

# 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响

薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 李小坤, 殷志遥, 刘智杰, 陈涛

(华中农业大学, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 选取湖北省武穴市8年田间定位试验中的传统耕作(CT)、秸秆还田配合传统耕作(CTS)、免耕(NT)和秸秆还田配合免耕(NTS)4种处理, 研究连续秸秆还田和免耕措施对表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)土壤团聚体稳定性及有机碳(SOC)的影响。结果表明: CTS、NT和NTS均显著增加了表层>5 mm水稳定性团聚体的含量和团聚体平均重量直径(MWD), 秸秆还田显著增加了亚表层土壤水稳定性团聚体的MWD。与CT比较, CTS、NT、NTS处理的SOC含量分别增加20.83%, 21.98%, 32.76%。CTS和NTS处理显著提高了表层>5, 5~2, <0.25 mm团聚体中SOC含量, NT则显著提高了>5, 5~2 mm团聚体中SOC含量; CTS显著增加了亚表层>0.25 mm团聚体中SOC的含量。秸秆还田增加了表层土壤的碳(C)、氢(H)、氮(N)和氧(O)的含量, 免耕降低了H的含量, 增加了其他3种元素的含量, 但是免耕处理增加了亚表层土壤中H的含量。NT和NTS处理较CT和CTS处理降低了土壤的H/C值, 表明土壤的脂肪族成分在不断增加。秸秆还田主要增加了土壤中醇、酚类, 芳香类, 脂肪族化合物和碳水化合物的含量, 而免耕主要增加脂肪族化合物的含量。这些有机组分的增加有助于团聚体稳定性的增强。

**关键词:** 秸秆还田; 免耕; 土壤团聚体; 有机碳; 化学结构

**中图分类号:** S152.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0182-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbexb.2018.01.029

## Effects of Continuous Straw Returning and No-tillage on Soil Aggregates and Organic Carbon

XUE Bin, HUANG Li, LU Jianwei, LI Xiaokun, YIN Zhiyao, LIU Zhijie, CHEN Tao

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

**Abstract:** The effects of continuous straw returning and no-tillage on soil aggregate stability and contents of soil organic carbon (SOC) in topsoil (0—20 cm) and sub-surface soil (20—40 cm) were studied in paddy fields of subtropical China. Soil samples were collected from 8-year experimental field located in Wuxue city, Hubei province. Four treatments including conventional tillage (CT), straw returning with conventional tillage (CTS), no-tillage (NT) and straw returning with no-tillage (NTS), were designed. The results showed that CTS, NT and NTS treatments significantly increased the contents of water-stable aggregates greater than 5 mm and the mean weight diameters (MWD) of water-stable aggregates in the 0—20 cm soil layer, and straw returning significantly increased MWD of water-stable aggregates in the 20—40 cm layer. Compared with CT, the treatments of CTS, NT and NTS significantly increased the contents of SOC by 20.83%, 21.98% and 32.76%, respectively. In addition, CTS and NTS significantly increased the SOC contents in aggregates those > 5, 5~2 and <0.25 mm in diameter, and NT treatment significantly increased the SOC contents in the aggregates with diameter of >5 and 5~2 mm in the 0—20 cm soil layer. Meanwhile, the CTS treatment significantly increased the SOC contents of the aggregates greater than 0.25 mm in the 20—40 cm soil layers. Straw returning increased contents of carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) and oxygen (O) in topsoil. In topsoil, no-tillage reduced the content of H, increased the contents of other three elements, but this treatment increased H content in sub-surface soil. Compared with the treatments of CT and CTS, the H/C ratios were reduced under NT and NTS treatments, indicating that the aliphatic components of soil

were increasing. The contents of alcohol, phenol, aromatic, aliphatic compounds and carbohydrates in soil increased under straw returning treatment, while the no-tillage mainly increased the contents of aliphatic compounds. The increase of these organic components contributed to enhancement of aggregate stability.

**Keywords:** straw returning; no-tillage; soil aggregates; soil organic carbon; chemical structure

土壤侵蚀是全球面临的最重要环境问题之一<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀与水稳定性团聚体密切相关,而团聚体的形成和稳定又与土壤有机碳数量和类型有关。因此,以有机碳—团聚体—土壤抗蚀为主线,开展团聚体的形成与稳定机制的研究,在防止土壤侵蚀和提高土壤肥力等方面具有重要意义<sup>[2]</sup>。

免耕和秸秆还田是以减少土壤扰动和增加秸秆覆盖为主要特点的耕作方式,近些年被广泛推广,免耕和秸秆还田对土壤团聚体产生的影响也引起大家的关注<sup>[3]</sup>。土壤有机碳(SOC)和土壤团聚体形成密切相关<sup>[4]</sup>,前者是后者的胶结物质,后者则是前者存在的场所<sup>[5]</sup>。国内外研究发现秸秆还田和免耕均可增加土壤团聚体的稳定性和SOC的含量<sup>[6-7]</sup>。免耕、传统耕作配合秸秆还田、免耕配合秸秆还田均可提升水稳定性大团聚体含量和稳定性,免耕配合秸秆还田效果最好;同时水稳定性团聚体含量和MWD随土层的增加而减小<sup>[8-9]</sup>。免耕配合秸秆还田处理显著增加>2 mm团聚体的含量,增幅为50%左右,团聚体稳定率也有一定的提高;显著增加了表层土壤团聚体SOC的含量,以>2 mm团聚体提升最多,增幅为40.0%<sup>[3]</sup>。

