

范如芹, 罗佳, 严少华, 等. 长期免耕及常规耕作对土壤胡敏酸含量及其结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 80-86.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.01.012

长期免耕及常规耕作对土壤胡敏酸含量及其结构的影响

范如芹¹, 罗佳¹, 严少华¹, 杨学明², 张振华¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 加拿大农业与农业食品部温室与加工作物研究中心, 安大略 NOR 1G0)

摘要: 本研究以加拿大安大略省西南部长期田间定位试验黑土为研究对象, 对进行了 29 年传统耕作 (CT83)、29 年免耕 (NT83)、传统耕作 14 年后转为免耕 (NT97) 以及免耕 14 年后转为传统耕作 (CT97) 的土壤胡敏酸及其碳、氮含量进行了分析, 并运用红外光谱和核磁共振技术对胡敏酸结构进行了研究。结果表明, 随着耕作强度及年限的增加, 土壤胡敏酸及其 C 含量也增加; 免耕 14 年又改回传统耕作后胡敏酸及其碳、氮含量均显著提高, 胡敏酸氧化度和芳香度开始增加; 29 年免耕土壤的胡敏酸与 15 年免耕土壤相比在烷基碳、羧基碳和乙缩醛基碳含量中表现出明显差异。说明, 与免耕相比, 传统耕作促进了土壤腐殖化程度的提高, 使胡敏酸的结构趋于复杂。

关键词: 土壤有机碳; 稳定性; 耕作方式; 腐植酸; 芳香碳

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)01-0080-07

Content and structural features of humic acid in black soil affected by long-term no-tillage and conventional tillage

FAN Ru-qin¹, LUO Jia¹, YAN Shao-hua¹, YANG Xue-ming², ZHANG Zhen-hua¹

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture and Agri-food Canada, Ontario, NOR 1G0, Canada)

Abstract: To evaluate the effects of tillage history and changes of tillage practices on the content and structural features of humic acid (HA), a 29-year stationary field experiment was conducted in a black soil field in southwestern Ontario, Canada. The experiment was designed to have four tillage treatments with different tillage histories, i. e. a 29-year conventional tillage beginning from 1983 (CT83), a 29-year no-tillage beginning from 1983 (NT83), a 15-year no-tillage converted from a 14-year conventional tillage (NT97), a 15-year conventional tillage converted from a 14-year no-tillage

(CT97). Soil samples were collected from 0–10 cm soil depth and the contents of HA, and the carbon (HA-C) and nitrogen (HA-N) in HA were determined. Structural features of HA were analyzed using Fourier-transform infrared spectroscopic (FTIS) and Solid-state ¹³C NMR spectroscopic methods. The results showed that the contents of HA and HA-C increased with the increase of tillage age and tillage intensity. When the 14-year no-tillage was converted into conventional tillage, the contents of HA, HA-C, HA-N, as well as the oxidizability and aromaticity of

收稿日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401259); 中国博士后科学基金项目 (2014M551528); 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201203050); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX (14)2035]

作者简介: 范如芹 (1984-), 女, 山东沂南人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为无土栽培基质的配方研究。(Tel) 025-84390787; (E-mail) fanruqin2007@126.com。罗佳为共同第一作者。

通讯作者: 张振华, (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

HA started to increase. The contents of O-alkyl-C, carboxyl-C, and acetal-C in HA differed significantly in the soils of NT83 and NT97. The aromaticity of HA in the soils of NT83, NT97, CT97 and CT83 were 32.1%, 36.0%, 46.1% and 46.8%, respectively. The contents of microbial decomposition products were 37.2%, 22.9%, 21.0 and 20.9% in soils of NT83, NT97, CT97 and CT83, respectively, indicating that microbial activity in soils under long-term no-tillage is more active than that under conventional tillage. Accordingly, soil disturbance intensity tended to accelerate the aging of soil HA. Compared to no-tillage, conventional tillage promoted the humification of the soil and the complication of HA structure.

