

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.021

郑佳舜, 胡钧铭, 韦燕燕, 等. 绿肥还田对粉垄稻田土壤活性有机碳的影响. 土壤, 2021, 53(2): 368–374.

## 绿肥还田对粉垄稻田土壤活性有机碳的影响<sup>①</sup>

郑佳舜<sup>1,2</sup>, 胡钧铭<sup>1\*</sup>, 韦燕燕<sup>2</sup>, 申章佑<sup>3</sup>, 蒙炎成<sup>1</sup>, 韦翔华<sup>2</sup>

(1 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2 广西大学农学院, 南宁 530004; 3 广西农业科学院经济作物研究所, 南宁 530007)

**摘要:** 绿肥还田是影响农田土壤有机质的重要手段, 为探索绿肥还田对粉垄稻田土壤活性有机碳的影响, 采用常耕和粉垄栽培水稻, 以不施肥、单一施用化肥、同等肥力条件下单倍绿肥配施化肥和双倍绿肥配施化肥共 4 种施肥处理, 系统开展粉垄耕作稻田土壤活性有机碳研究。结果表明: ①粉垄耕作减少了稻田土壤总有机碳含量, 提高绿肥还田量有助于粉垄稻田土壤总有机碳的提高, 双倍绿肥还田下提高 25.6%~60.1%, 而单倍绿肥还田有助于剖面各层土壤总有机碳积累; ②绿肥还田增加了粉垄稻田土壤活性有机碳含量, 提高了土壤固碳水平; 随着绿肥还田量的增加可有效提高粉垄稻田土壤碳库管理指数, 粉垄条件下单倍绿肥还田低、中、高活性有机碳分别增加了 28.4%~47.9%、37.3%~49.9%、30.1%~49.6%, 而双倍绿肥还田时分别增加 47.8%~64.3%、40.0%~61.3%、29.6%~59.7%; ③粉垄耕作下的稻田土壤总有机碳和碳库管理指数在孕穗期及其之后, 随生长时期呈线性变化规律, 决定系数  $R^2$  高达 0.999。绿肥还田下粉垄稻田土壤非活性有机碳占比随土层厚度的增加呈缓慢降低趋势, 决定系数  $R^2$  达 0.998~0.999, 对土壤活性有机碳的纵向迁移和变化的潜在激发利用效率规律明显。可见, 绿肥还田能有效增加粉垄稻田土壤有机碳储量和活性有机碳的稳定性, 对调控稻田土壤碳库及改善土壤质量具有重要的促进作用。

**关键词:** 绿肥还田; 水稻田; 粉垄; 土壤活性有机碳; 碳库管理指数

中图分类号: S-3 文献标志码: A

## Effects of Green Manure Returning on Soil Labile Organic Carbon in Paddy Field Under Smash Ridging

ZHENG Jiashun<sup>1,2</sup>, HU Junming<sup>1\*</sup>, WEI Yanyan<sup>2</sup>, SHEN Zhangyou<sup>3</sup>, MENG Yancheng<sup>1</sup>, WEI Xianghua<sup>2</sup>

(1 Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2 Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3 Cash Crop Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Green manure returning is an important way to affect soil organic matter in farmland. In this paper, paddy fields were cultivated under conventional tillage and smash ridging respectively and four fertilization modes were carried out in order to explore the effect of green manure returning on soil labile organic carbon (LOC) in paddy field under smash ridging, the fertilization modes included: 1) no fertilizer, 2) single chemical fertilizers, 3) single green manure with chemical fertilizers under same fertility as single chemical fertilizers, and 4) double green manure with chemical fertilizers under same fertility as single chemical fertilizers. The results showed that: 1) Smashing ridging reduced the content of soil total organic carbon (TOC). Increasing green manure returning promoted soil TOC content under smash ridging, in which double green manure returning increased soil TOC content by 25.6%–60.1%, while single green manure increased TOC contents in all layers of soil profiles. 2) Green manure returning increased the content of soil labile organic carbon (LOC) and improved soil carbon sequestration level under smash ridging, and increasing green manure also improved soil carbon pool management index (CPMI) under smash ridging. Under smash ridging, the contents of low, medium and high LOC were increased by 28.4%–47.9%, 37.3%–49.9% and 30.1%–49.6% under single green manure returning, and by 47.8%–64.3%, 40.0%–61.3% and 29.6%–59.7% under double green

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41661074)、广西“新世纪十百千人才工程”专项资金(2018221)和广西科技计划项目(桂科 AA17204078-2、桂科 AD18281089)资助。

\* 通讯作者(jmhu06@126.com)

作者简介: 郑佳舜(1995—), 女, 广西柳州人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境生态研究。E-mail: ashunz08@163.com

manure returning, respectively. 3) Soil TOC and CPMI under smash ridging changed linearly with the growth stages at and after booting stage ( $R^2$  was 0.999). Under smash ridging, with the increase of soil depth, the proportion of soil non-labile organic carbon (NLOC) with green manure returning showed a slow linear decrease ( $R^2$  was 0.998–0.999), indicating a regular effect of green manure returning on potential utilization efficiency of the vertical migration and change of soil LOC. Therefore, green manure returning can effectively increase soil organic carbon storage and the stability of labile organic carbon under smash ridging, which is important in regulating soil carbon pool and improving soil quality.