土壤有机碳主要以烷基碳、烷氧碳和芳香碳的形式存在,其中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)有更多的芳香环和更高的共轭作用,通过元素分析和红外光谱分析能够更好的认识其结构、行为特征和功能<sup>[10-12]</sup>。秸秆还田后有机组分中含氨基团、酚羟基、羟基和羧基含量增加,芳香性增强<sup>[13-14]</sup>。秸秆还田之后土壤HA组分在1 550, 1 460 cm<sup>-1</sup>处吸收峰振动增强,说明酰胺类化合物和脂肪族化合物增加<sup>[15]</sup>。免耕配合秸秆覆盖主要是增加碳水化合物、芳香碳和脂肪碳<sup>[16-17]</sup>。

目前,国内外的报道主要集中在秸秆还田和免耕下土壤养分和SOC的变化与团聚体的关系等方面<sup>[5,18]</sup>,缺乏SOC结构变化对团聚体稳定性影响的相关研究。为此,本文以湖北省武穴市秸秆还田和免耕的土壤为对象,对土壤水稳定性团聚体及其SOC的分布特征进行研究;采用红外光谱技术对SOC的结构进行表征,并探讨SOC对土壤团聚体稳定性的影晌机理,以期为秸秆还田和免耕措施下土壤有机碳和结构提升的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长期定位试验小区位于湖北省武穴市大金镇周干

村(29°59'21" N, 115°36'53" E),海拔24 m,属亚热带季风性湿润气候区。年平均气温16.9 ℃,以7月份气温最高,平均29.1 ℃,1月份气温最低,平均为4.1 ℃。年平均降雨量1 489 mm(1985—2015年30年平均值),年蒸发量1 361 mm。境内无霜期约为262 d,日照辐射平均为12.2 MJ/(m<sup>2</sup>·d),年均日照时数为1 913 h。土壤为第四纪沉积物发育的潴育型水稻土,质地是壤土。试验开始前0—20 cm土壤基本性质为,有机碳19.81 g/kg,全氮1.92 g/kg,全钾6.68 g/kg,速效磷21.73 mg/kg,速效钾86.14 mg/kg, pH 5.23;土壤机械组成为砂粒(>0.05 mm)39.98%,粉粒(0.05~0.002 mm)42.72%,黏粒(<0.002 mm)17.30%。

### 1.2 田间试验布设

试验于2007年开始实施,种植制度为早稻—晚稻—油菜轮作,试验采用随机区组试验设计,共设4个处理,3次重复,共12个小区。小区面积20 m<sup>2</sup>。翻耕处理(CT)为作物收获时秸秆和麦穗全部带走不还田,并用犁进行翻耕;秸秆还田配合翻耕处理(CTS)为作物收获脱粒后秸秆简单切碎全部还田,并用犁进行翻耕;免耕处理(NT)为全年不耕作,秸秆全部带走;秸秆还田配合免耕处理(NTS)为全年不耕作,插秧或移栽油菜后,沿着行间土壤表面覆盖秸秆。水稻秸秆每年还田量为5 250 kg/hm<sup>2</sup>,油菜秸秆每年还田量为4 500 kg/hm<sup>2</sup>。水稻和油菜秸秆有机碳的平均含量分别为402.5, 438.0 g/kg。早稻、晚稻和油菜季氮肥施用分别是150, 150, 210 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥分别是60, 45, 75 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥分别是135, 150, 150 kg/hm<sup>2</sup>。所用化肥为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。供试油菜品种为当地推广应用的双低甘蓝型品种。

### 1.3 样品的采集制备

于2015年5月油菜成熟时,每个试验小区采用“S”形布点法随机取10个点混合,分别采集两个土层(0—20, 20—40 cm)的土壤样品。将其带回室内后,混匀风干并剔除其中根系、石块。一部分过筛备用,另一部分用于水稳定性团聚体的分离。

### 1.4 分析项目及方法

pH采用电位法测定(水土比1:2.5,奥力龙868型pH计测定);土壤质地采用吸管法(采用美国制质地分类系统)测定;全氮采用开氏定氮法(K-

9840 自动定氮仪)测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提—比色法 (UV—1600 紫外可见分光光度计) 测定; 速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定 (HG—3 火焰光度计); 土壤有机碳采用重铬酸钾—外加热容量法测定<sup>[19]</sup>。土壤的元素组成采用德国 Vario El/Isoprime 型元素分析同位素质谱联用仪测定。土壤元素组成主要包括有机和无机物中的元素, 有机物中的元素组成较易受到外界环境的影响<sup>[20]</sup>。本研究中秸秆还田和免耕对土壤中有机物的影响较大, 土壤的元素组成可能主要反映其中有机组分的变化。红外光谱特征采用 VERTEX70 傅立叶变换红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR, 德国布鲁克有限公司) 进行分析<sup>[14]</sup>。

