

耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响

徐尚起¹, 崔思远¹, 陈 阜¹, 肖小平², 张海林^{1*}

(1.中国农业大学农学与生物技术学院/农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘 要:为深入了解耕作方式对土壤碳组分含量的影响,以南方双季稻田为研究对象,研究了翻耕秸秆不还田(CT)、翻耕(CTS)、旋耕(RTS)和免耕(NTS)4种耕作处理对土壤轻组有机碳(LF-OC)、重组有机碳(HF-OC)、土壤轻组组分(LF)和重组组分(HF)的影响。结果表明,不同耕作方式下,土壤轻组有机碳含量介于 191.21~251.54 gC·kg⁻¹, fraction 之间,轻组有机碳(LF-OC)含量介于 3.01~9.27 gC·kg⁻¹ 之间,为土壤总有机碳(TOC)的 11.84%~23.31%;耕作扰动导致土壤 LF-OC 的损失,而秸秆投入能够增加 LF-OC;NTS 处理利于表层土壤有机碳的积累,但不利于亚表层土壤有机碳的积累;RTS 和 CTS 处理有利于有机碳增加,但 LF-OC 分解较快;CT 处理则导致土壤有机碳的流失。LF-OC 与 TOC 变化相似,呈显著正相关关系($R^2=0.84$),且 LF-OC 对耕作措施的响应比 TOC 更为剧烈,可以作为指示土壤有机碳库变化的灵敏指标。

关键词:耕作;有机碳;密度分组;双季稻田

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)01-0127-06

Effect of Tillage on Content of Density Fractions of Paddy Soil Organic Carbon and Its Spatial Distribution

XU Shang-qī¹, CUI Si-yuan¹, CHEN Fu¹, XIAO Xiao-ping², ZHANG Hai-lin^{1*}

(1.College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100193, China; 2.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China)

Abstract:The objective of this study was to understand effects of tillage on soil carbon and different fractions of it. Four tillage treatments were set up on the Double-Cropped rice field:conventional tillage without straw return(CT), conventional tillage(CTS), rotary tillage(RTS) and no-tillage(NTS). The heavy fraction of soil(HF), light fraction of soil(LF), high fraction organic carbon(HF-OC) and light fraction organic carbon(LF-OC) were measured, and the effect of tillage on different fractions of soil organic carbon were also analyzed. Results showed that soil organic carbon concentration in the light fraction were between 191.21~251.54 gC·kg⁻¹, fraction, and the light fraction organic carbon content(LF-OC) ranged from 3.01 gC·kg⁻¹ to 9.27 gC·kg⁻¹, which account for 11.84%~23.31% of total soil organic carbon(TOC). Both of LF-OC and LF decreased with increases in soil depth. Tillage lead to the loss of LF-OC, while straw returning would increased the LF-OC. NTS was of benefit to the carbon accumulation of surface soil(0~5 cm), but was not conducive to the carbon accumulation of subsurface soil(5~20 cm); RTS and CTS were favorable to the increasing of organic carbon, but the LF-OC of them decomposed rapidly; CT would result in the loss of soil organic carbon. The variation trend of LF-OC and TOC were similar, showed a significant positive correlation($R^2=0.84$), and the reposition of LF-OC to the farming was more intense than the TOC. LF-OC can be used as a sensitive index to directive changes in soil organic carbon pool.

Keywords:tillage; organic carbon; soil density fractions; Double-Rice cropping field

全球土壤中总碳量约 2 500 Gt,是空气中总碳量的 3 倍^[1],早在 2005 年农业措施造成的碳排放就已经

占到了人为温室气体排放的 10%~12%^[2],农业土壤有机碳的分解与全球气候变暖有密切关系。农田土壤有机碳分解会导致土壤肥力的降低,影响农业生态系统生产力^[3]。因此,对于土壤有机碳及其不同组分转化过程的研究具有较大意义。

Christensen 认为研究有机碳不同组分的变化,有利于揭示农业措施对土壤有机碳的影响机制^[4]。密度

收稿日期:2010-07-10

基金项目:国家“十一五”支撑计划项目(2006BAD15B01);公益性行业(农业)科研专项(200803028,200903003)

