

耕作措施对土壤有机碳稳定性的影响 ——以黑龙江省与吉林省典型地区为例

顾秋蓓, 杨琼, 余涛, 杨忠芳

(中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 采用传统的化学方法、红外光谱(IR)技术和固态¹³C核磁共振(NMR)技术, 研究黑龙江与吉林土壤有机碳的含量及结构特征, 探讨耕作措施对不同地区土壤有机碳稳定性的影响。研究表明: 短期免耕耕作处理并没有显著增加土壤有机碳含量。但与免耕前相比, 免耕后土壤有机质的脂族性减弱, 稳定碳/不稳定碳的比值增加, 免耕后土壤胡敏素中烷基C/烷氧C和疏水C/亲水C的比值均呈增加趋势, 疏水程度增加。因此, 短期免耕虽然不能显著增加土壤有机碳含量, 但是能够增强土壤有机碳的稳定性。

关键词: 红外光谱; 固态¹³C核磁共振; 耕作措施; 胡敏素; 黑龙江; 吉林

中图分类号: X142; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2016)02-0463-07

Effect of Tillage Treatments on Soil Organic Carbon Stability— In Case of the Typical Area in Heilongjiang and Jilin Provinces

GU Qiubei, YANG Qiong, YU Tao, YANG Zhongfang

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the chemical content and structure of soil organic carbon (SOC) were studied by using chemical analysis, Infrared Spectroscopy (IR) and Solid-state ¹³C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy in Heilongjiang and Jilin provinces. And the effects of different tillage treatments on soil organic carbon stability in different regions were investigated. The results showed that the contents of SOC were not significantly increased in this study. However, comparing with tillage, aliphatic carbon contents in the SOC decreased, and the proportion of stable/unstable carbon increased. After no-tillage treatment, A/O—A and Hydrophobic C/Hydrophilic C of humin obviously increased, and Hydrophobicity improved. Although SOC content cannot significantly increase, the stability of SOC could be enhanced by the short term no-tillage.

Key words: Infrared Spectroscopy; Solid-state ¹³C Nuclear Magnetic Resonance; tillage treatment; humin; Heilongjiang; Jilin

0 引言

土壤是陆地生态系统的重要组成部分^[1]。土壤碳库可以通过植物光合作用、微生物分解作用

和土壤碳呼吸作用实现土壤碳汇与碳源的转化^[2]。一些学者研究表明, 土壤碳库大约是大气碳库(760 Pg)的2~3倍, 是植物碳库(560 Pg)的4.5倍^[3-4]。因此, 土壤碳库的微小波动就可

收稿日期: 2015-03-18; 改回日期: 2015-11-17; 责任编辑: 楼亚儿。
基金项目: 国土资源部行业基金项目(200911020); 中国地质调查局项目(1212011087125); 教育部基本科研业务费优秀导师基金项目(2652015433)。
作者简介: 顾秋蓓, 女, 硕士研究生, 1990年出生, 地球化学专业, 主要从事环境地球化学研究。Email: qiubeigu@163.com。
通信作者: 杨忠芳, 女, 教授, 博士生导师, 1961年出生, 地球化学专业, 主要从事环境地球化学、生态地球化学、勘查地球化学和土地质量地球化学评估等方面的研究与教学工作。Email: zfyang01@126.com。

能对大气 CO₂ 浓度甚至全球碳平衡产生巨大的影响^[5]。

土壤有机碳不仅在地球表生系统的碳循环中具有重要作用,而且也是表征土壤肥力的重要指标^[6]。在土壤有机碳影响因素中,主要有降水量、年均气温等气候条件,同时土壤 pH(土壤酸碱度)、CEC(阳离子交换量)等土壤理化性质,土壤铁铝氧化物和粘土矿物等土壤矿物成分^[7-13],以及耕作方式^[14]也是影响土壤有机碳含量及稳定性的主要因素。与传统耕作措施相比,保护性耕作措施可以提高土壤有机碳积累^[15-17]。保护性耕作措施是对农田实行免耕、少耕,并用作物残茬覆盖地表,减少土壤风蚀、水蚀,改善土壤肥力和提高抗旱能力的一项先进农业耕作技术^[18]。而传统的耕作方式因破坏了土壤的团聚体结构,使有机碳失去保护而暴露出来^[19],从而加速了有机质的分解,使土壤有机碳含量下降。

