秆深还及配施化肥对土壤HA的元素组成的影响

Table 3 Effects of CSDI and fertilizers application on elemental composition of HA

采样深度 Depth (cm)	处理 Treatment	C (g kg <sup>-1</sup> )	H (g kg <sup>-1</sup> )	N (g kg <sup>-1</sup> )	O+S (g kg <sup>-1</sup> )	C/N	(O+S)/C	H/C
0~20	CK	531.1	44.64	32.12	392.2	19.287	0.554	1.009
	CS	518.0	43.72	32.17	406.1	18.784	0.588	1.013
	NPK	532.0	43.91	32.09	392.0	19.343	0.553	0.990
	CS+NPK	535.1	44.00	36.70	388.2	17.010	0.537	0.961
20~40	CK	531.1	44.83	32.55	391.5	19.037	0.553	1.013
	CS	501.6	43.97	28.47	429.0	20.553	0.641	1.052
	NPK	532.8	44.47	32.33	390.4	19.229	0.549	1.002
	CS+NPK	549.5	45.01	33.18	373.3	19.320	0.508	0.983

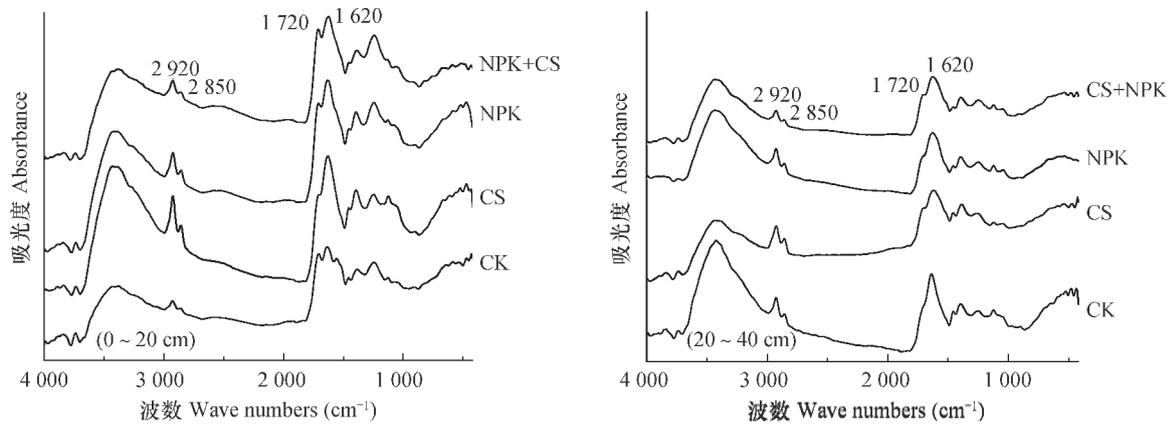


图2 秸秆深还及配施化肥对HA的FTIR谱图的影响

Fig. 2 Effects of deep incorporation of corn stover and fertilizers application on FTIR spectra of soil HA

(不对称脂族C-H伸缩振动),  $2850\text{ cm}^{-1}$  (—CH<sub>2</sub>—对称脂族C-H伸缩振动),  $1720\text{ cm}^{-1}$  (羧基的C=O伸缩振动),  $1620\text{ cm}^{-1}$  (芳香C=C伸缩振动),  $1400\text{ cm}^{-1}$  (脂族C-H变形振动),  $1230\text{ cm}^{-1}$  (羧基中—OH的变形振动和C—O伸缩振动)和 $1034\text{ cm}^{-1}$  (碳水化合物或多糖结构中C—O伸缩振动及无机物的Si—O伸缩振动)。图谱形状基本相似,但不同处理土壤HA在一些特征峰的吸收强度上存在着明显差异。

HA的FTIR光谱主要吸收峰相对强度(见表4),不同土层间比较,4种处理表层HA的 $2920/1720$ 均低于亚表层,表明表层HA的脂族碳/羧基

碳低于亚表层;除NPK外其他处理表层HA的 $2920/1620$ 均低于亚表层,表明表层HA的脂族碳/芳香碳低于亚表层。

不同处理间比较,HA在 $1720\text{ cm}^{-1}$ 的相对强度其他处理表层均高于CK;HA在 $1620\text{ cm}^{-1}$ 的相对强度其他处理表层和亚表层均高于CK。说明秸秆深还及配施化肥促使HA羧基碳和芳香碳增加。