### 1.5 团聚体的分离和稳定性评价

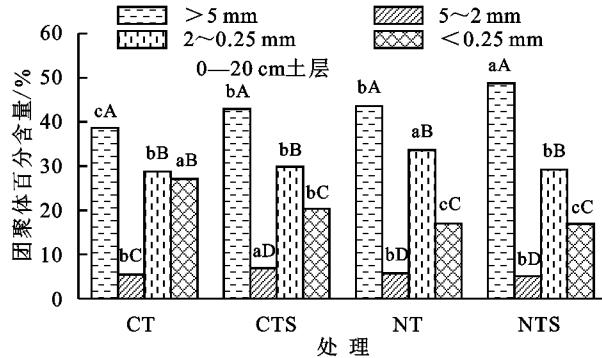
湿筛法是 1936 年 Yoder 提出来评价土壤团聚体稳定性的。干筛法一般不单独使用, 常常与湿筛法结合起来应用<sup>[21]</sup>, 团聚体的分级一般以 0.25 mm 为界线将水稳定性团聚体分为大团聚体 (>0.25 mm) 和微团聚体 (<0.25 mm) 2 类。其中前者又可分为 >5, 5~2, 2~0.25 mm; 后者可分为 0.25~0.053 和 <0.053 mm<sup>[22]</sup>。因此, 本研究用干—湿筛法获得 >5, 5~2, 2~0.25, <0.25 mm 水稳定性团聚体<sup>[23]</sup>。并采用公式计算团聚体的平均重量直径 (MWD):

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中:  $r_i$  为第  $i$  个筛子孔径 (mm),  $r_0 = r_1, \dots, r_n = r_{n+1}$ ;  $m_i$  为第  $i$  个筛子的破碎团聚体重量百分比。

### 1.6 数据分析

试验数据采用 Origin 8.0 软件进行绘图。SPSS 19.0 系统软件进行方差分析和 Duncan 多重对比。



注: CT、CTS、NT 和 NTS 分别代表翻耕, 秸秆还田配合翻耕, 免耕, 秸秆还田配合免耕处理; 不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同大写字母表示粒级之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳定性团聚体的分布特征

各处理表层土壤水稳定性团聚体含量由多到少依次为 >5, 2~0.25, <0.25, 5~2 mm (图 1)。>5 mm 粒级团聚体的含量为 38.69%~48.75%, CTS、NT 和 NTS 处理比 CT 处理显著增加了 10.93%, 12.66%, 26.00%; NTS 与 CTS、NT 处理相比显著增加了 >5 mm 粒级团聚体的含量, 增幅分别为 13.58% 和 11.84%。5~2 mm 粒级团聚体含量为 5.11%~6.88%, 较 CT 处理, CTS 处理显著增加了该粒级团聚体的含量, 增幅为 26.47%, NT 和 NTS 处理的差异不显著; 2~0.25 mm 团聚体的含量为 29.22%~33.65%, 处理间表现为 NT > CTS > NTS > CT, 与 CT 处理相比, NT 显著增加了该粒级团聚体的含量, 增幅为 16.96%。<0.25 mm 含量为 16.92%~27.11%, 各处理表现为 CT > CTS > NT > NTS。较 CT 处理, CTS、NT 和 NTS 均显著降低了 <0.25 mm 粒级的含量, 降幅分别为 24.86%, 37.18, 37.59%; 与 CTS 处理相比, 免耕处理 (NT 和 NTS) 也显著降低 <0.25 mm 粒级团聚体的百分含量, 降幅分别为 8.44% 和 9.54%。这与前人研究结果类似<sup>[3]</sup>。

与表层土壤相比, 20—40 cm 土层中 >5 mm 水稳定性团聚体减少最明显, 不同粒级团聚体的含量由多到少依次为 <0.25, 2~0.25, >5, 5~2 mm (图 1)。>5 mm 粒级团聚体的含量为 8.13%~13.16%, 处理之间表现为 NTS > CTS > NT > CT; 与 CT 处理相比, CTS 和 NTS 显著增加了该粒级团聚体的含量。5~2 mm 粒级团聚体的含量为 3.39%~4.07%, 表现为 NT > CT > NTS > CTS。2~0.25 mm 粒级水稳定性团聚体的含量为 30.97%~42.54%, 处理之间表现为 NT > NTS > CTS > CT。<0.25 mm 粒级团聚体的含量表现为 CT > CTS > NT > NTS, 但处理间未达到显著差异。