土壤有机碳稳定性是指土壤有机碳在当前条件下抵抗干扰和恢复原有水平的能力^[20]。土壤有机碳稳定性的影响因素包括人为因素和自然因素,也称为可控因素和不可控因素。人为因素主要指土地利用方式和耕作方式的改变,它们是通过影响或改变土壤物理结构、生态系统生产力、土壤微生物、土壤团聚体等间接影响土壤有机碳稳定性^[20]。为了研究正常耕种和 2 年免耕对土壤有机碳稳定性的影响,本文选择黑龙江省双城市黑土和吉林省永吉县暗棕壤为研究对象,开展耕作措施对土壤有机碳含量及稳定性的影响研究,研究结果将为增加农田土壤碳汇、提高土壤肥力提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区位于黑龙江双城市和吉林省永吉县境内(图 1),黑龙江双城市研究区纬度 45°08′,经度 125°41′。双城市地处松嫩平原腹地,年均气温为 3.5℃,无霜期 140 天,年均降水量为 180 mm,主要土壤类型为黑土,种植作物为玉米和大豆,种植方式是常规耕作 1 年,免耕 2 年;吉林省永吉县研究区纬度 43°40′,经度 126°30′。永吉县气候属北温带大陆性干寒季风型气候,其特点是四季分明,年均气温 7.6℃,无霜期 130 天,年均降雨量 690 mm,主要土壤类型为暗棕壤,种植作物为玉米和水稻,种植方式是常规耕作 1 年,免耕 2 年。上述两种土壤基本理化性质,采用多目标区域地球化学调查数据,如表 1 所示。

表 1 研究区土壤基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soil in the study area

类型	数据个数	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	N	P	pH
黑龙江黑土	804	13.95	4.35	1.36	0.63	7.42
吉林暗棕壤	1 267	13.43	4.68	1.67	0.73	6.14

注: Al₂O₃ 和 ΣFe₂O₃ 单位为%, pH 无量纲, N 和 P 单位为 g·kg⁻¹。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

综合考虑土壤类型、成土母质、地块大小、地形地貌等因素,在黑龙江双城市和吉林永吉县各选择 20 个样地(即采样地块),第一年为正常耕作,样品数为 40 件;在上述两个工区,各选择 5

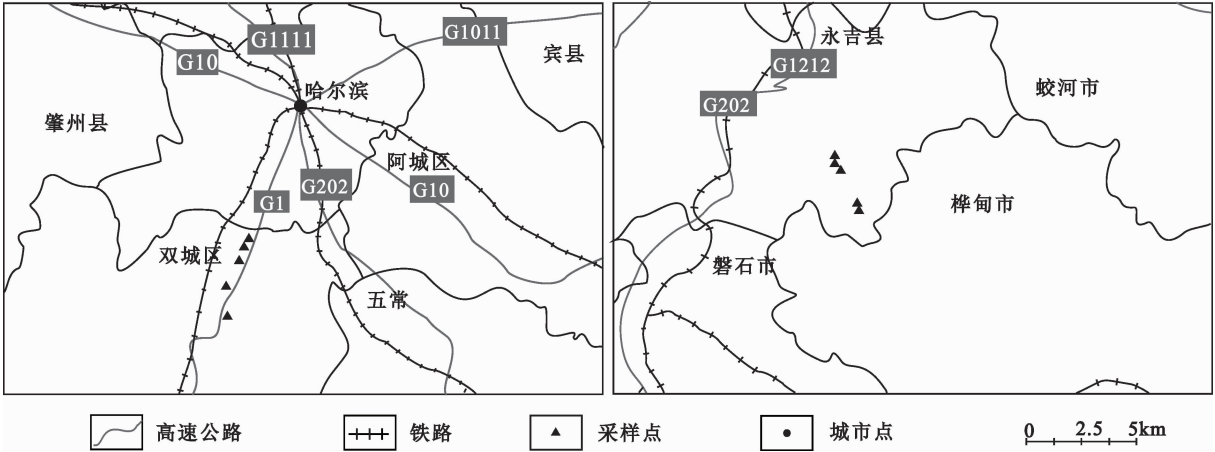


图 1 研究区采样点位置图
Fig. 1 Sampling sites of the study area

块样地(15 m×20 m)免耕2年后(图1),各采集5件样品,免耕2年后的样品合计为10件,采样点具体信息如表2所示;土壤样品在采集时,采样点均选择在采样地块中间部位,离主干公路至少500 m和明显的污染地段1 000 m以上,采样时间在每年9—10月,避开雨天。用木铲采集0~20 cm的土壤,每件样品由3~5个子样等份混合,土壤重量约5 kg,将土壤样品盛装于干净布袋中,如果样品比较湿,就在布袋外面加套一个自封袋。