综上所述,CS和CS+NPK处理均使HA分子的芳香碳含量增加,而CS处理同时能使脂族链烃比例增加,说明秸秆深还及配施化肥均能使HA分子结构趋于稳定。

表4 秸秆深还及配施化肥对土壤HA FTIR光谱主要吸收峰相对强度的影响

Table 4 Effects of CSDI and fertilizers application on relative intensity of the main absorption peaks in FTIR spectra of soil HA

采样深度 Depth (cm)	处理 Treatment	相对强度 Relative intensity (%)				摩尔比 Molar ratio	
		$2920\text{ cm}^{-1}$	$2850\text{ cm}^{-1}$	$1720\text{ cm}^{-1}$	$1620\text{ cm}^{-1}$	$2920/1720$	$2920/1620$
0~20	CK	12.749	2.893	13.146	43.725	0.970	0.292
	CS	17.279	3.673	15.578	51.882	1.109	0.333
	NPK	12.558	2.636	14.470	45.426	0.868	0.276
	CS+NPK	7.482	1.445	17.544	48.545	0.426	0.154
20~40	CK	13.957	3.221	5.164	45.061	2.703	0.310
	CS	18.079	4.155	5.720	46.249	3.161	0.391
	NPK	13.992	2.998	4.997	53.026	2.800	0.264
	CS+NPK	9.497	1.986	4.655	55.804	2.040	0.170

### 3 讨 论

#### 3.1 秸秆深还及配施化肥对土壤有机碳和腐殖质组成的影响

本研究表明：秸秆深还配施化肥对有机碳积累作用优于秸秆深还，更优于单施化肥。说明秸秆深还配施适量化肥是提高土壤有机碳含量的有效措施，与劳秀荣等<sup>[24]</sup>和孙卫民等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。说明秸秆与化肥对土壤有机碳的增加具有协同效应。这可能是由于施入化肥后，作物产量提高的同时，土壤中的凋落物增加，生物量碳也增加，从而使土壤有机碳含量增加。Bhattacharyya等<sup>[26]</sup>的研究表明，水稻秸秆+无机氮肥的处理可显著增加表层土壤有机碳和碳储量。

于锐等<sup>[27]</sup>研究表明，与化肥单施相比，有机肥化肥混施明显提高了黑土HA、FA、HS含量，也提高了腐殖质活性。孙星等<sup>[28]</sup>关于长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量影响的研究表明供试的两种土壤的养分与腐殖酸组分碳均呈极显著或显著正相关，秸秆与化肥配合施用增加了土壤腐殖质含量，改善了土壤腐殖质品质。本文得出类似结果：秸秆深还及配施化肥能够促使HA、FA和HM含碳量显著增加，而PQ值略有增加，但变化不显著，说明秸秆深还后土壤的熟化程度及肥力状态向适宜的方向转化。

#### 3.2 秸秆深还及配施化肥对土壤HA结构特征的影响

CS处理使HA分子的脂族链烃和芳香碳比例均增加，CS+NPK处理使HA分子芳香碳增强，但脂族性链烃结构减少。说明秸秆深还及配施化肥均能促使HA分子结构变得更加复杂、稳定，这更有利于作物的生长及土壤结构的改善<sup>[29]</sup>。从元素组成和红外光谱可以看出CS和CS+NPK处理使HA变稳定的机制有所不同，除了分子结构芳香性提高的作用以外，前者还体现在疏水性的提高上；而后者则体现在分子结构变复杂上。Ingo等<sup>[30]</sup>研究得出易氧化性碳和非氧化性碳的含量均随着培养时间而下降。Ferrari等<sup>[31]</sup>通过漫反射傅里叶变换红外光谱和核磁共振分析了从施用农家肥40多年种植玉米的土壤中提取的腐殖质的结构特征，认为其含有相对较高含量的木质素，氨基酸，多肽和蛋白质。Ghaffar和Fan<sup>[32]</sup>认为木质素是一种天然聚合物和芳香族高度交联的物质，与苯酚-甲醛树脂的网络结构类似。本试验中可能是因为秸秆与化肥配

施后，土壤摄入大量有效养分，加快微生物代谢活动，促进了秸秆的分解，秸秆分解残留的木质素与土壤腐殖质结合，进而使HA芳香性增加，结构变稳定。

### 4 结 论

秸秆深还配施化肥对有机碳的积累作用优于秸秆深还，更优于单施化肥；秸秆深还及配施化肥后表层和亚表层腐殖质各组分有机碳含量均显著提高，但PQ值没有显著变化。从元素分析和红外光谱来看，秸秆深还及秸秆配施化肥均能使HA的芳香结构比例增加，但CS处理还能同时增加脂族链烃的比例；而CS+NPK处理则使HA的缩合度提高，氧化度下降。说明CS和CS+NPK使HA稳定的机制有所不同，除了分子结构芳香性提高的作用以外，前者还体现在疏水性的提高上；而后者则体现在分子结构变复杂上。