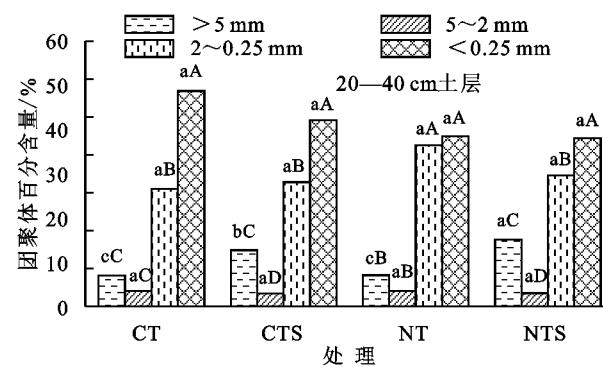
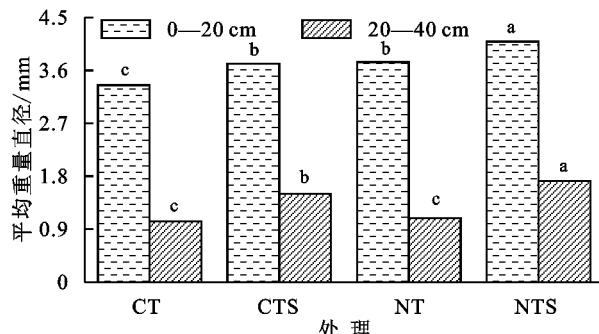


图 1 不同处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中水稳定性团聚体的分布

表层土壤水稳定性团聚体的平均重量直径 MWD (3.35~4.09 mm) 高于 20—40 cm 土层的 (1.03~1.72 mm) (图 2)。在 0—20 cm 土层, CTS、NT 和

NTS 处理团聚体的 MWD 显著高于 CT 的, 增幅分别为 10.75%, 11.64%, 22.09%。在 20—40 cm 土层, CTS 和 NTS 处理的 MWD 显著高于 CT 处理的,

但 NT 处理差异不显著。MWD 表现为 NTS>NT>CTS>CT。与未秸秆还田的 CT 和 NT 处理相比较,秸秆还田的 CTS 和 NTS 处理的 MWD 分别增加了 45.93% 和 57.80%。由此可见,连续秸秆还田和免耕可以显著改善表层土壤结构,秸秆还田配合免耕效果最佳。秸秆还田也能够显著改善亚表层土壤结构。说明秸秆的添加可以提高团聚体的稳定性。



注:不同小写字母表示处理之间差异显著( $p<0.05$ )。

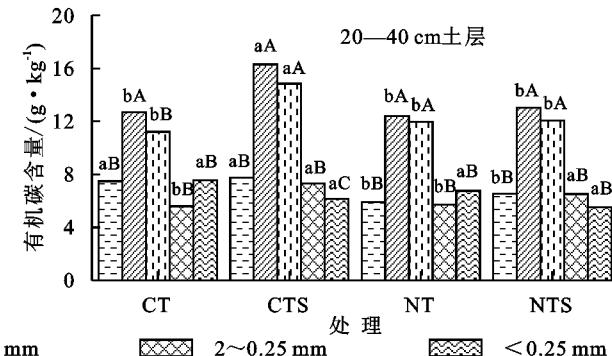
图 2 不同处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中水稳定性团聚体的平均重量直径

## 2.2 土壤和团聚体中有机碳的分布

表层土壤有机碳的含量显著高于亚表层(图 3)。0—20 cm 土层 SOC 的含量表现为 CT<CTS<NT<NTS(图 3)。与翻耕(CT)相比,其他各处理均显著增加了 SOC 的含量,增幅分别为 20.83%, 21.98%, 32.76%。秸秆还田配合翻耕处理(CTS)、免耕(NT)和秸秆还田配合免耕(NTS)处理之间 SOC 的含量并没有达到显著差异。但与 CTS 处理相比,NT 和 NTS 处理 SOC 的含量分别增加了 0.95% 和 9.87%;与 NT 处理相比,秸秆还田(NTS)后土壤 SOC 含量增幅为 8.83%。由此可以看出,秸秆还田和免耕均能够显著增加 0—20 cm 土层 SOC 的含量,且秸秆还田配合免耕效果最好。这与前人的研究结果类似<sup>[6-7]</sup>。亚表层 SOC 的含量表现为 CTS>CT>NTS>NT, NT 显著降低

了 20—40 cm 土层 SOC 的含量(图 3)。与 CT 相比,CTS 土壤有机碳的增幅为 3.48%, NT 和 NTS 处理的降幅分别为 20.86% 和 12.57%。较免耕处理,NTS 处理土壤有机碳的含量增幅为 10.47%。免耕降低了亚表层 SOC 的含量,但秸秆还田增加了 SOC 的含量。