Key words: Soil organic carbon; stability; tillage; humic acid; aromatic carbon

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)对土壤性质和一系列土壤过程至关重要^[1-3],增加其含量不仅有助于维持土壤养分和农业可持续发展,而且有利于降低土壤 CO₂ 排放,减缓温室效应^[4]。在当今全球气候变化的大背景下,国际社会对农业土壤固定大气 CO₂ 日益关注,近年来关于农业土壤有机碳含量及稳定性的研究报道日渐增多,其中不同耕作方式下农田土壤作为碳“源”或碳“汇”的问题是关注的焦点。传统耕作(Conventional tillage, CT)方式下频繁的土壤扰动可致使土壤有机碳矿化或因土壤侵蚀而流失,最终导致农田土壤成为大气 CO₂ 的“源”^[5]。20 世纪 60 年代以来,保护性耕作因具有降低生产投入、保持水土、增加土壤肥力等优势而在世界许多地区陆续实施^[6]。免耕(No tillage, NT)作为保护性耕作的极端形式,在 CO₂ 等温室气体含量不断上升的背景下更是备受关注。研究结果表明,保护性耕作能够促进土壤有机碳固定,将 CT 转变为 NT 是增加农业土壤有机碳的有效措施之一^[7-8]。West 和 Marland^[9]对美国能源部的数据进行分析后指出,传统耕作转变为免耕后,美国的土壤固碳速率约为 300 kg/(hm²·a), C. Kern 和 Johnson^[10]指出,虽然由常规耕作转变为免耕并不能固定足够多的碳来抵消工业燃料燃烧释放的碳量,但 NT 的广泛应用将对缓解全球气候变化起到非常重要的作用。然而,也有大量研究发现,NT 和 CT 相比,并不能增加土壤有机碳固定^[11-12]。NT 对土壤有机碳的影响机制复杂,其结果会随耕作年限、土壤质地、气候条件等因子而变化。

另一方面,土壤有机碳的固定不仅包括其含量的增加,土壤有机碳质量或稳定性是至关重要的评价指标。活性的土壤有机碳组分在土壤中稳定性差,易矿化,且所占比例极低;腐殖质则是土壤有机碳的最大组成部分,它的形成与转化对土壤肥力、土壤固碳和环境解毒均有重要意义。其中,胡敏酸

(Humic acid, HA) 又是腐殖质中最活跃的组分,对土壤结构形成和土壤有机碳含量变化起重要作用^[13]。国内外学者大多针对不同施肥措施下胡敏酸的差异展开研究^[14-16],而对不同耕作管理方式引起的胡敏酸的变化研究还十分有限。吕贻忠等^[17]研究发现翻耕、旋耕以及深松等耕作方式下胡敏酸分子结构中各个基团的含量存在差异。目前对长期免耕下胡敏酸的含量和结构特征还了解甚少,仅赵红等^[18]报道了在中国东北黑土上 26 年的 NT 试验对黑土胡敏酸含量及结构的影响,而对于由 NT 转变为 CT 后胡敏酸的后续变化更是缺乏研究。

中红外光谱(Mid-infrared spectroscopy, MIRS)技术是通过测量分子对红外光吸收从而得到分子结构信息的一种检测方法,是土壤有机质特征分析的一个重要工具。核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)技术也是有机化合物结构研究中的重要研究手段,用 MIRS 研究腐殖质含氧功能团特性优于 NMR 光谱,而研究腐殖质结构则往往需要借助 NMR 技术^[19]。目前国际上利用 MIRS 进行农业土壤有机质性质如土壤有机碳结构稳定性的研究是土壤学领域的热点,在中国正处于刚刚起步且逐渐升温阶段。分析有机质结构稳定性最常应用于土壤腐殖质结构特性的研究。González-Pérez 等^[20]利用 NMR 和 MIRS 技术分析灰化土剖面的胡敏酸的结构特征,发现随着土层深度的增加,烷基碳含量增加,而醛基碳、芳香碳和酚碳含量降低,说明微生物生物量的亚甲基逐渐富集。顾志忙等^[21]对黑土、红壤、黄棕壤等不同土壤类型中腐殖酸进行了 MIRS 分析,综合比较了胡敏酸含量和腐殖化程度的差异。