作者简介:徐尚起(1987—),男,山东菏泽人,主要从事土壤耕作与农田生态研究。E-mail:shangqixu@126.com

* 通讯作者:张海林 E-mail:hailin@cau.edu.cn

分组方法是利用一定体积的相对密度液(相对密度 $1.6\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)将土壤分成轻组和重组^[5],该方法分离的有机碳组分能反映原状态有机质的性质与功能,尤其能够反映其周转特征^[6],因此在土壤有机碳的研究中受到越来越多的重视。重组有机碳(HF-OC)很可能是土壤中重要的稳定碳库,研究重组有机碳对于认识土壤碳汇功能具有较为重要的意义^[7];而轻组主要是游离态的有机质,是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分^[8],它对农业管理方式较敏感,达到平衡状态的时间比土壤总有机碳要短^[9],研究轻组有机碳有利于探明土壤有机碳组分的周转过程。

在耕作土壤中,耕作方式对于土壤碳库及其组分变化有着较大影响,对不同耕作方式下土壤重组、轻组有机碳组分进行研究,可较好地理解土壤有机碳不同组分的转化过程及耕作措施对土壤碳周转的影响。但针对不同耕作措施下土壤不同密度有机碳组分的研究一直相对较少,尤其是针对双季稻田的研究更为鲜见。南方双季稻区是我国重要的粮食生产基地,我国水稻种植面积约为全球的 20%^[10]。且有研究表明,稻田土壤碳储量高于旱地土壤,是大气中 CO_2 的重要汇之一^[11]。因此,开展稻田有机碳组分的研究,对全球气候及粮食生产有着重要的意义。

本文利用密度分组方法,研究耕作方式对于土壤碳库组分及变化特征的影响,以期明确耕作方式影响稻田有机碳组分分布的机理,深入了解稻田土壤碳周转,并为选择合理的耕作方式以增加土壤碳固定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设立于湖南省宁乡县保护性耕作试验示范基地($112^{\circ}18'E, 28^{\circ}07'N$),该地区气候为大陆性季风湿润气候,年平均降水量 1 358.3 mm,年平均气温 16.8°C ,为典型的双季稻三熟农作区。试验地肥力中等,排灌条件良好,试验土壤为水稻土,河沙泥土种。种植制度为冬闲-早稻-晚稻,试验前土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验始于 2005 年,设免耕、翻耕、旋耕和翻耕秸秆不还田 4 个处理,每处理 3 次重复,随机排列,小区面积 66.7 m^2 。免耕(NTS):不进行整地,水稻直接免耕抛秧,早晚稻收获后秸秆全量覆盖还田;旋耕(RTS):水稻抛秧前用旋耕机旋地 4 遍后抛秧,耕深约 8 cm,早稻收获后秸秆全量翻压还田,晚稻收获后覆盖还田,次年早稻抛秧前秸秆耕作时旋翻入土;翻耕(CTS):水稻抛秧前用铧式犁翻地一遍,再用旋耕机旋地两遍,耕深约 15 cm,早稻收获后秸秆全量翻压还田,晚稻收获后覆盖还田,次年早稻抛秧前翻压入土;翻耕秸秆不还田(CT):水稻抛秧前用铧式犁翻地一遍,再用旋耕机旋地两遍,耕深约 15 cm,早晚稻收获后秸秆移出田间。3 个秸秆还田处理(CTS、NTS、RTS)秸秆还田量约 $12\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

早、晚稻供试品种分别为中嘉早 32 号、湘晚籼 13 号。早稻基肥施撒可富复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=20:12:14$) $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分蘖时追施尿素 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;晚稻基肥施撒可富复合肥 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分蘖时追施尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理在早晚稻插秧前喷洒相等剂量除草剂(克无踪),然后抛秧。冬闲季田间不覆水。

1.3 取样方案与测定方法

土样采集于 2009 年 7 月,早稻收获之后。每个小区采用多点 S 形取样法,每处理 3 小区分开取样,于 0~5、5~10 cm 和 10~20 cm 共 3 个层次分别用土钻采集土样。供试土样带回实验室自然风干后,剔除石砾及植物残茬等杂物,过 0.25 mm 筛,放入密封塑料袋中待测定。

土壤有机碳:采用重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)稀释热法^[12]。

土壤密度分组参照鲁如坤的方法^[5],并据 Roscoe 和 Buurman^[13]的方法和实际情况进行了略微调整。具体方法为:取 5 g 土样置于已称重的 50 mL 离心管中,加入 25 mL 密度为 $1.85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的溴化锌重液,摇匀,振荡 1 h 后 $3\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,将上层液体倒入烧杯中,重新加入重液,重复上述过程 2~3 次,直至重液中无轻组物质。离心管中所剩物质为土壤重