团聚体中有机碳的含量由多到少依次为  $>5, 5\sim2, 2\sim0.25, <0.25$  mm, 团聚体 SOC 的含量均随土壤深度加深而减小(图 3)。表层水稳定性大团聚体( $>0.25$  mm)中有机碳的含量均表现为 NTS>NT>CTS>CT, 而  $<0.25$  mm 粒级团聚体中有机碳的含量表现为 NTS>CTS>NT>CT(图 3)。与 CT 处理相比,CTS 显著增加了  $5\sim2, <0.25$  mm 团聚体中有机碳的含量,增幅分别为 6.96% 和 32.35%; NT 和 NTS 处理显著增加了  $>5, 5\sim2$  mm 团聚体中有机碳的含量;与 NT 处理相比,NTS 处理显著增加  $<0.25$  mm 团聚体中有机碳的含量,增幅为 35.75%。免耕增加表层大团聚体中有机碳的含量,可能由于减少了耕作对土壤团聚体的破坏,以及秸秆还田促进了大团聚体的形成,降低了大团聚体中有机碳的分解速率<sup>[24]</sup>。无论是翻耕还是免耕,秸秆还田都能够大幅度的提高  $<0.25$  mm 粒级团聚体中 SOC 的含量,可能是因为小颗粒中富集了更多的活性矿物(氧化铁/铝),对有机碳的吸附作用更大<sup>[25]</sup>。Elliott<sup>[26]</sup>研究表明大团聚体中新增加的有机碳和不稳定的有机碳比微团聚体多。Jastrow 等<sup>[27]</sup>利用<sup>13</sup>C 示踪法也证实了大团聚体比微团聚体含有更多的有机碳。试验中 NTS 处理显著增加了亚表层  $>0.25$  mm 水稳定性团聚体中有机碳的含量(图 3)。较 CT 处理,CTS 处理土壤中  $>5, 5\sim2, 2\sim0.25$  mm 团聚体的有机碳含量分别增加了 28.63%, 32.35%, 31.13%;  $<0.25$  mm 团聚体有机碳含量表现为 CTS>NTS>CT>NT, 与 CT 和 NT 处理相比,NTS 显著增加了  $2\sim0.25$  mm 中有机碳的含量,增幅分别为 16.63% 和 13.78%。



注:不同小写字母表示处理之间差异显著( $p<0.05$ );不同大写字母表示粒级之间差异显著( $p<0.05$ )。

图 3 不同处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤及团聚体中有机碳的含量

## 2.3 土壤的元素组成

表层土壤的元素组成以 C、O 和 H 所占比例相对较大(表 1)。与 CT 处理相比,CTS、NT 和 NTS 处理的土

壤中,C 分别增加了 11.86%, 25.42%, 68.64%, N 分别增加了 6.67%, 13.33%, 46.67%, 这与前面有机碳的研究结果类似。O 分别增加了 17.50%, 2.49%, 15.17%。

较 CT 处理, NT 降低了 H 的含量, 降幅为 1.76%, CTS 和 NTS 却增加了其含量, 增幅分别为 12.73% 和 12.09%。与未秸秆还田的处理(CT 和 NT)相比较, 精秆还田处理(CTS 和 NTS)均增加了土壤 C、H、O 和 N 的含量。与 CT 相比, CTS、NT 和 NTS 土壤的 C/N 值分别增加了 2.86%, 7.77%, 12.77%, 且 C 与 N 均增加, 说明土壤有机组分中含有较多的含碳和氮的官能团。无论是否秸秆还田, 免耕处理均降低了土壤的 O/C 值, 降幅分别为 18.29% 和 31.71%, 且 O 含量下降和 C 含量上升, 表明土壤有机碳含有较多的烷氧基和羧基。免耕(NT 和 NTS)与传统耕作(CT 和 CTS)处理相比, 降低了土壤 H/C 值, 降幅分别为 21.67% 和 34.05%。这说明脂族成分在不断增加, 崔婷婷等<sup>[28]</sup>也得到同样的结果。

表 1 不同处理对土壤元素组成的影响

土层 深度/cm	处理	元素含量/%				比值		
		C	H	N	O	C/N	O/C	H/C
0—20	CT	1.18	1.70	0.15	7.39	7.95	6.26	1.44
	CTS	1.32	1.92	0.16	8.68	8.18	6.58	1.46
	NT	1.48	1.67	0.17	7.57	8.57	5.12	1.13
	NTS	1.99	1.91	0.22	8.51	8.97	4.28	0.96
20—40	CT	0.63	1.53	0.09	7.14	7.10	11.33	2.43
	CTS	0.57	1.56	0.09	7.07	6.59	12.41	2.74
	NT	0.54	1.93	0.08	7.55	6.33	13.99	3.57
	NTS	0.66	1.66	0.10	7.47	6.56	11.32	2.52