样品采集时,采用手持GPS记录采样点的空间信息,并记录地貌类型、灌溉条件、土壤温度、湿度、施肥种类及用量、种植制度及轮作方式、秸秆处理方式、撂荒时间等信息。

2.2 样品前处理

2.2.1 野外样品加工

采集后的土壤置于干净、无污染的晾晒场地进行自然风干,在风干过程中,适时翻动,并将大土块用木棒敲碎防止土壤结块,加速干燥,同时剔除土壤以外的杂物。进行土壤有机碳固态¹³C核磁共振测试(NMR)的样品和中红外光谱测试的

样品要全部依次通过2 mm、0.25 mm和0.053 mm孔径筛,再送实验室处理。

2.2.2 中红外光谱测试样品前处理

取适量过筛后的土壤进行中红外测试,样品采用压片法制备。样品与KBr的混合比例一般为1:100,压片时先将固体试样置于玛瑙钵中研细,然后加KBr粉末,研磨混合均匀后移入压片模具,抽真空,加压几分钟。混合物在压力下形成一透明小圆片,便可直接上机测试。

2.2.3 土壤有机碳官能团测试的样品前处理

由于土壤中有机质含量较低,且成分非常复杂,因此进行土壤有机碳官能团测试前需对样品进行土壤有机碳提纯,实验工作流程见图2所示。

(1)用0.1 mol·L⁻¹焦磷酸钠和0.1 mol·L⁻¹氢氧化钠混合液提取腐殖酸:称取5.00 g土壤样品放入200 mL三角瓶中,加入100 mL混合提取液,用橡皮塞塞紧后在震荡机上震荡6小时,然后静置15~20小时(20℃)。随之加入少量结晶硫酸钠(5 g左右)将溶液再次摇匀后离心(转速200 r/min),将上层清液倒入100 mL三角瓶待测;

表2 采样点具体信息
Table 2 The details of sampling location

纬度	经度	采样地点	采样时间		常规耕作
			种植植物	免耕	
45.54°	126.46°	黑龙江省双城市新兴乡兴胜村	2010-09	2012-09	玉米
45.52°	126.45°	黑龙江省双城市新兴乡兴胜村	2010-09	2012-09	玉米
45.50°	126.43°	黑龙江省双城市幸福乡厢黄四屯	2010-09	2012-09	土豆
45.47°	126.38°	黑龙江省双城市幸福乡久原村	2010-09	2012-09	大豆
45.42°	126.37°	黑龙江省双城市长产村	2010-09	2012-09	玉米
43.47°	126.49°	吉林省吉林市永吉县五里河镇五一村	2010-09	2012-09	玉米
43.46°	126.49°	吉林省吉林市永吉县五里河镇五二村	2010-09	2012-09	水稻
43.44°	126.50°	吉林省吉林市永吉县五里河镇朝阳村	2010-09	2012-09	玉米
43.38°	126.52°	吉林省吉林市永吉县五里河镇向阳村八组	2010-09	2012-09	水稻
43.37°	126.52°	吉林省吉林市永吉县五里河镇向阳村八组	2010-09	2012-09	玉米