本研究旨在综合利用 MIRS 和 NMR 技术研究土壤 HA 含量及结构对耕作方式改变的响应,分析长期免耕对土壤有机碳稳定性的影响,揭示农业管理措施转变引起的土壤有机碳的变化机制,为客观

评判保护性耕作和促进土壤有机碳固定提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区域与样品采集

长期耕作定位试验小区位于加拿大安大略省西南部的加拿大农业部 Eugene Whelan 实验站,土壤类型为 Brookston 壤质粘土,表层 15 cm 土壤砂粒、粉粒和粘粒所占百分比含量分别为 28%、35% 和 37% (美国制),土壤 pH 值介于 6.1 ~ 6.5。因为表层土壤坡度小于 1°,所以土壤侵蚀和表层土壤淋失在研究区可以忽略。耕作试验始于 1983 年秋,每个小区长 35 m 宽 12 m。耕作方式有免耕 (NT83) 和传统耕作 (CT83),为研究耕作方式改变对土壤的影响,从 1997 年起部分免耕小区改回传统耕作 (CT97),部分传统耕作小区改为免耕 (NT97)。种植方式为玉米连作和玉米-大豆轮作。土壤样品于 2012 年秋采集于玉米-大豆轮作的玉米种植小区。采样深度为土壤表层 10 cm,每个耕作处理 4 个重复。

1.2 胡敏酸 (HA) 提取与分析

1.2.1 胡敏酸提取纯化 将风干后的土壤样品除去肉眼可见砾石等杂质,取 500 g 用蒸馏水除去水溶物和水浮物,用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 混合液 (pH=13) 提取 1 h,3 500 r/min 离心 15 min,反复提取 3 次。向上述提取液中加入 0.5 mol/L H_2SO_4 调节 pH 为 1.0 ~ 1.5,沉淀即为胡敏酸。将分离得到的胡敏酸粗组分用 HCl (1 : 1) 调到 pH=7.0,高速离心 (8 000 r/min,20 min) 去除粘粒,反复溶解-沉淀 2 次。然后将其放入半透膜中透析,2 ~ 3 h 换一次水,用 AgNO_3 检测至出现少量白色沉淀。再转入电渗析仪中电渗析,至电流很小并阴极室无酚酞反应为止。将纯化完的样品进行旋转蒸发 (50 ~ 60 °C) 至体积很小,转入 50 ml 塑料小烧杯中,用冷冻干燥机进行冷冻干燥。

1.2.2 胡敏酸结构特征分析 对提纯的土壤胡敏酸组分进行中红外光谱和固体 ^{13}C -NMR 核磁共振测试。红外光谱仪器为傅立叶转换红外光谱仪 (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)。将样品研磨至小于 53 μm ,装入进样器并轻轻将表面压平,每个样品压至相同程度。测定空白为 KBr 压片,利用仪器 HTX 探测器测得样品的 MIR 光谱。扫描 64 次,

分辨率为 2 cm^{-1} ,扫描波数范围为 500 ~ 4 000 cm^{-1} 。固体 ^{13}C -NMR 光谱测定仪器为德国 Bruker 公司生产的 AV 400 固体 ^{13}C -NMR 波普仪,采用交叉极化-魔角旋转 (CP-MAS) 技术, ^{13}C 的共振频率为 100.57 MHz,魔角自旋频率为 5 KHz,样品的接触时间为 2ms,循环时间为 5 s,数据点为 2 048,参考标准为 $\delta_{\text{DSS}}=0$ 。

1.3 数据处理

采用 SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC) 软件 LSD 显著性差异检验进行均值比较和分析,用皮尔森 (Pearson) 相关系数进行相关性分析,采用 Sigma-Plot 12.0 (Systat Software, Inc., Chicago, IL, USA) 软件作图。