### 参 考 文 献

- [1] 杨德志, 阳德华, 陈超, 等. 微生物发酵对油菜秸秆营养品质的影响. 贵州畜牧兽医, 2012, 35(1): 14—17  
Yang D Z, Yang D H, Chen C, et al. Effects of microbial fermentation on the nutritional quality of rape straw (In Chinese). Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2012, 35(1): 14—17
- [2] 翟利民. 秸秆深施还田蓄水效应与秸秆深施机性能的试验研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012  
Zhai L M. Experimental study on the impoundment effects of straw deep application and the properties of straw deep application machine (In Chinese). Haerbin: Northeast Agricultural University, 2012
- [3] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单. 科学通报, 2011, 56(3): 261—268  
Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2011, 56(3): 261—268
- [4] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算. 资源科学, 2006, 28(1): 9—13  
Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China (In Chinese). Resources Science, 2006, 28(1): 9—13

- [ 5 ] Roper M M, Ward P R, Keulen A F, et al. Under no-tillage and stubble retention, soil water content and crop growth are poorly related to soil water repellency. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 143—150
- [ 6 ] 牛新胜, 马永良, 牛灵安, 等. 玉米秸秆覆盖冬小麦免耕播种对土壤理化性状的影响. *华北农学报*, 2007, 22 ( B10 ): 158—163  
Niu X S, Ma Y L, Niu L A, et al. Effects of no-tillage planting for winter wheat with maize straw mulching on soil physicochemical properties ( In Chinese ). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22 ( B10 ): 158—163
- [ 7 ] 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. *应用生态学报*, 2010, 21 ( 2 ): 373—378  
Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 ( 2 ): 373—378
- [ 8 ] 区惠平, 何明菊, 黄景, 等. 稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响. *生态学报*, 2010, 30 ( 24 ): 6812—6820  
Ou H P, He M J, Huang J, et al. Effect of no-tillage and rice straw manuring on the combined forms of humus and microbial activities in paddy soil ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 ( 24 ): 6812—6820
- [ 9 ] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 ( 6 ): 1441—1449  
Zhao S C, Cao C Y, Li K J, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China ( In Chinese ). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 ( 6 ): 1441—1449
- [ 10 ] 刘冬云. 秸秆还田应用中存在问题及对策建议. *安徽农学通报*, 2014, 20 ( 11 ): 99—128  
Liu D Y. Problems and countermeasures of maize straws returning into soil ( In Chinese ). *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2014, 20 ( 11 ): 99—128
- [ 11 ] 崔婷婷, 窦森, 杨轶因, 等. 秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. *土壤学报*, 2014, 51 ( 4 ): 718—725  
Cui T T, Dou S, Yang Y N, et al. Effect of deep applied corn stalks on composition of soil humus and structure of humic acid ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 ( 4 ): 718—725
- [ 12 ] 王胜楠, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2015, 29 ( 1 ): 154—158.  
Wang S N, Zhou H T, Zhang Y L, et al. Effect of straw deep returning on the soil water features and soil organic carbon components ( In Chinese ). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 ( 1 ): 154—158
- [ 13 ] 殷世伟, 吴子帅, 张安存, 等. 麦秸还田埋深对水稻产量和品质的影响. *中国稻米*, 2014, 20 ( 1 ): 73—75  
Yin S W, Wu Z S, Zhang A C, et al. Effects of different straw incorporation depth on grain yields and qualities of rice ( In Chinese ). *China Rice*, 2014, 20 ( 1 ): 73—75
- [ 14 ] 朱姝, 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. *土壤学报*, 2015, 52 ( 4 ): 747—758  
Zhu S, Dou S, Chen L Z. Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 4 ): 747—758
- [ 15 ] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26 ( 6 ): 1785—1792  
Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 ( 6 ): 1785—1792
- [ 16 ] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆深翻还田对土壤有益微生物和土壤酶活性的影响. *干旱区资源与环境*, 2014, 28 ( 7 ): 138—143  
Sa R L, Gao J L, Yu X F, et al. Effect of straw deep incorporation on soil beneficial microorganism and soil enzyme activities ( In Chinese ). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28 ( 7 ): 138—143
- [ 17 ] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响. *土壤学报*, 2015, 52 ( 3 ): 665—672  
Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 3 ): 665—672
- [ 18 ] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000  
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* ( In Chinese ). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 19 ] 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. *Soil Science and Plant Nutrition*; 1967, 13 (5): 151—158
- [20] Kuwatsuka S, Watanabe A, Itoh K, et al. Comparison of twomethods of preparation of humic and fulvic acids, IHSS method and NAGOYA method. *Soil Science and Plant Nutrition*; 1992, 38 (1): 23—30
- [21] 朱青藤, 申连玉, 钱黎慧, 等. 有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (2): 396—403
- Zhu Q T, Shen L Y, Qian L H, et al. Effects of organic material application on the structures of humic acids in low yield paddy soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (2): 396—403
- [22] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010
- Dou S. *Soil organic matter* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19 (6): 703—707
- [24] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (4): 618—623
- Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (4): 618—623
- [25] 孙卫民, 杨滨娟, 钱海燕, 等. 秸秆还田配施不同配比化肥对晚稻产量及土壤肥力的影响. *农学学报*, 2012, 2 (12): 16—21
- Sun W M, Yang B J, Qian H Y, et al. Effects of returning rice straw to fields with different ratio of fertilizer on rice yield and soil fertility (In Chinese). *Journal of Agriculture*, 2012, 2 (12): 16—21
- [26] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 119—130
- [27] 于锐, 王其存, 朱平, 等. 长期不同施肥对黑土团聚体及有机碳组分的影响. *土壤通报*, 2013, 44 (3): 594—600
- Yu R, Wang Q C, Zhu P, et al. Effect of long-term fertilization on aggregate and fractions of organic carbon in black soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (3): 594—600
- [28] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (3): 587—592
- Sun X, Liu Q, Wang D J, et al. Effect of long-term application of straw on soil fertility (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (3): 587—592
- [29] 梁尧. 有机培肥对黑土有机质消长及其组分与结构的影响. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2012
- Liang Y. Effect of organic amendments application on dynamics; fractions and structural properties of soil organic matter in black soil (In Chinese). Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2012
- [30] Ingo L, Alexandra S H, Sonja B, et al. Aggregate dynamics and associated soil organic matter contents as influenced by prolonged arable cropping in the South African Highveld. *Geoderma*, 2011, 162: 251—259
- [31] Ferrari E, Francioso O, Nardi S, et al. DRIFT and HR MAS NMR characterization of humic substances from a soil treated with different organic and mineral fertilizers. *Journal of Molecular Structure*, 2011, 998: 216—224
- [32] Ghaffar S H, Fan M. Lignin in straw and its applications as an adhesive. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2014, 48: 92—101