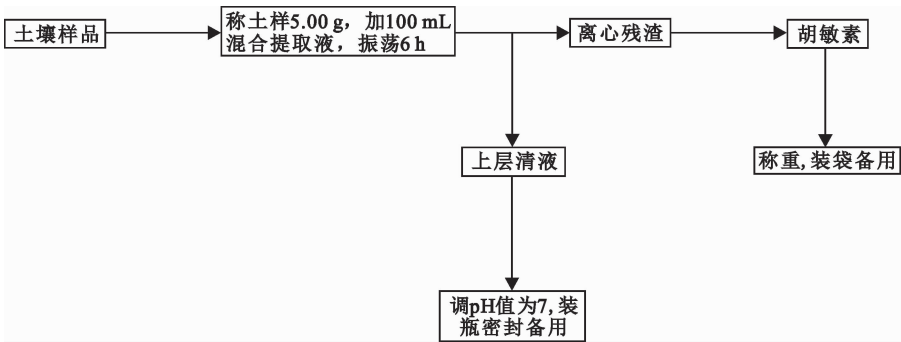


图2 土壤有机碳提纯流程图

Fig. 2 The flow chart of soil organic carbon purification

(2)胡敏酸(HA)和富里酸(FA)的分离:吸取提取液 10 ~ 50 mL(视提取液颜色深浅而定)于 100 mL 烧杯中再逐滴加入 0.5 mol · L⁻¹ 硫酸,将溶液 pH 调到 7,装瓶摇匀密封备用;

(3)胡敏素的分离:将离心管中的残渣用 0.025 mol · L⁻¹ 硫酸洗 1 次,用蒸馏水洗数次,直到离心后溶液仍混浊为止,同时用 pH 试纸测定是否为中性。将混浊液连同土壤一并洗入已称重的蒸发皿中,于沸水浴上蒸干,称重。将已知质量的土样移入自封袋中备用。

将提纯得到的胡敏素样品进行核磁共振测试。

2.3 样品测试方法与质量监控

土壤有机碳含量的测试单位为国土资源部合肥矿产资源监督检测中心,测试仪器为红外碳硫仪。土壤有机碳官能团测试是在北京大学分析测试中心完成的,其中红外光谱(IR)是在傅里叶变换红外光谱仪上测定,测试仪器为瑞士 Bruker 公司 VECTPR 22 型傅里叶变换红外光谱仪。光谱测试范围为 4 000 ~ 400 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 64 次;固态¹³C 核磁共振(NMR)是在 Bruker 400 MHz 固体核磁共振谱仪上测定,测试仪器为瑞士 Bruker 公司 AVANCE III 型 Bruker 400 MHz 宽腔傅里叶变换核磁共振仪,可提供 400 MHz 的电波,用 100.65 MHz 来观察¹³C,主要配件:WVT 4 mm CP/MAS double resonance probehead。土壤有机碳含量采用国家一级标样(标样编号为 GSS17, GSS19, GSS21, GSS24 共 4 件)、密码样(密码样数量占样品总量的 10%)等进行分析质量的准确度和精密度控制,其有机碳检出限为 0.1%,有机碳测试数据的准确度为 0.005,精密密度为 3.49%。

2.4 数据处理

用 Arcgis 处理空间栅格数据,将野外实测坐标赋值于每个采样点;用 MestReNova 软件处理核磁数据,对 4 个共振区分别积分,得出积分值;再利用 Microsoft Excel 软件整理数据和 Origin 软件作图。本文红外光谱分析以吉林研究区为例,核磁共振光谱分析以黑龙江为例。

3 结果与讨论

3.1 耕作措施对不同地区土壤有机碳含量的影响

免耕前:黑龙江双城市土壤有机碳含量为(15.54 ± 1.88) g/kg,而吉林省永吉县土壤有机碳含量为(25.08 ± 5.82) g/kg;免耕后:黑龙江双城

市土壤有机碳含量为(15.00 ± 1.17) g/kg,而吉林省永吉县土壤有机碳含量为(24.12 ± 6.61) g/kg。免耕前后两个研究区土壤有机碳含量无显著变化,这与 Al-kaisi、Freibauer A 和 McCarty G 等的研究结果一致^[21-23],他们研究的结果显示,短期(2 ~ 5 年)免耕并不能显著提高土壤有机碳含量。因为免耕时间短,表层土壤得到的植物残体输入数量有限,而土壤碳循环则是一个漫长的过程,所以在短时间内土壤有机碳含量变化不大。

3.2 红外光谱分析

吉林省永吉县研究区的土壤有机碳红外光谱分析如图 3 所示。土壤有机碳在 3 440 cm⁻¹处有明显的吸收峰,表明有聚合—OH 存在,氢键愈强,则 O—H 键愈长,振动频率愈低,峰也更宽更强^[24];2 920 cm⁻¹处出现明显的小峰,表明有脂肪族的—CH₂ 中 C—H 键的伸缩振动^[24];1 620 cm⁻¹处也存在较强吸收,说明有芳香结构或羧基存在^[25-26];1 030 cm⁻¹处的吸收峰归属于碳水化合物 C—O 键及硅酸盐类 Si—O 键的伸缩振动,表明其可能含有多糖类物质^[24](如纤维素等)。