2 结果与分析

2.1 长期免耕及常规耕作下胡敏酸碳 (HA-C) 和胡敏酸氮 (HA-N) 含量

由表 1 可以看出,4 种耕作处理对胡敏酸含量以及胡敏酸中碳、氮的含量均产生了不同影响。其中胡敏酸含量在 CT83 处理的土壤 中为 11.1 g/kg,显著高于 NT97 处理、NT83 处理和 CT97 处理 ($P < 0.05$),NT97 处理与 CT97 处理没有显著差异,而 NT83 处理的胡敏酸碳含量则显著低于其他 3 种耕作处理,比 CT83 处理低 23.3%,可见长期免耕不利于胡敏酸的形 成。不同耕作方式下土壤中胡敏酸碳含量与胡敏酸含量差异呈现类似趋势,即 HA-C 含量 CT83 处理最高而 NT83 处理最低,不同的是,NT83 处理的土壤 中 HA-C 含量和 NT97 没有显著性差异 ($P > 0.05$);与 CT83 处理相比,CT97 处理对 HA-N 以及对胡敏酸中 C 和 N 百分含量均没有产生明显影响 ($P > 0.05$),但显著增加了胡敏酸及胡敏酸碳含量;而与 NT83 处理相比,CT97 处理的土壤胡敏酸及其碳含量均显著提高 ($P < 0.05$)。这与 Martins 等^[22]的研究结果一致。究其原因,一方面,免耕下每年大量秸秆还田,植物残体归还数量高于其代谢变化容量,可导致有机物质的强新陈代谢^[23],从而使有机质形成的脂肪化合物含量较高,半醌类自由基含量低,芳香碳含量低^[24]。传统耕作与之相反,作物秸秆收获导致输入土壤的新鲜物料减少,从而使得土壤的腐殖化程度较高;传统耕作下频繁的土壤扰动加剧了活性有机碳的分解矿化^[25],也是造成其土壤腐殖化程度较高的原因之一。

表1 不同耕作方式下土壤胡敏酸及其碳、氮含量

Table 1 Content of humic acid and its carbon and nitrogen concentrations in soils under different tillage managements in southwestern Ontario, Canada

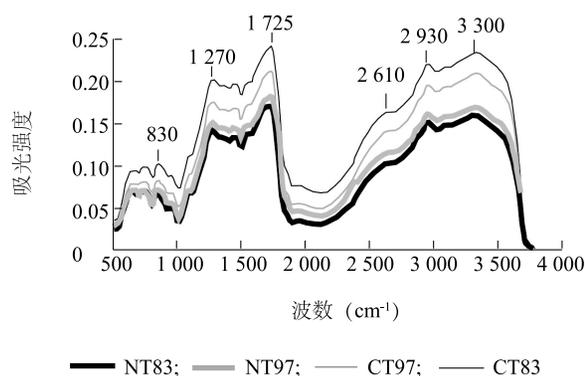
耕作方式	HA 含量 (g/kg, 干土)	HA-C 含量 (g/kg, 干土)	HA-N 含量 (g/kg, 干土)	HA 含碳百分比 (%)	HA 含氮百分比 (%)
NT83	8.52c	3.93c	0.37b	46.1b	4.33a
NT97	9.13b	4.31bc	0.39b	47.2ab	4.27a
CT97	9.43b	4.63b	0.42ab	49.1a	4.41a
CT83	11.1a	5.79a	0.48a	52.0a	4.29a

同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异。NT83 表示 1983 年开始免耕试验;NT97 表示 1983 年开始传统耕作试验 1997 年改为免耕;CT83 表示 1983 年开始传统耕作试验;CT97 表示 1983 年开始免耕试验 1997 年改回传统耕作。