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of studied soil

土层 Soil layer/ cm	容重 Bulk density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机碳 Soil organic carbon/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 Available N/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 Available P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 Available K/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH(H_2O)
0~20	1.21	34.90	224.10	4.38	97.10	6.26

组,加入 25 mL 蒸馏水,并再次重复上述过程 2~3 次,直至将离心管重组中的溴化锌重液洗涤干净。将离心管置于 40 ℃烘箱中烘干称重,计算其百分比。将烘干重组土样磨碎过 0.25 mm 筛,测定土壤有机碳含量,即为重组中有机碳含量(单位 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,fraction),乘以其所占土壤百分比计算该组分有机碳含量(HF-OC)。轻组有机碳用差值求得。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 11.5 软件进行试验数据统计与分析。

2 结果

2.1 土壤重组、轻组的分布特征及各组分有机碳含量

各处理 0~20 cm 耕层土壤,轻组中有机碳含量介于 $191.21\sim 251.54\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,fraction 之间,远远高于 TOC($25.38\sim 39.76\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$)和土壤重组中有机碳含量($22.09\sim 31.84\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,fraction)(表 2)。轻组中有机碳含量在不同土层(0~20 cm 范围)并无明显差异,而重组中有机碳含量在土壤剖面有随土层加深而下降的趋势。轻组组分(LF)占土壤总重的 1.43%~4.25%,但由于轻组中有机碳含量较高,轻组有机碳含量(LF-OC)约为土壤总有机碳的 11.84%~23.31%;同样由于轻组中有机碳含量变化较小,土壤轻组(LF)和 LF-OC 变化趋势较为一致。

LF-OC 和 TOC 均随土层加深而降低,相关性分析表明,两者之间呈显著性正相关($R^2=0.84$),说明其可以作为指示 TOC 变化的指标。LF-OC 在不同土层

的变化比 TOC 变化更为剧烈:①其层化现象(指其在不同土层中分布不均的现象)较 TOC 更为明显,0~5 cm 土壤与 10~20 cm 土壤中的 LF-OC 含量之比,NTS、CTS、RTS 和 CT 分别为 2.17、1.60、1.62 和 1.75,远大于 TOC 的变化幅度;②LF-OC 在 TOC 中比例随土层加深而降低,亦说明 LF-OC 比 TOC 在土壤剖面变化更为剧烈。HF-OC 在土层中分布同样是随土层加深而降低的,但其变化幅度远小于 LF-OC,亦小于 TOC 在不同土层的变化幅度,说明其是较为惰性的指标。

2.2 土壤有机碳含量及其在不同组分中的分布

耕作方式对于表层 0~5 cm 土壤 LF-OC 影响是十分显著的,该土层 LF-OC 与其在 TOC 中百分比的变化趋势基本一致(图 1、2)。0~5 cm 土层 NTS 处理 LF-OC 最高,比 CTS、RTS 和 CT 分别高了 2.11、2.51 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 4.01 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,且处理间差异达显著水平($P<0.05$);NTS 处理 LF-OC/TOC 亦分别比 CTS、RTS 和 CT 高了 3.68、5.24 和 7.34 个百分点,可见,耕作方式对 LF-OC 的影响较 TOC 更为显著。

亚表层土壤(5~20 cm)LF-OC 与其在 TOC 中所占比例的变化趋势存在差异,即 NTS 处理的 LF-OC/TOC 高于其他 3 个处理(CTS、RTS 和 CT),但 LF-OC 却低于 RTS 和 CTS 两个处理,可能是由于 CTS、RTS 和 CT 3 个处理耕作扰动土壤导致轻组有机碳分解,其在 TOC 中所占比例降低。亚表层土壤(5~20 cm)3 个秸秆还田处理 NTS、CTS 和 RTS 间 LF-OC 差异较小且不显著($P>0.05$),但 3 个处理均显著高于 CT 处