如表 3 所示,随着粒径减小,土壤有机碳在 3 440 cm⁻¹、2 920 cm⁻¹、1 620 cm⁻¹以及 1 030 cm⁻¹处的吸光度降低,说明土壤粒径 > 0.25 mm 中有机碳积累量最大,土壤粒径 > 0.25 mm 有机碳含量对全土的有机碳贡献率高于粒径 0.053 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm,与黄雁飞等人^[27]的研究结果一致。在粒径 > 0.25 mm 的土壤中,免耕前 3 440 cm⁻¹、2 920 cm⁻¹、1 620 cm⁻¹和 1 030 cm⁻¹处的吸光度小于免耕后,与彭义等人的研究结果一致,其结果为免耕无覆盖与常规垄作相比,土壤有机碳组分中碳水化合物、芳香族碳、脂肪族碳相对居多^[28],因为常规耕作破坏大粒径土壤结构,使土壤有机碳失去保护而暴露出来^[29],与空气接触增多,使得有机碳分解速度加快^[28],说明免耕措施有利于粒径 > 0.25 mm 中土壤有机碳积累;免耕前 1 620/2 920 的比值小于免耕后,而 1 620/2 920 的比值与稳定碳/不稳定碳呈正相关^[30],说明免耕后土壤有机碳的脂族性减弱,芳香性增加,土壤有机碳的稳定性提高。在粒径 0.053 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm 的土壤中,免耕前 3 440 cm⁻¹、2 920 cm⁻¹、1 620 cm⁻¹、1 030 cm⁻¹处的吸光度和 1 620/2 920 的比值大于免耕后,因为耕作措施对小粒径土壤中有机碳的影响不显著,并且免耕后土壤得不到土壤表面植物残体的补充,

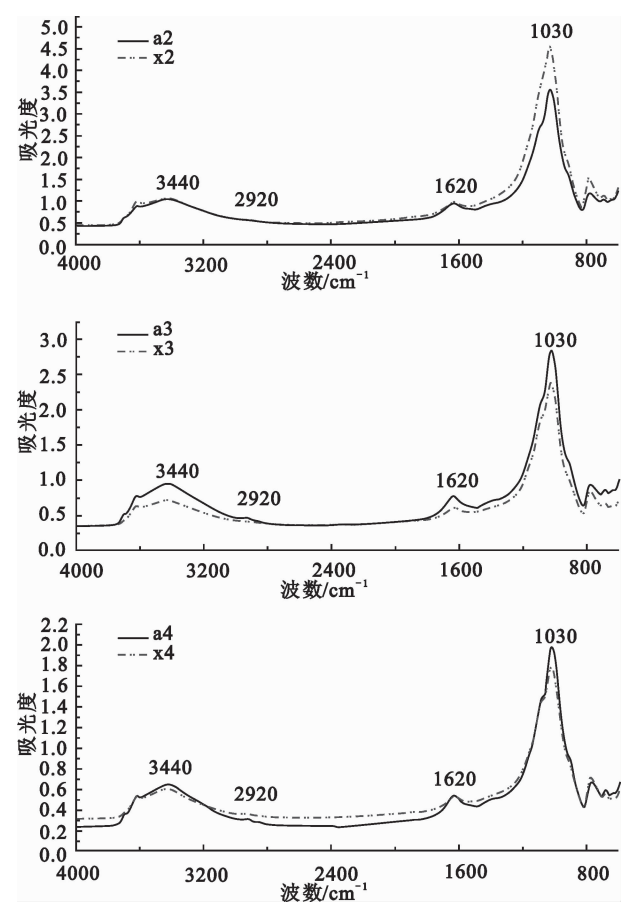


图 3 不同耕作措施下土壤有机碳的红外光谱

Fig. 3 The IR spectrum of soil organic carbon with various tillage treatments

注：a2 和 x2 为土壤粒径 >0.25 mm，a3 和 x3 为土壤粒径 0.053 ~ 0.25 mm，a4 和 x4 为土壤粒径 <0.053 mm；a 代表常规耕作 1 年，x 代表免耕 2 年