2.2 长期免耕及常规耕作下胡敏酸结构稳定性特征

从图 1 可知,不同耕作处理下土壤胡敏酸在 $3\ 300\ \text{cm}^{-1}$ (N-H 和 O-H 伸缩振动)、 $2\ 930\ \text{cm}^{-1}$ ($>\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 基团中 C-H 键反对称伸缩振动)、 $2\ 610\ \text{cm}^{-1}$ (羧基的 C-O 对称伸缩振动)、 $1\ 725\ \text{cm}^{-1}$ ($>\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动)、 $1\ 270\ \text{cm}^{-1}$ (羧基中 C-O 伸缩和 O-H 变形振动及醚类芳基伸缩振动)以及 $830\ \text{cm}^{-1}$ (芳香 C-H 平面弯曲振动)处的吸收峰明显^[26-28],说明各耕作处理下土壤胡敏酸基本结构较为一致。 $3\ 000\sim 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 处的宽吸收带面积表现为 CT83 与 CT97 明显大于 NT97 与 NT83,说明前者的聚合-OH 含量高于后者^[29]。 $2\ 610\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 725\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 270\ \text{cm}^{-1}$ 以及 $830\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收带也表现为随耕作强度增加,吸收强度增加的趋势 (CT83>CT97>NT97>NT83),可见胡敏酸氧化程度和芳香度随耕作扰动强度的增加而增加,长期免耕使土壤胡敏酸氧化度和芳香度趋于降低。吕贻忠等^[17]通过黑土胡敏酸的红外光谱分析结果表明,翻耕处理下黑土胡敏酸的芳香化程度高于保护性耕作,且保护性耕作下胡敏酸的脂肪性支链增加可改变腐殖酸亲水性能,并指出土壤腐殖质结构的演变将对土壤肥力产生重要影响,有必要利用其他光谱手段更深入地揭示不同耕作措施对土壤腐殖质结构的影响。

因此,为了更为精确地研究不同耕作方式对胡敏酸结构特征的影响,我们借助¹³C-NMR 方法对其各官能团吸收强度进行了分析(图 2)。不同耕作处理下土壤胡敏酸的核磁共振谱图可分为烷基碳(80-45)、甲氧基碳(845-65)、烷氧碳(865-90)、乙缩