**Key words:** Green manure returning to field; Paddy field; Smash ridging; Soil labile organic carbon; Carbon pool management index

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,农田土壤碳库与土壤碳循环、全球气候变化密不可分<sup>[1]</sup>,土壤有机碳在全球 CO<sub>2</sub> 动态变化中扮演着重要角色<sup>[2]</sup>。在国家农田化肥减量增效的绿色发展背景下,探索土壤碳循环与土壤养分供给意义巨大。农业有机物是调控土壤环境的重要手段<sup>[3]</sup>,影响土壤碳储量和碳循环<sup>[4]</sup>。土壤活性有机碳能有效表征土壤物质循环、潜在生产力以及土壤管理措施引起的土壤有机碳变化特征<sup>[5]</sup>。土壤碳库管理指数是反映土壤固碳能力的重要标志,其结合土壤有机碳活性和土壤养分,表征外界条件变化对土壤有机质性质的影响<sup>[6]</sup>,被广泛用于农业生态系统中土壤质量与健康状况评价<sup>[7-9]</sup>。

耕作和农田有机资源投入是驱动土壤碳库周转的重要因素<sup>[10]</sup>。有研究显示,剧烈的耕作会扰动土壤,加剧农田土壤水土流失,土壤有机碳矿化损失严重,导致土壤质量下降<sup>[11]</sup>。减少耕作强度有助于改善土壤结构,提高土壤有机碳<sup>[12-13]</sup>。秸秆有机资源还田可以提高土壤碳库指数,增加土壤活性有机碳组分<sup>[14]</sup>。长期旋耕配施秸秆还田下的土壤有机碳的活性有机碳比例较高,将旋耕转变为深松可显著降低土壤活性有机碳在总有机碳的比例<sup>[15]</sup>。绿肥还田是改良土壤的重要手段,明确绿肥还田条件下对稻田耕层土壤不同活性有机碳的影响尤为必要。本研究从水稻生育期土壤活性有机碳库随时间变化、土壤垂直空间活性有机碳库环境变化角度,系统探讨绿肥还田对粉垄稻田土壤有机碳储量和活性有机碳稳定性的影响,为稻田土壤活性有机碳库调控及土壤质量提升提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

2016—2018 年在广西农业科学院试验基地开展水稻定位试验,试验区属亚热带季风性气候,是水热资源丰富的典型南方双季籼稻区。2016 年 10 月和 2017 年 10 月分别种植冬绿肥紫云英,2017 年 4 月和

2018 年 4 月起开始分别移栽种植双季水稻。研究选择 2018 年的土壤活性有机碳测试,以考察绿肥还田对粉垄稻田土壤的第二年定位累积效应。

土壤基本性质:pH 6.6,全氮 1.80 g/kg,全磷 0.92 g/kg,全钾 7.43 g/kg,有效磷 37.90 mg/kg,有机质 24.50 g/kg,水解性氮 131.00 mg/kg,速效钾 97.80 mg/kg。压青绿肥为紫云英(干基养分 N 2.7%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.65%、K<sub>2</sub>O 2.5%),化肥施用包括复合肥(N 14.64%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 14.92%、K<sub>2</sub>O 15.08%)、尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>15%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 62.7%)。

### 1.2 试验设计和样品采集

**1.2.1 试验设计** 试验小区面积 7.41 m × 6.21 m,供试水稻品种为三系籼超级稻,特优 582,株行距 12 cm × 24 cm,每穴 2 株插苗,4 月 4 日移栽,生育期为 110 d。试验设置常规耕作、粉垄耕作 2 种耕作模式,粉垄深旋耕利用垂直螺旋型钻头刀片高速横向切割土壤碎土,一次性完成自然悬浮成垄将土壤耕层加深至 30 cm<sup>[16-17]</sup>,采用传统拖拉机进行常规耕作。以不施肥为空白对照,在同等养分条件下以常规施用化肥(N 240 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 240 kg/hm<sup>2</sup>)为参考标准,在同等养分条件下双倍绿肥提供的养分 N 代替化肥中的 100% 养分 N,单倍绿肥提供的养分 N 代替化肥中 50% 的养分 N,进行设计。3 种施肥方式为:100% 化肥(804.4 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥、260.9 kg/hm<sup>2</sup> 尿素、195.7 kg/hm<sup>2</sup> 氯化钾)、单倍绿肥配施化肥(35 586.6 kg/hm<sup>2</sup> 绿肥,配施 608.7 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥、65.2 kg/hm<sup>2</sup> 尿素、65.2 kg/hm<sup>2</sup> 氯化钾)、双倍绿肥配施化肥(71 173.1 kg/hm<sup>2</sup> 绿肥,配施 414.8 kg/hm<sup>2</sup> 过磷酸钙、28.0 kg/hm<sup>2</sup> 氯化钾),共 8 处理,每处理 3 次重复,各处理如表 1 所示。田间管理按常规超级稻生产进行。