所以免耕后碳水化合物、芳香族碳、脂肪族碳相对减少，脂族性和稳定性减弱。综上所述，免耕措施不仅利于土壤有机碳的积累，而且还利于提高土壤有机碳的稳定性。

表 3 土壤有机碳中不同类型碳的吸光度		波数/cm ⁻¹					
耕作方式	粒径/mm						
		3 440	2 920	1 620	1 030	1 620/2 920	
常规耕作 1 年	>0.25	1.05	0.58	0.94	3.57	1.64	
免耕 2 年	>0.25	1.07	0.58	0.97	4.57	1.69	
常规耕作 1 年	0.053 ~ 0.25	0.95	0.47	0.75	2.83	1.61	
免耕 2 年	0.053 ~ 0.25	0.72	0.42	0.61	2.39	1.45	
常规耕作 1 年	<0.053	0.65	0.31	0.53	1.98	1.67	
免耕 2 年	<0.053	0.61	0.36	0.53	1.79	1.45	

3.3 NMR 结构特征

黑龙江双城市研究区胡敏素的 NMR 结构特征如图 4 所示，胡敏素的固态¹³C CPMAS NMR 波谱，可划分为 4 个主要的共振区，即烷基 C 区(0 ~ 50 μmol/mol)、烷氧 C 区(50 ~ 110 μmol/mol)、芳香 C 区(110 ~ 160 μmol/mol)和羰基 C 区(160 ~ 200 μmol/mol)^[31]。各共振区的主要吸收峰及其归属如下：烷基 C 区中，可以在 26 μmol/mol 观察到明显的吸收峰，表明有与芳环相连的—CH₂的存在^[32]；烷氧 C 区中，55 μmol/mol 和 72 μmol/mol 的吸收峰最明显，其中 55 μmol/mol 为甲氧基 C 的吸收，72 μmol/mol 为碳水化合物 C 的吸收，除此之外，还有吸收峰 62 μmol/mol 和 83 μmol/mol 是碳水化合物 C 的吸收，但其微小差别在于 62 μmol/mol 和 72 μmol/mol 可分别为碳水化合物中伯醇和仲醇基 C，吸收峰 105 μmol/mol 为双烷氧 C 的吸收^[31]；芳香 C 区中吸收峰有 130 μmol/mol 和 155 μmol/mol，其中 130 μmol/mol 的吸收峰最明显，其主要是被羧基或羧甲基取代的芳香 C 以及与 O、N 等取代基间位的连 H 芳香 C^[31]；羰基 C 区中，主要的吸收峰出现在 170 μmol/mol，为羧酸、酯和酰胺 C 的吸收^[33-34]。

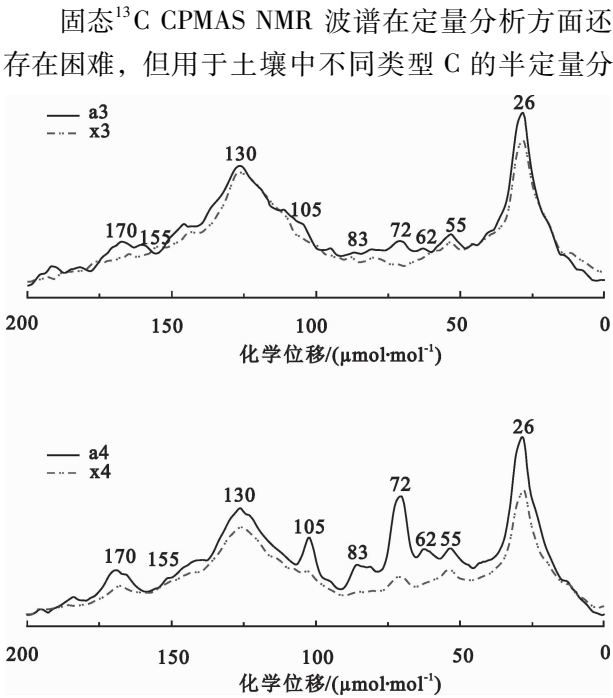


图 4 不同耕作措施土壤有机碳的固态¹³C 核磁共振波谱

Fig. 4 The solid-state ¹³C NMR spectrum of soil organic carbon with various tillage treatments