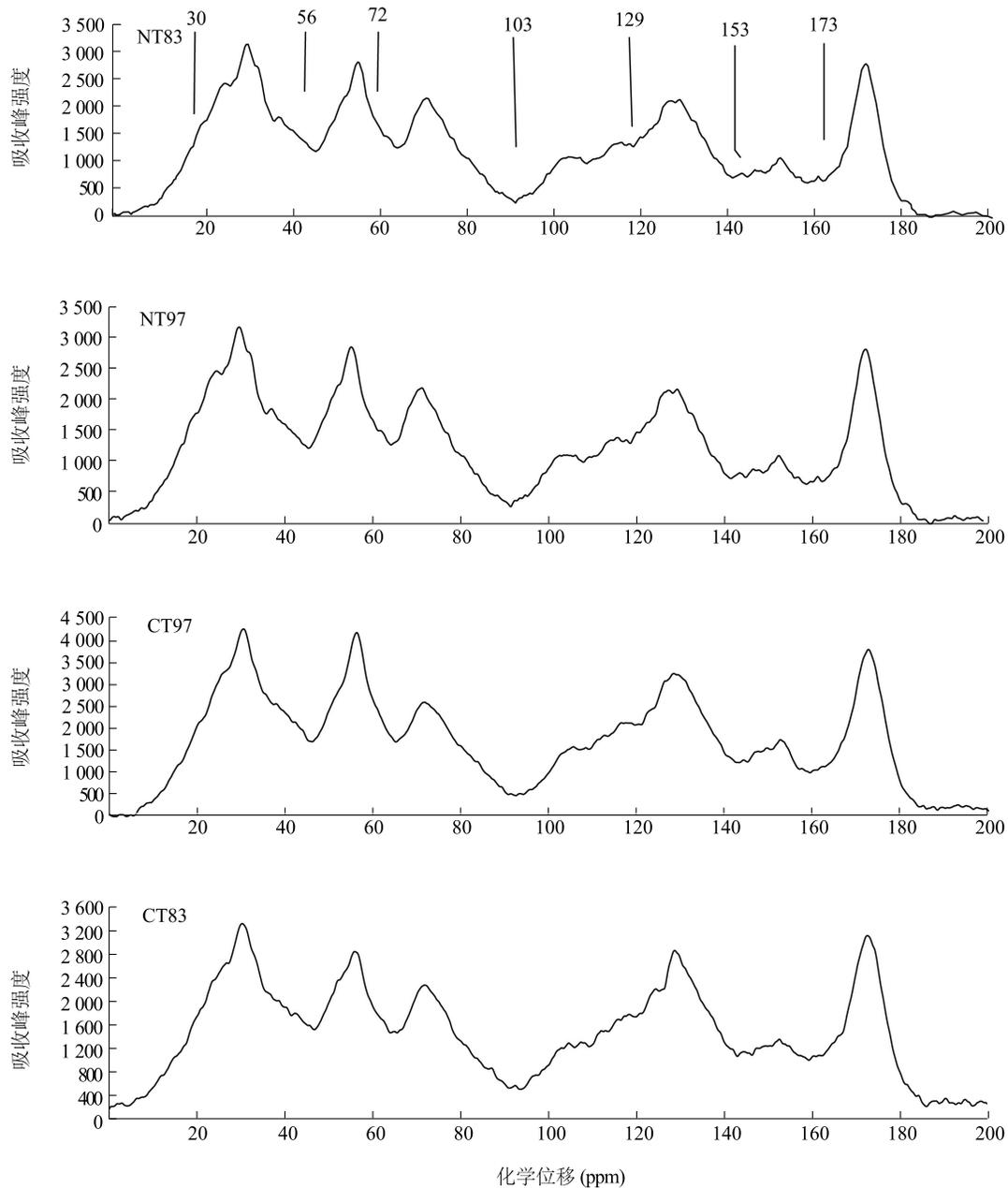
各处理见表 1 注。

图 1 不同耕作方式下土壤胡敏酸中红外光谱

Fig. 1 MIR spectra of humic acid in soils under different tillage managements

醛基碳($\delta 90-110$)、芳香碳($\delta 110-145$)、酚氧碳($\delta 145-160$)和羧基碳($\delta 160-185$)7 个共振区域,其中乙缩醛基碳($\delta 90-110$)和酚氧碳($\delta 145-160$)的共振信号相对不明显。

进一步对各区域出现的位移信号进行计算(表 2)可知,NT97 处理和 NT83 处理的土壤胡敏酸不同有机功能团的相对含量大小为:烷基碳、甲氧基碳和烷氧基碳含量明显高于乙缩醛基碳、芳香碳、酚氧碳和羧基碳。NT83 处理的烷基碳和甲氧基碳含量显著高于 CT97 处理和 CT83 处理,其芳香碳和酚氧碳的含量则显著低于 CT97 处理和 CT83 处理 ($P<0.05$)。NT83 处理与 NT97 处理土壤胡敏酸在烷基碳、羧基碳和乙缩醛基碳含量中表现出明显差异。与



各处理见表1注。

图2 长期免耕和常规耕作下土壤胡敏酸的 ^{13}C -NMR谱图

Fig. 2 ^{13}C -NMR spectra of HA in soils under long-term no tillage and conventional tillage

NT83 相比, CT97 处理的土壤胡敏酸中除烷基碳外, 其他官能团含量均发生了显著变化, 脂肪族碳含量大幅度降低而芳香碳比例显著增加。本研究结果不同于申艳^[30]在中国东北黑土上的研究结果, 其原因可能是其所研究的土壤为短期免耕, 耕作方式对胡敏酸结构造成的影响还没有开始显现。NT83、NT97、CT97 和

CT83 下胡敏酸芳香度分别为 32.1%、36.0%、46.1% 和 46.8%, 即长期免耕下胡敏酸芳香度显著低于长期传统耕作, 而脂化度则相反。这说明耕作扰动加速了土壤腐殖质的缩合和氧化, 使土壤胡敏酸老化, 结构变得复杂, 脂族性下降, 芳香性增加, 这与孙本华等^[31]的研究结论一致。

表2 长期免耕和常规耕作下土壤胡敏酸不同官能团碳的相对含量

Table 2 Relative contents of carbon functional groups of HA in soils under long-term no tillage and conventional tillage