## 2.4 土壤有机碳组成的红外表征

不同处理的 SOC 红外光谱基本相似, 主要在 3 697, 3 619, 3 403, 2 924, 2 852, 1 630, 1 320, 1 080, 1 035, 1 008, 925, 778, 693, 540, 470  $\text{cm}^{-1}$  处(图 4), 表明不同处理的土壤有机碳具有基本一致的结构。根据红外光谱吸收峰的归属特征<sup>[29-31]</sup>, 3 697~3 403  $\text{cm}^{-1}$  是 O—H 的氢键伸缩振动的吸收峰, 其中 O—H 一部分为有机物中的碳水化合物, 另一部分为样品中所含水分子的羟基吸收和氨基酸中的 N—H 伸缩振动吸收, 其中 3 619  $\text{cm}^{-1}$  对应的变形振动频率为 925  $\text{cm}^{-1}$ , 传统耕作(CT 和 CTS)在 3 403  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰加强, 表明有机质中酚羟基、羟基和羧基的含量增加。2 924, 2 852, 1 320  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是脂肪族结构中 C—H 键对称伸缩振动, 精秆还田后表层土壤此位置的吸收峰明显增强, 表明精秆还田以后脂肪族 C—H 官能团增加, 这与元素组成得到的结果相同。1 630  $\text{cm}^{-1}$  处的宽带吸收峰主要为芳烃骨架 C (C=C), 也可能是醌、酮类化合物羰基(C=O)的伸缩振动, 亦或氢键结合共轭酮的 C=O 振动<sup>[31]</sup>。传统耕作处理增强了该类化合物的吸收峰强度, 与未精秆还田相比, 精秆还田后表层有机质在 1 630  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰也有增强。1 080  $\text{cm}^{-1}$  归属于多糖的 C—O 伸

缩振动, 精秆还田之后在 1 080  $\text{cm}^{-1}$  (多糖 C—O) 的吸收峰有明显的增强, 表明精秆的添加增加了土壤中碳水化合物的含量, 但免耕处理在此处的吸收峰明显降低。693  $\text{cm}^{-1}$  为烯烃类化合物 C—H 的变形振动, 归属于不饱和脂肪烃<sup>[31]</sup>。由此可知, 土壤有机碳的组分主要是醇和酚等脂肪族化合物(烷烃和烯烃)、芳香族化合物和碳水化合物等。精秆还田主要增加了脂肪族和碳水化合物的含量, 而免耕措施主要增加脂肪族化合物的含量。与 CT 相比, CTS 处理的亚表层土壤在 3 400, 2 924, 2 852, 1 320, 1 080  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰增强, NT 和 NTS 处理土壤在 1 320  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰有明显增强(图 4), 表明精秆还田和免耕主要增加了亚表层土壤中脂肪族化合物的含量。

根据朗伯比尔定律, 当吸收层厚度一定时, 吸光物质的浓度与吸光度成正比, 因此可以通过红外吸收峰吸收强度分析土壤有机碳官能团的结构<sup>[32]</sup>。CTS 表层土壤 3 400, 1 630, 1 320, 1 080  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰的吸光度(表 2)分别为 0.25, 0.17, 0.25, 1.44, 比 CT 增加 8.00%, 6.25%, 8.70%, 5.88%, 但烯烃类有机碳组分均有所降低; 与 CT 相比, NT 土壤有机碳在 1 320  $\text{cm}^{-1}$  处吸光度增加了 8.70%, 但 1 080  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰的吸光度却显著降低, 降幅为 49.26%; NTS

土壤在  $1080\text{ cm}^{-1}$  处吸光度为 1.32, 比 NT 处理增加了 91.30%。与传统耕作相比, 无论是否秸秆还田和免耕均降低了土壤中醇和酚类化合物。由此表明,

传统耕作配合秸秆还田主要增加了表层土壤烷烃类和碳水化合物, 免耕配合秸秆还田则主要增加了土壤中的碳水化合物。

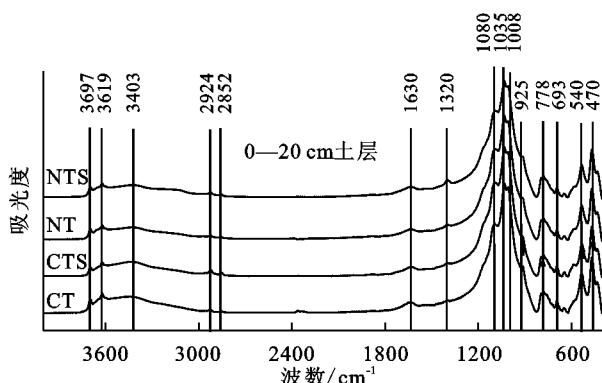
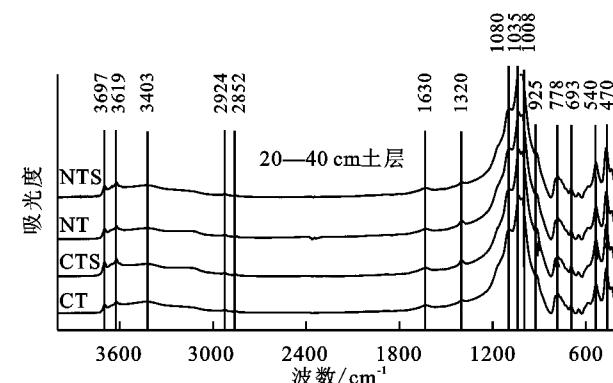