注：a3 和 x3 为粒径 0.053 ~ 0.25 mm，a4 和 x4 为粒径 <0.053 mm；a 代表常规耕作 1 年，x 代表免耕 2 年

表 4 胡敏素中不同类型 C 的分布
Table 4 The distribution of different types carbon in humin

耕作方式	粒径/mm	烷基 C/%	烷氧 C/%	芳香 C/%	羰基 C/%	芳香度/%	烷基 C/烷氧 C	疏水 C/亲水 C
常规耕作 1 年	0.053 ~ 0.25	29.15	23.17	40.39	7.29	43.56	1.26	2.28
免耕 2 年	0.053 ~ 0.25	32.63	24.40	39.31	3.66	40.80	1.34	2.56
常规耕作 1 年	<0.053	30.09	33.13	30.33	6.45	32.42	0.91	1.53
免耕 2 年	<0.053	32.51	25.14	36.50	5.86	38.77	1.29	2.23

注：芳香度 = 芳香 C / (烷基 C + 烷氧 C + 芳香 C) × 100% ； 疏水 C / 亲水 C = (烷基 C + 芳香 C) / (烷氧 C + 羰基 C) 。

析是可行的^[35]。不同地区不同耕作措施下的土壤都表现出一定的变化趋势(表 4)。不同地区、不同耕作措施和不同粒径之间,胡敏素中烷基 C、烷氧 C、芳香 C 和羰基 C 所占比例存在一定差异。免耕前烷基 C 和烷氧 C 的比例随着粒径的减小而增加,芳香 C 和羰基 C 的比例及烷基 C/烷氧 C、疏水 C/亲水 C 的比值和芳香度随着粒径的减小而减少。免耕后烷基 C、芳香 C 的比例及烷基 C/烷氧 C、疏水 C/亲水 C 的比值和芳香度随着粒径的减小而减少,烷氧 C 和羰基 C 的比例随着粒径的减小而增加。免耕前后:烷基 C 比例、烷基 C/烷氧 C 和疏水 C/亲水 C 的比值增加,而土壤的羰基 C 比例减少;粒径 <0.053 mm 土壤的芳香 C 比例和芳香度比值增加,而粒径 0.053 ~ 0.25 mm 减少;粒径 0.053 ~ 0.25 mm 土壤的烷氧 C 比例增加,而粒径 <0.053 mm 减少。

烷基 C/烷氧 C 比值(A/O—A)反映了腐殖物质烷基化程度的高低,常作为有机碳分解程度的指标^[36]。烷基 C 来源于植物生物聚合物和微生物代谢产物,是难以降解的稳定有机碳组分,烷氧 C 则相对易于分解,该比值愈大,表明土壤有机碳的稳定性愈高^[37]。疏水 C/亲水 C 比值能够反映腐殖物质疏水程度的大小,该比值越大则土壤有机碳和团聚体的稳定性也越高^[38-39]。芳香度可以反映有机碳分子结构的复杂程度,该值越大,表明芳香核结构越多,分子结构越复杂^[40]。本文采用 A/O—A 值和疏水 C/亲水 C 比值来表征土壤有机碳稳定程度。

免耕后:在粒径 0.053 ~ 0.25 mm 的土壤中胡敏素的芳香性降低,分子结构趋于简单化,粒径 <0.053 mm 的土壤中胡敏素的芳香性增强,分子结构趋于复杂化;土壤胡敏素中烷基 C/烷氧 C (A/O—A)比值均呈增加趋势,说明免耕可以增加胡敏素的稳定性,因为免耕提高了土壤利用碳源能力,使得胡敏素中烷氧碳的分解速率加快,而烷基碳相对富集^[37],胡敏素的稳定性增加;疏水

C/亲水 C 的比值呈增加趋势,说明免耕有助于增加胡敏素的疏水程度和稳定性。

4 结 论

研究表明,与传统耕作方式相比,短期免耕耕作处理并没有提高土壤有机碳含量。红外光谱显示:免耕后土壤有机碳的脂族性减弱,芳香性增加,从而土壤有机碳的稳定性增加。核磁共振光谱显示:免耕后胡敏素中烷氧 C 分解速率快,烷基 C 相对富集,疏水程度增加,进而土壤有机碳的稳定性增加。红外和核磁共振光谱均显示土壤有机碳稳定性增加,说明短期免耕有助于增加土壤有机碳稳定性。

参考文献:

[1] PAUSTAIN K, SIX J, ELLIOTT E T, et al. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 147-163.