官能团	共振区域(ppm)	官能团碳相对含量(%)			
		NT83	NT97	CT97	CT83
烷基碳	0~45	24.1a	19.3b	14.1c	13.1c
甲氧基碳	45~65	18.6a	15.3ab	11.4b	12.5b
烷氧基碳	65~90	19.5a	23.2a	24.5a	22.8a
乙缩醛基碳	90~110	6.3b	12.1a	11.4a	6.8b
芳香碳	110~145	10.7b	12.1b	21.4a	25.9a
酚氧碳	145~160	7.7b	10.3a	10.1a	11.9a
羧基碳	160~185	13.1a	7.6b	6.8b	7.8b
芳香度%	-	32.1b	36.0b	46.1a	46.8a
脂化度%	-	67.9a	64.0a	53.9b	53.2b

各处理见表1注。芳香度 = (芳香碳 + 酚氧碳) × 100 / (烷基碳 + 甲氧基碳 + 烷氧基碳 + 乙缩醛基碳 + 芳香碳 + 酚氧碳); 脂化度 = 100 - 芳香度; 同一行不同小写字母表示不同耕作方式之间在 0.05 水平上有显著差异。

NT83 中微生物分解后的产物(烷基碳和羧基碳)占 37.2%,木质素(芳香碳、酚基碳)占 18.4%,碳水化合物(包括甲氧基碳、烷氧基碳和乙缩醛基碳)占 44.4%,可见土壤胡敏酸是以碳水化合物结构为核心形成的。NT83、NT97、CT97 和 CT83 处理下胡敏酸微生物分解产物含量分别为 37.2%、22.9%、21.0 和 20.9%,表明长期免耕下微生物分解后的产物显著高于传统耕作,且随耕作强度增加其含量逐渐降低,这说明长期免耕下微生物活动明显比传统耕作活跃,耕作扰动降低了微生物的活性。NT83、NT97、CT97 和 CT83 下胡敏酸木质素含量所占的比例分别为 18.4%、26.4%、31.6% 和 36.9%,可见随着耕作强度的增加,微生物分解产物有向木质素转化的趋势。

3 结论

耕作年限与耕作方式对土壤中胡敏酸及胡敏酸碳产生重要影响。随着耕作强度或耕作年限的增加,土壤中胡敏酸及胡敏酸碳也增加,与 NT83 相比,NT97 土壤胡敏酸含量显著提高。与免耕相比,传统耕作促进了土壤腐殖化程度的提高。胡敏酸氧化程度和芳香度亦随耕作扰动强度的增加而增加,长期免耕使土壤胡敏酸氧化度和芳香度趋于降低,免耕转变为传统耕作后,胡敏酸氧化度和芳香度开始增加。土壤胡敏酸烷基碳和羧基碳含量随免耕年限增长而增加。长期免耕下微生物分解后的产物显著高于传统耕作。以上结果说明,耕作扰动提高了

土壤的腐殖化程度,加速了土壤胡敏酸的缩合和氧化,使土壤胡敏酸老化,结构趋于复杂,而免耕则有助于提高土壤微生物活性,并使土壤胡敏酸脂族性提高。

参考文献:

- [1] BERTOR C,ZAVATTARO L,SACCO D,et al. Soil organic matter dynamics and losses in manured maize-based forage systems[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009,30:177-186.
- [2] 高杨,胡振琪,肖武,等.造林对土壤有机碳储量的影响(综述)[J]. *江苏农业科学*,2014,42(5):301-305.
- [3] 滕维超,刘少轩,刘新亮,等.不同种植模式对油茶成林土壤有机碳及养分特征的影响[J]. *江苏农业科学*,2013,41(5):323-326.
- [4] ÁLVARO-FUENTES J,CANTERO-MARTINEZ C,LÓPEZ M V,et al. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects of management in Semiarid Mediterranean agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2009,73:1519-1529.
- [5] BAYER C,MIELNICZUK J,AMADO T J C,et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000,54:101-109.
- [6] SIX J,FELLER C,DENEF K,et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage[J]. *Agronomy*,2002,22:755-775.
- [7] BALOTA E L,COLOZZI F A,ANDRADE D S,et al. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol[J]. *Soil and Tillage Research*,2004,77:137-145.
- [8] JACOBS A,RAUBER R,LUDWIG B. Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years