## Effect of Deep Incorporation of Corn Stover Combined Chemical Fertilizer on Composition of Soil Humus and Structure of Humic Acid in Soil

ZHANG Yanhong DOU Sen<sup>†</sup> DONG Shanshan TAN Cen LI Libo LIN Chenming  
(College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract** Every year China produces huge volumes of crop straw, most of which, however, is burnt by the farmers in the fields. Burning of straw in open fields will not only reduce the contents of soil organic matter and soil moisture in the surface

soil layer, but also bring about environment pollution and damage human health. To apply corn stover deep into the subsoil layer (20 ~ 40 cm), namely "Corn stover deep incorporation" (CSDI), is believed to be able to effectively solve the problem of how to utilize crop residue as resource and a number of other problems caused by burning of crop straw and further on help sequester carbon, raise water holding capacity, improve soil fertility and stabilize crop yield. A field experiment was conducted in a mono-cropping corn field at the Experiment Station of the Jilin Agricultural University, with four treatments, that is, CK (no-corn stover incorporated), CS (CSDI), NPK (fertilizers applied only) CS+NPK (CSDI plus fertilizers application) designed to explore effects of corn stover deeply incorporated in addition to fertilizers application on composition of soil humus and structure of humic acid (HA) in the soil. Soil samples were collected from the four treatments for analysis of humus composition with the modified humus component extraction method and for structure of HA with the IHSS method for purification and the infrared spectroscopy for element composition. Results show that treatments CS and CS+NPK were conducive to accumulation of SOC and various humus fractions in all soil layers, but did not affect PQ (percentage of humic acid in humus) much. The two treatments increased the proportion of aromatic-C in HA, and Treatment CS also increased the proportion of aliphatic chain hydrocarbon in HA, while treatment CS+NPK raised the condensation degree and lowered the oxidation degree of HA, which means the two treatments differed in mechanism of making HA stable. Besides their effects of improving the aromaticity of HA in molecular structure, Treatment CS also enhanced hydrophobicity of HA, and Treatment CS+NPK made the structure of HA more complicated.

**Key words** Corn stover deep incorporation; Soil humus; Humic acid; Element composition; Infrared spectroscopy

(责任编辑: 卢 萍)