[2] DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt [J]. Australian Journal of Soil Research, 2001, 39(3): 435-464.

[3] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-286.

[4] BROWN S, LUGO A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle [J]. Biotropica, 1982, 14(3): 161-187.

[5] 廖艳, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 松嫩平原不同土地利用类型的黑土有机碳分解及其温度敏感性研究 [J]. 现代地质, 2011, 25(3): 553-561.

[6] 吴景贵, 席时权, 姜岩. 红外光谱在土壤有机质研究中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 1998, 18(1): 52-57.

[7] 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 我国主要农耕地水稻土有机碳含量分布及影响因素研究 [J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 11-19.

[8] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性 [J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.

[9] 王玉辉. 羊草群落生产力动态及其对全球变化的反应 [D]. 上海: 中国科学院上海生命科学研究院, 2000: 1-111.

[10] WISEMAN C L, PÜTTMANN W. Soil organic carbon and its

sorptive preservation in central Germany [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(1): 65–76.

[11] KAISER K, GUGGENBERGER G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 711–725.

[12] 姜伟, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 黑龙江省乌裕尔河流域有机碳迁移与沉积通量 [J]. *现代地质*, 2011, 25(2): 384–392.

[13] 钟聪, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 青海省土壤有机碳储量估算及其源汇因素分析 [J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 896–909.

[14] BALABANE M. Turnover of clay-associated organic nitrogen in the different aggregate-size classes of a cultivated silty loam [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(3): 285–291.

[15] 张志国, 徐琪, BLEVINS R L. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 384–391.

[16] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 335–340.

[17] METAY A, MOREIRA J A, BERNOUX M, et al. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(1): 122–132.

[18] 张海林, 高旺盛, 陈阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策 [J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(1): 16–20.

[19] HAJABBASI M A, HEMMAT A. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran [J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 56(3): 205–212.

[20] 吴庆标, 王效科, 郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 743–747.

[21] ALKAISI M M, YIN X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 437–445.

[22] FREIBAUER A A, ROUNSEVELLB M D, SMITHC P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe [J]. *Geoderma*, 2004, 122(1): 1–23.

[23] MCCARTY G W, LYSSENKO N N. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1564–1571.

[24] 梁重山, 党志, 刘丛强. 胡敏酸的结构特征及其吸附行为 [J]. *分析化学*, 2006, 34(3): 288–292.

[25] BAES A U, BLOOM P R. Diffuse reflectance and transmission Fourier transform infrared (DRIFT) spectroscopy of humic and fulvic acids [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 695–700.

[26] 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.

[27] 黄雁飞, 陈秋实, 区惠平, 等. 耕作方式对土壤团聚体与有机碳含量的影响 [M] //中国土壤学会. 面向未来的土壤科学(中册)——中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 成都: 电子科技大学, 2012: 1031–1036.

[28] 彭义, 解宏图, 李军, 等. 免耕条件下不同秸秆覆盖量的土壤有机碳红外光谱特征 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2257–2264.

[29] GREGORICH E G, KACHANOSKI R G, VORONEY R P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption [J]. *European Journal of Soil Science*, 1989, 40(3): 649–659.

[30] DEMYAN M S, RASCHE F, SCHULZ E, et al. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(2): 189–199.

[31] 张晋京, 窦森. 土壤胡敏素研究进展 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1229–1240.

[32] 李丽, 冉勇, 盛国英, 等. 泥炭土连续碱抽提腐殖酸的分子结构特征 [J]. *分析化学*, 2002, 30(11): 1303–1307.

[33] ZHAO H, LV Y Z, WANG X K, et al. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 397–403.

[34] CARVALHO A M, BUSTAMANTE M M, ALCANTARA F A, et al. Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in central Brazil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 144–150.

[35] CHEN C R, XU Z H, MATHERS N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 282–291.

[36] USSIRI D A, JOHNSON C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods [J]. *Geoderma*, 2003, 111(1/2): 123.

[37] 张晋京, 窦森, 朱平, 等. 长期施用有机肥对黑土胡敏素结构特征的影响: 固态¹³C核磁共振研究 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6): 2223–2228.

[38] PICCOLO A, MBAGWU J S. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1801.

[39] SPACCINI R, MBAGWU J S, CONTE P, et al. Changes of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia [J]. *Geoderma*, 2006, 132(1/2): 9–19.

[40] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 [J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 416–424.