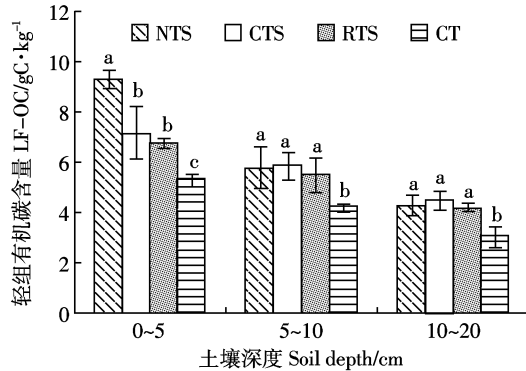
表 2 土壤有机碳及其在不同土壤组分中的分布特征

Table 2 Soil organic matter and its distribution feature in different soil fractions

土层/cm	处理	总有机碳/ $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$	(土壤轻组组分/全土)/ %	轻组有机碳/ $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$	轻组中有机碳含量/ $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,fraction	重组中有机碳含量/ $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,fraction
0~5	NTS	39.76±3.44	4.25±0.13	9.27±0.34	219.83±8.80	31.84±0.04
	CTS	36.29±1.29	2.85±0.05	7.16±1.06	251.54±3.78	29.98±0.32
	RTS	37.41±1.12	3.08±0.02	6.76±0.19	219.43±6.33	31.62±0.88
	CT	32.93±1.53	2.29±0.12	5.26±0.22	228.70±9.25	28.32±0.72
5~10	NTS	31.80±1.07	2.80±0.02	5.77±0.81	206.45±3.03	26.78±0.50
	CTS	35.13±0.26	2.47±0.04	5.85±0.56	237.22±2.58	30.02±0.79
	RTS	33.79±1.53	2.41±0.06	5.48±0.70	226.84±2.56	29.01±0.84
	CT	31.23±1.16	2.19±0.03	4.17±0.13	191.21±6.00	27.66±0.31
10~20	NTS	25.99±0.21	1.72±0.08	4.28±0.41	250.30±3.52	22.09±0.23
	CTS	28.57±0.40	1.96±0.09	4.47±0.40	235.31±20.90	24.58±0.22
	RTS	27.24±0.28	1.72±0.08	4.17±0.17	242.45±9.76	23.47±1.32
	CT	25.38±0.40	1.43±0.04	3.01±0.43	207.21±30.00	22.70±0.41

注:表中数字为平均值±标准差。

理($P<0.05$),这可能是耕作扰动土壤导致 LF-OC 分解和无还田秸秆腐解导致外源 LF-OC 不足的结果。各处理间 LF-OC 的差异幅度较 TOC 在各处理间差异更显著,不同处理间 LF-OC 差异幅度在 0~5、5~10 cm 和 10~20 cm 土层分别达 43.26%、28.72% 和 32.66%,而 TOC 仅为 17.12%、11.10% 和 11.17%,说明 LF-OC 对农业措施响应更为灵敏。



图中柱形上端竖线为标准差,不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

图1 不同耕作措施下土壤轻组有机碳含量

Figure 1 Distribution of LF-OC under different tillage treatments

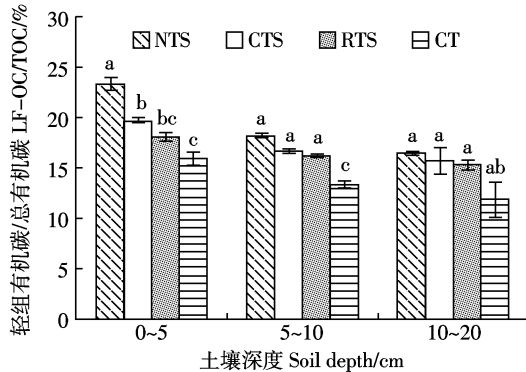


图2 不同耕作措施下轻组有机碳占总有机碳比例

Figure 2 The proportion of LF-OC in TOC under different tillage treatments

各处理土壤 HF-OC 差异较小,说明其对耕作措施的响应较慢(图3)。免耕处理和其他3个处理(CTS、RTS 和 CT)相比,0~5 cm 土层 NTS 处理 HF-OC 高于其他3个处理,且与 CTS 和 CT 处理差异显著($P<0.05$),但 5~10 cm 和 10~20 cm 土层,NTS 处理 HF-OC 均显著低于其他3个处理,可能是由于耕作扰动土壤在促使轻组有机碳分解的同时,加快了该部分有机碳与土壤粘粒的结合,有利于重组有机碳的增加。