**1.2.2 样品采集** 采用土钻在水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期和收获期(分别为移栽后 20、40、60、90 d)4 个生育期采集 0~15 cm 土壤样品:用尺子标记土钻底部至下而上的 15 cm 长度,土钻取样时土壤样品需达到

标记线。在水稻收获后挖取土壤剖面,用刀片至上而下 分别刮取 0~15、15~30、30~45 cm 的剖面土。

表 1 试验处理设置  
Table 1 Experimental treatments

耕作模式	不施肥(N)	100% 化肥(N <sub>0</sub> )	单倍绿肥配施化肥(N <sub>1</sub> )	双倍绿肥配施化肥(N <sub>2</sub> )
常规耕作(C)	CN	CN <sub>0</sub>	CN <sub>1</sub>	CN <sub>2</sub>
粉垄耕作(F)	FN	FN <sub>0</sub>	FN <sub>1</sub>	FN <sub>2</sub>

### 1.3 试验方法和计算

土壤活性有机碳(LOC)采用KMnO<sub>4</sub>氧化法测定<sup>[6]</sup>:根据 KMnO<sub>4</sub>浓度的变化求出样品的不同活性有机碳含量,其中以浓度 333 mmol/L KMnO<sub>4</sub>测定低活性有机碳(即易氧化有机碳),是活性有机碳中活性最高、最容易被氧化的那部分活性有机碳;以浓度 176 mmol/L KMnO<sub>4</sub>测定中活性有机碳;以浓度 33.3 mmol/L KMnO<sub>4</sub>测定高活性有机碳。总有机碳采用高温重铬酸钾-外热法测定<sup>[18]</sup>。

土壤碳库管理指数(CPMI)以不施肥土壤为参考,均以易氧化有机碳作为活性有机碳标准,计算公式<sup>[6]</sup>为:

$$\text{碳库管理指数(CPMI)} = \text{碳库指数} \times \text{碳库活度指数} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{碳库指数(CPI)} = \frac{\text{样本土壤有机碳含量}}{\text{参考土壤有机碳含量}} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度指数(AI)} = \frac{\text{样本土壤碳库活度}}{\text{参考土壤碳库活度}} \quad (3)$$

$$\text{碳库活度(CA)} = \frac{\text{活性有机碳含量}}{\text{非活性有机碳含量}} \quad (4)$$

$$\text{非活性有机碳含量(NLOC)} = \text{有机碳含量} - \text{活性有机碳含量} \quad (5)$$

### 1.4 数据分析和处理

试验数据采用 IBM SPSS Statistics 19 软件分析,

Microsoft Excel 2010 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥还田对粉垄稻田土壤总有机碳的影响

如图 1A 所示,分蘖期土壤总有机碳(TOC)含量最高,稻田各生育期土壤 TOC 含量呈波动变化。粉垄耕作降低了各生育期土壤 TOC 含量,同种施肥方式下,FN<sub>0</sub>比CN<sub>0</sub>降低 3.14~6.11 g/kg;绿肥还田减少了粉垄与常耕之间 TOC 含量的差异:FN<sub>1</sub>比CN<sub>1</sub>降低 1.45~3.42 g/kg,而FN<sub>2</sub>比CN<sub>2</sub>降低 2.60~3.47 g/kg。随着绿肥的增加,粉垄稻田土壤 TOC 含量逐渐增加,FN<sub>2</sub>较FN<sub>0</sub>提高了 25.6%~60.1%,FN<sub>1</sub>较FN<sub>0</sub>提高了 14.6%~48.8%。在常规耕作中,绿肥的增加提高了分蘖期、孕穗期、收获期土壤 TOC 含量。