图 4 不同处理 0—20 cm 土层中有机碳的红外光谱

在亚表层, CT 处理在  $3400, 1630, 1320, 693, 1080, 1035\text{ cm}^{-1}$  处的吸光度分别为 0.17, 0.12, 0.22, 0.16, 1.29, 1.81。秸秆还田处理(CTS)中, 这几个峰的吸光度均有增加, 增幅分别为 23.53%, 25.00%, 13.64%, 12.50%, 6.20%, 8.84%。在免耕处理之后, 除  $693\text{ cm}^{-1}$  处吸光度没有变化, 其他几个吸收峰吸光度也均有所增加。与 NT 处理相比, NTS 处理增加了  $3400\text{ cm}^{-1}$  和  $693\text{ cm}^{-1}$  处的吸光度, 增幅分别为 5.26% 和 6.25%。反映秸秆还田和免耕均能增加亚表层土壤醇类、酚类、芳香类、烷烃类、烯烃类和碳水化合物的含量。

表 2 不同处理对土壤有机碳不同官能团吸光度的影响



物。Demyan 等<sup>[33]</sup>研究发现, 施用有机肥处理土壤的红外光谱在  $2930\text{ cm}^{-1}$  处较不施的土壤有更强吸收峰, 这与本研究结果基本一致。碳水化合物是土壤团聚体非常重要的粘合剂, 对团聚体的形成和稳定起到很重要的作用<sup>[34]</sup>。在本研究中秸秆还田处理显著增加土壤中碳水化合物的含量(表 2), 同时显著增加表层  $>5, 5\sim 2\text{ mm}$  水稳定性团聚体的含量和团聚体的 MWD(图 1、图 2)。研究<sup>[35]</sup>表明, 碳水化合物与黏土矿物可通过物理吸附、化学吸附和交换吸附等方式相互作用, 促进大团聚体的形成。张玉兰等<sup>[36]</sup>的研究指出土壤有机碳中脂肪族碳组分越多, 芳构化程度越高, 其与无机微粒的结合能力就越强, 有利于土壤团聚体的形成。脂肪族碳类组分一般通过范德华力与矿物表面作用<sup>[37]</sup>, 部分芳香性有机质易于吸附在黏土矿物的疏水性表面<sup>[38-39]</sup>; 含有羧基和酚羟基的有机质更易于吸附在金属氧化物表面<sup>[40-42]</sup>。此外, 谢锦升等<sup>[43]</sup>认为, 与多价金属阳离子联系的芳香腐殖物质和受黏粒强烈吸附的聚合物是团聚体稳定的长久性有机黏结介质。Kovac 等<sup>[44]</sup>研究表明, 脂肪族链烃可贡献于大团聚体的持久稳定。本研究中, 免耕措施主要增加了土壤中烷烃类化合物的含量, 大量的烷烃类化合物作为持久性有机胶结剂将无机微粒胶结在一起, 形成较大粒级的团聚体。

### 4 结论

连续秸秆还田和免耕均可显著增加土壤中  $>5\text{ mm}$  水稳定性大团聚体的含量和 MWD。MWD 随土层的加深而减小。秸秆还田和免耕提高表层土壤(增幅在 20% 左右)和各粒级团聚体中有机碳的含量, 秸秆还田配合免耕处理的效果最佳; 秸秆还田提高亚表层土壤和团聚体中有机碳的含量, 但免耕处理反之。秸秆还田增加土壤中醇、酚类, 芳香类, 脂肪族和碳水

土层 深度/cm	处理	醇、 酚类	芳香类	烷烃类	烯烃类	碳水 化合物
0—20	CT	0.23	0.16	0.23	0.20	1.36
	CTS	0.25	0.17	0.25	0.15	1.44
	NT	0.18	0.16	0.25	0.15	0.69
	NTS	0.18	0.15	0.24	0.15	1.32
20—40	CT	0.17	0.12	0.22	0.16	1.29
	CTS	0.21	0.15	0.25	0.18	1.37
	NT	0.19	0.18	0.29	0.16	1.42
	NTS	0.20	0.16	0.28	0.17	1.39

### 3 讨论

本研究表明秸秆还田主要增加了有机质中醇、酚类, 芳香类, 脂肪族化合物和碳水化合物的含量, 而免耕措施主要增加脂肪族化合物的含量; 且长期秸秆还田和免耕可以有效促进水稳定性大团聚体的形成, 增强其稳定性。秸秆还田处理提高了土壤中 C、H、O 和 N 的含量, 增加了土壤的 C/N 值(表 1), 且土壤红外吸收光谱中  $2924, 2852\text{ cm}^{-1}$ (脂肪族 C—H 对称伸缩振动),  $1320$ (脂肪族 C—H 变形振动)和  $1080\text{ cm}^{-1}$ (多糖 C—O)的吸收峰有明显的增强(图 4), 这主要是由于秸秆腐解后向土壤输送大量的碳水化合物、芳香族碳、脂肪族碳、酯类化合物和氨基类化合物。