3 讨论

本研究表明,稻田土壤轻组组分(LF)占土壤总

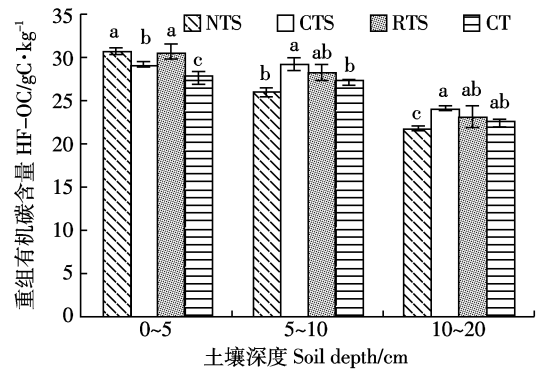


图3 不同耕作措施下重组有机碳分布特征

Figure 3 Distribution of HF-OC under different tillage treatments

重的 1.43%~4.25%,而 LF-OC 占总有机碳的 11.84%~23.31%,这主要得益于轻组中有机碳含量较高。轻组中有机碳含量介于 191.21~251.54 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$, fraction, 这与申艳等^[14](170.0~348.9 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$, fraction) 和 Barrios 等^[15](256~296 $\text{gC}\cdot\text{kg}^{-1}$, fraction) 研究结果较为一致,轻组中有机碳含量高,说明其结合的矿质颗粒少(矿质颗粒为土壤重组主要组成部分,有机碳含量很低,但十分稳定),受保护程度较低,易受耕作措施影响。

本研究中 LF-OC 约占土壤总有机碳的 11.84%~23.31%,与 Bremer^[16](9%~24%) 的研究结果较为一致,但高于 Haynes^[17](1.8%~4.6%) 和申艳等^[14](2.91%~5.87%) 的研究结果,原因可能是:①由于提取轻组的重液密度不同所致,不同重液密度提取出的 LF-OC 量差异很大。有研究表明,相对密度液从 1.59 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增加到 2.06 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,土壤中轻组干重的比例增加 5~16 倍^[18]。Christensen 认为采用相同(密度)的重液对不同土地利用方式进行评价是较为合理的^[6],因此本试验统一采用密度 1.85 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的重液评价不同耕作方式下的土壤是可取的。②可能是气候、土壤和管理措施等多方面的原因造成的,土壤中 LF-OC 含量在较大程度上受土地利用方式、耕作方式、种植作物和采样时间等影响^[19]。Janzen 研究表明,加拿大 3 个地区 0~7.5 cm 表土的 LF-OC/TOC 分别为 2.0%~5.4%、3.3%~7.1% 和 7.1%~17.5%^[8]。Gregorich 和 Janzen 对多个研究进行总结认为受多种因素影响,土壤 LF-OC 在 TOC 中含量在 2.9%~30% 之间^[20]。

土壤 LF 和 LF-OC 主要集中在表层,NTS、CTS、RTS 和 CT 4 个耕作处理表层土壤 LF、LF-OC 含量和 LF-OC/TOC 均显著高于亚表层土壤。本试验结果与针对不同地区的多数研究结果都较为一致。魏朝富

等^[21]对不同种类的紫色水稻土进行了研究,结果表明绝大部分土壤剖面中轻组有机碳含量均呈从上到下逐渐递减趋势,李月梅等^[22]和杨玉盛等^[23]亦得到了同样的研究结果。亚表层轻组有机碳较少的主要原因是外源输入量减少,因为轻组有机质主要是由未完全腐解的植物碎片、植物根系和木炭等组成,而本研究各耕作处理耕层厚度均小于20 cm,新鲜植物残体较少地分布在亚表层土壤。

研究表明,秸秆还田可显著增加 LF-OC 含量。秸秆还田等措施导致的有机碳大量投入,使活性有机碳库增加较 TOC 更为显著^[24]。本试验中 NTS 处理秸秆在 0~5 cm 土层富集,其 LF-OC 显著高于其他 3 个处理(CTS、RTS 和 CT)($P<0.05$),秸秆还田的 3 个处理(NTS、CTS 和 RTS)在耕层 0~20 cm 土壤中 LF-OC 均高于 CT 处理,说明由秸秆还田带来的外源碳输入增加了 LF-OC。Richard 等亦指出外界碳源投入量越多,LF-OC 含量越高,且对 LF-OC 影响极为显著^[25]。