- [J]. *Soil and Tillage Research*,2009,102:158-164.
- [9] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002,91:217-232.
- [10] KERN J S, JOHNSON M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1993,57:200-210.
- [11] YANG X M, DRURY C F, REYNOLDS W D, et al. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008,100:120-124.
- [12] MARCHÃO R L, BECQUER T, BRUNET D, et al. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems [J]. *Soil and Tillage Research*,2009,103:442-450.
- [13] 龚伟,颜晓元,王景燕,等.长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2009,15(6):1245-1252.
- [14] 窦森,徐冰,孙宏德.黑土有机培肥与腐殖质特性[J]. *吉林农业大学学报*,1995,17(1):46-51.
- [15] 马力,杨林章,慈恩,等.长期施肥条件下水稻土腐殖质组成及稳定性碳同位素特性[J]. *应用生态学报*,2008,19(9):1951-1958.
- [16] FERRARI E, FRANCIOSO O, NARDI S, et al. DRIFT and HRMAS NMR characterization of humic substances from a soil treated with different organic and mineral fertilizers [J]. *Journal of Molecular Structure*,2011,998:216-224.
- [17] 吕贻忠,丛巍巍,廉晓娟.不同耕作措施对黑土腐殖酸组成与红外光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*,2009,29(10):2642-2645.
- [18] 赵红,郑殷恬,吕贻忠,等.免耕与常规耕作下黑土腐殖酸含量与结构的差异[J]. *生态环境学报*,2010,19(5):1238-1241.
- [19] 李学垣. *土壤化学*[M]. 北京:高等教育出版社,2001:33-40.
- [20] GONZÁLEZ-PÉREZ M, MARTIN-NETO L, SAAB S C, et al. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C-NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy[J]. *Geoderma*,2008,118:181-190.
- [21] 顾志忙,王晓蓉,顾雪元,等.傅里叶变换红外光谱和核磁共振法对土壤中腐殖酸的表征[J]. *分析化学研究简报*,2000,28(3):314-317.
- [22] MARTINS T, SAAB S C, MILORI D M B P, et al. Soil organic matter humification under different tillage managements evaluated by Laser Induced Fluorescence (LIF) and C/N ratio [J]. *Soil and Tillage Research*,2011,111:231-235.
- [23] BAYER C, MARTIN-NETO L, MIELNICZUK J, et al. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies[J]. *Geoderma*,2002,105(1-2):81-92.
- [24] PÉREZ M G, MARTIN-NETO L, SAAB S C, et al. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy [J]. *Geoderma*,2004,118(3-4):181-190.
- [25] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J S, et al. Recalcitrant and labile carbon pools in a sub-humid tropical soil under different tillage combinations: A case study of rice - wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*,2014,143:116-122.
- [26] BAES A U, BLOOM P R. Diffuse reflectance and transmission Fourier transformation infrared (DRIFT) spectroscopy of humic and fulvic acids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989,53:695-700.
- [27] STEVENSON F J. *Humus chemistry-genesis, composition, reactions.* [M]. New York :John Wiley & Sons,1994.
- [28] RUMPEL C, JANIK L J, SKJEMSTAD J O, et al. Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares[J]. *Organic Geochemistry*,2001,32:831-839.
- [29] 慈恩,杨林章,程月琴,等.耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响[J]. *土壤学报*,2008,45(5):950-956.
- [30] 申艳.基于光谱技术的黑土有机碳及其组分的定量与结构分析[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2010.
- [31] 孙本华,高明霞,吕家珑,等.农田生态条件对荒漠土养分及胡敏酸特性的影响[J]. *中国生态农业学报*,2007,15(3):18-20.

(责任编辑:陈海霞)