化合物的含量。免耕则主要增加了土壤中脂肪族化合物的含量。各有机组分的增加有助于提高团聚体的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 邬铃莉,王玉杰,王彬,等.干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):317-321.
- [2] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [3] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):378-386.
- [4] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [5] 刘中良,宇万太,周桦,等.不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J].土壤学报,2011,48(6):1149-1157.
- [6] 武均,蔡立群,齐鹏,等.不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J].中国生态农业学报,2015,23(3):276-284.
- [7] Choudhury S G, Srivastava S, Singh R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice - wheat cropping system under reclaimed sodic soil [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 76-83.
- [8] 刘威,张国英,张静,等.2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):117-122.
- [9] 武均,蔡立群,罗珠珠,等.保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):112-117.
- [10] Chen J, Gu B, Le Boeuf E J, et al. Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions [J]. Chemosphere, 2002, 48(1): 59-68.
- [11] 肖彦春,窦森.土壤腐殖质各组分红外光谱研究[J].分析化学,2007,35(11):1596-1600.
- [12] 窦森,李凯,崔俊涛,等.土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J].土壤学报,2008,45(6):134-144.
- [13] 张雅洁,陈晨,陈曦,等.小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2155-2161.
- [14] 陈曦,张敬智,张雅洁,等.小麦-玉米秸秆连续还田对土壤有机质红外光谱特征及氮素形态的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(8):973-978.
- [15] 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[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):396-40.
- [16] 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.
- [17] Ouellette L. Impact of previous cover crops and corn stover removal on soil organic carbon, aggregate stability and squash yield [D]. Canada: University of Guelph, 2015.
- [18] Jiang M, Wang X, Liu S Y, et al. Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil [J]. Catena, 2017, 149: 437-445.
- [19] 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,2000:12-193.
- [20] 邓兵,李从先.长江三角洲古土壤有机元素组成及古环境意义[J].同济大学学报(自然科学版),2002,30(7):833-83.
- [21] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [22] 窦森,李凯.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-till agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [24] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 39-47.
- [25] 王莹,尧水红,李辉信,等.长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系[J].土壤,2013,45(4):666-672.
- [26] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [27] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 801-807.
- [28] 崔婷婷,窦森,杨轶圆,等.秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报,2014,51(4):718-725.
- [29] 陆长青.土壤粘粒的红外光谱[J].土壤,1986(2):94-100.
- [30] Celi L, Schnitzer M, Nègre M. Analysis of carboxyl groups in soil humic acids by a wet chemical method, Fourier-transform infrared spectrophotometry, and solution-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. A

- comparative study [J]. *Soil Science*, 1997, 162(3): 189-197.
- [31] Mao J, Olk D C, Fang X, et al. Influence of animal manure application on the chemical structures of soil organic matter as investigated by advanced solid-state NMR and FT-IR spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2008, 146(1): 353-362.
- [32] Ellerbrock R H, Höhn A, Gerke H H. Characterization of soil organic matter from a sandy soil in relation to management practice using FT-IR spectroscopy [J]. *Plant and Soil*, 1999, 213(1/2): 55-61.
- [33] 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.
- [34] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1): 57-61.
- [35] 郭景恒,朴河春.碳水化合物在土壤中的分布特征及其环境意义[J].*地质地球化学*,2000,28(3):59-64.
- [36] 张玉兰,孙彩霞,陈振华,等.红外光谱法测定肥料施用26年土壤的腐殖质组分特征[J].*光谱学与光谱分析*,2010,30(5):1210-1213.
- [37] Oren A, Chefetz B. Sorptive and desorptive fractionation of dissolved organic matter by mineral soil matri-
- ces [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(2): 526-533.
- [38] Guo M, Chorover J. Transport and fractionation of dissolved organic matter in soil columns [J]. *Soil Science*, 2003, 168(2): 108-118.
- [39] Polubesova T, Chen Y, Navon R, et al. Interactions of hydrophobic fractions of dissolved organic matter with  $Fe^{3+}$ - and  $Cu^{2+}$ -montmorillonite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4797-4803.
- [40] Saidy A R, Smernik R J, Baldock J A, et al. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide [J]. *Geoderma*, 2013, 209: 15-21.
- [41] Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, et al. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron [J]. *Nature*, 2012, 483(7388): 198-200.
- [42] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 9-24.
- [43] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].*生态学报*,2008,28(2):702-709.
- [44] Kovac N, Bajt O, Faganeli J, et al. Study of macroaggregate composition using FT-IR and  $^{1}H$ -NMR spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 2002, 78(4): 205-215.

(上接第181页)

- [39] 窦睿音,延军平.关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J].*干旱区资源与环境*,2013,27(8): 76-82.
- [40] 贾玉芳,申洪源,丁召静.鄱阳湖流域降水变化及其与太阳黑子的关系[J].*热带地理*,2011,31(2): 178-181.
- [41] Holland G J. Predicting El Nino's impacts [J]. *Science*, 2009, 325(5936): 47.
- [42] Allon R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. *Science*, 2008, 321(12): 1481-1484.
- [43] Chiara V, Elisa P, Paolo F et al. Temporal trends in extreme rainfall intensity and erosivity in the Mediterranean region: A case study in southern Tuscany, Italy [J]. *Climatic Change*, 2015, 128(1): 139-151.
- [44] IPCC. Climate change impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. USA: Cambridge University Press, 2007: 84.
- [45] 陈文,兰晓青,王林,等.ENSO和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J].*科学通报*,2013,58(8):634-641.