本研究表明耕作对土壤的扰动会加速 LF-OC 流失,降低土壤的 LF-OC 含量。多数研究认为,对土壤进行耕翻会导致土壤有机碳的流失^[26-28],而土壤碳的流失主要是其活性碳部分的降解^[29]。本试验中 NTS 处理秸秆在 5~20 cm 土层分布较少,但其 LF-OC 含量与 RTS 和 CTS 处理差异并不显著,可能是由于后者土壤受耕作扰动而加速了 LF-OC 的分解。CT 处理即无秸秆还田带来的外源 LF-OC 投入,耕作又加速了原有 LF-OC 的分解,故其 LF-OC 含量在整个耕层土壤处于所有处理的最低水平。Roscoe 等指出由于粘土含量和 Fe+Al 氢氧化物含量较高及不断的秸秆补充,不同耕作处理间重组有机碳变化往往较小,耕翻土壤碳周转比免耕土壤更快,主要源自 LF-OC 的变化^[13]。

本试验中,免耕处理降低了 5~20 cm 土层的土壤重组有机碳。5~10 cm 和 10~20 cm 土层,NTS 处理 HF-OC 均显著低于其他两个秸秆还田处理(CTS、RTS),可能是因为亚表层土壤 LF-OC 经过较长时间的转化,形成了与粘粒结合较紧密的腐殖质^[14]。Preston 等研究表明耕作土壤导致土壤腐殖质结合碳增加了 10%^[30],土壤扰动后,在加快 LF-OC 分解的同时,可能促进了该部分有机碳与土壤粘粒的结合,而增加 HF-OC 的含量,其机理有待进一步研究。

研究表明,LF-OC 对耕作措施响应更快,可以作为指示土壤有机碳变化的灵敏指标,能够较好地指示 TOC 的动态变化。较多研究指出,LF-OC 对土壤管理措施响应较快,可较好地指示土壤有机碳的早

期变化^[31],但由于其周转时间较短,只能反映短期效应,需要更多的研究探明 LF-OC 在土壤碳周转中的作用^[8,20,32]。本研究中不同耕作处理间 LF-OC 差异较 TOC 显著,LF-OC/TOC 与 TOC 在不同处理间变化趋势一致,LF-OC/TOC 随土层加深而降低,亦与 TOC 变化趋势一致,均说明 LF-OC 比 TOC 变化剧烈,对农业措施的响应较快。LF-OC 与 TOC 表现出显著的正相关关系,说明其能够作为指示 TOC 动态变化的指标。

NTS 处理由于大量的秸秆富集增加了表层(0~5 cm)土壤 LF-OC,同时由于亚表层(5~20 cm)土壤不受扰动降低了 LF-OC 的分解速度,利于土壤 LF-OC 的增加,但亚表层外源 LF-OC 的投入不足并不利于 HF-OC 的形成,可见 NTS 利于土壤表层碳含量的增加,不利于下层土壤碳的积累。秸秆还田和适当的减少土壤耕翻次数,既可增加土壤外源碳的投入,又可降低其 LF-OC 分解速度,适当的轮耕或许能够有效增加土壤碳库^[33]。

4 结论

稻田土壤 LF 和 LF-OC 主要分布在土壤表层,且随土层加深而下降,轻组中有机碳含量介于 191.21~251.54 gC·kg⁻¹,fraction 之间,LF-OC 占土壤总有机碳的 11.84%~23.31%。LF-OC 能够作为指示稻田土壤 TOC 动态变化的指标,且灵敏性较高。

秸秆还田有利于土壤 LF-OC 的增加,而耕作则导致 LF-OC 的分解,但在外源 LF-OC 较为充足的情况下,耕作可能利用 HF-OC 的形成,利于土壤碳的积累。稻田土壤 NTS 处理利用表层碳的积累,不利于亚表层土壤碳的积累。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. 2007: Agriculture. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Jamal L, Tamaluddin S, Hiroyo N, et al. Deterioration of soil fertility by land use changes in South Sumatra, Indonesia: from 1970 to 1990[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 2003-2013.
- [4] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 345-353.
- [5] 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, 1999: 111-119.
- LU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing:

- Agriculture, Science and Technology Press of China, 1999:111-119.
- [6] Christensen B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates[J]. *Advances in Soil Science*, 1992, 20:1-90.
- [7] 尹云锋, 蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6):1022-1027.
- YI Yun-feng, CAI Zu-cong. Decomposition rates of organic carbon in whole soil and heavy fraction of red soil incorporated with maize stalks using carbon-13 natural abundance[J]. *Acta Pedol Sinica*, 2007, 44(6):1022-1027.
- [8] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America*, 1992, 56:1799-1806.
- [9] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in South Queensland IV: Loss of organic carbon from different density fractions[J]. *Aust J Soil Res*, 1986, 24:301-309.
- [10] Froking S, Qiu J J, Boles S, et al. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16:1091-1101.
- [11] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3):351-360.
- LI Zhong-pei, LIN Xin-xiong, CHE Yu-ping. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of Eastern China[J]. *Acta Pedol Sinica*, 2002, 39(3):351-360.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:56-58.
- BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000:56-58.
- [13] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70:107-119.
- [14] 申 艳, 张晓平, 梁爱珍, 等. 坡耕地黑土不同密度的土壤有机碳组分的空间分布特征[J]. *土壤通报*, 2008, 39(5):1023-1029.
- SHEN Yan, ZHANG Xiao-ping, LIANG Ai-zheng, et al. Spatial distribution of density fractions of soil organic carbon at a sloping farmland of a black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5):1023-1029.
- [15] Barrios E, Buresh R J, Sprent J I. Organic matter in soil particle size and density fraction from maize and legume cropping systems[J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28(2):185-193.
- [16] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil[J]. *Can J Soil Sci*, 1994, 74:131-138.
- [17] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:211-219.
- [18] Ladd J N, Amato M. Studies of nitrogen immobilization and mineralization in calcareous soils-IV. Changes in the organic nitrogen of light and heavy subfractions of silt- and fine clay-size particles during nitrogen turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1980, 12(2):185-189.
- [19] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤轻组有机质[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 1(2):58-64.
- NI Jin-zhi, XU Jian-min, XIE Zheng-miao. Organic matter of light fraction soils[J]. *Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control*, 2000, 1(2):58-64.
- [20] Gregorich E G, Janzen H H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter[C]//Carter M R, Stewart B A. Structure and organic matter storage in agricultural soils. America: CRC Press Inc, 1996:167-190.
- [21] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系[J]. *土壤学报*, 1996, 33(1):70-77.
- WEI Chao-fu, XIE De-ti, CHEN Shi-zheng. Relationship between organo-mineral complexing and soil particle aggregation in paddy soils developed from purple soils[J]. *Acta Pedol Sinica*, 1996, 33(1):70-77.
- [22] 李月梅, 王跃思, 曹广民, 等. 开垦对高寒草甸土壤有机碳影响的初步研究[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6):59-66.
- LI Yue-mei, WANG Yue-si, CAO Guang-min, et al. Preliminary research of effect of cultivation on soil organic carbon in alpine meadow [J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(6):59-66.
- [23] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配[J]. *生态学报*, 2004, 24(1):1-8.
- YANG Yu-sheng, LIU Yan-li, CHEN Guang-shui, et al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):1-8.
- [24] Graham M H, Haynes R J, Meyer J H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(1):93-102.
- [25] Richard D, Boone. Light-fraction soil organic matter: Origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11):1459-1468.
- [26] Mishra U, Lal R, Slater B, et al. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary Kriging[J]. *Soil Science Society of America*, 2009, 73(2):614-621.
- [27] Fabrizzi K P, Rice C W, Amado T J C, et al. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: Effect of native and agroecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 92:129-143.
- [28] Pendell D L, Williams J R, Boyles S B, et al. Soil carbon sequestration strategies with alternative tillage and nitrogen sources under risk [J]. *Review of Agricultural Economics*, 2007, 29(2):247-268.
- [29] Janzen H H, Campbell C A, Izaurralde R C, et al. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(3-4):181-195.
- [30] Preston C M, Newman R H, Rother P. Using ^{13}C CPMAS NMR to assess effects of cultivation on the organic matter of particle size fractions in a grassland soil[J]. *Soil Science*, 1994, 157(1):26-35.
- [31] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12):1647-1656.
- [32] Barrios E, Buresh R J, Sprent J I. Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(2):185-193.
- [33] 孙国峰, 陈 卓, 李 琳, 等. 耕作措施对长期免耕双季稻田土壤碳库的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(6):45-49.
- SUN Guo-feng, CHEN Fu, LI Lin, et al. Effects of tillage on the carbon pool of paddy soil with long-term no-tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2007, 12(6):45-49.