如图 1B 所示,随着土层加深,土壤 TOC 含量逐渐递减。粉垄耕作下,FN<sub>0</sub>、FN<sub>1</sub>、FN<sub>2</sub>3 个处理在 15~30 cm 比 0~15 cm 的土壤 TOC 分别降低 30.8%、33.0%、33.16%,降低率均低于同种施肥方式下的常规耕作;将 30~45 cm 与 15~30 cm 土壤 TOC 比较,依然表现为粉垄耕作的降低率更低,说明粉垄耕作能综合各土层间 TOC 的运移。水稻收割后剖面土 0~15 cm 与如图 1A 收获期的土壤 TOC 特征不同:FN、FN<sub>0</sub>、FN<sub>1</sub> 与同种施肥方式的常规耕作相比分别增加了 20.7%、1.2%、7.6%,仅 FN<sub>2</sub> 较 CN<sub>2</sub> 降低 1.9%;此

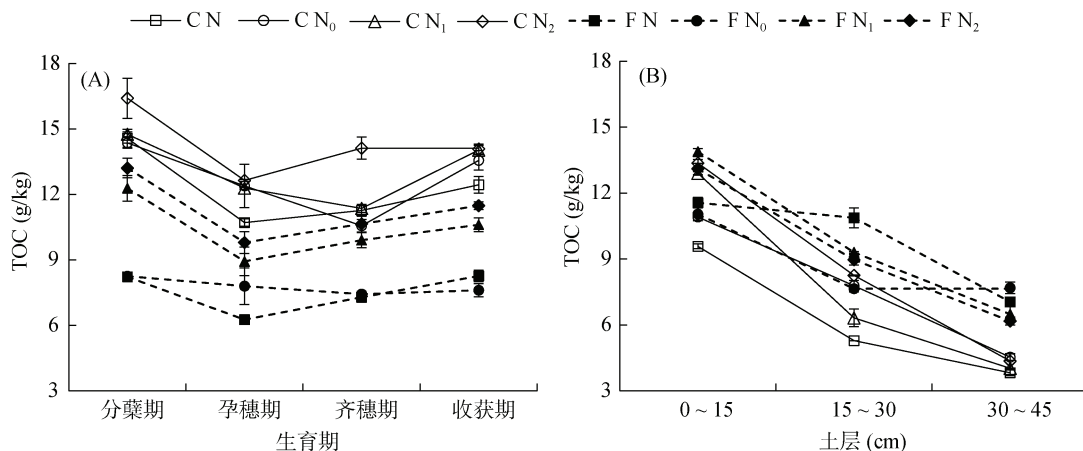


图 1 稻田土壤总有机碳含量

Fig. 1 The content of soil total organic carbon in paddy fields

外,  $FN_1$  和  $FN_2$  较  $FN_0$  分别增加 25.7% 和 18.7%。15 ~ 30 cm 土壤中,  $FN_1$ 、 $FN_2$  较  $CN_1$  和  $CN_2$  分别增加 47.3% 和 8.7%, 而  $FN_0$  较  $CN_0$  降低了 1.7%,  $FN_1$  和  $FN_2$  较  $FN_0$  分别增加 21.6% 和 17.3%。30 ~ 45 cm 土壤中, 粉垄耕作下的土壤 TOC 含量均高于常规耕作, 增加了 41.7% ~ 84.4%。因此, 粉垄耕作能较有效提高剖面各土层土壤 TOC 含量, 绿肥还田相比单施化肥降低了粉垄稻田 30 ~ 45 cm 土壤 TOC 含量, 单倍绿肥还田降低地较少, 相比双倍绿肥还田更能提高粉垄稻田 0 ~ 30 cm 土壤 TOC 含量。

## 2.2 绿肥还田对粉垄稻田土壤活性有机碳含量的影响

如表 2 所示, 粉垄耕作水稻各生育期土壤低活性有机碳(LLOC)、中活性有机碳(MLOC)、高活性有机碳(HLOC)含量均显著低于常规耕作, 绿肥还田提高了粉垄耕作下水稻各生育期土壤的各级活性有机碳(LOC)

含量, 多数时期表现为  $FN_2 > FN_1 > FN_0$ , 分蘖期、齐穗期的土壤 MLOC 和分蘖期的土壤 HLOC 表现为  $FN_1 > FN_2$ 。水稻收割后剖面土 0 ~ 15 cm 与未收割水稻时收获期 0 ~ 15 cm 土壤 LOC 含量特征不同: 同一施肥方式下, 土壤 MLOC 和 HLOC 表现为  $FN_1 < CN_1$ , 土壤 HLOC 表现为  $FN_2 < CN_2$ ; 粉垄耕作中土壤 LLOC 和 HLOC 含量随绿肥的增加而降低, 与  $FN_0$  相比表现为  $FN_1 > FN_2 \geq FN_0$ , 而  $FN_1$  和  $FN_2$  的土壤 MLOC 分别较  $FN_0$  降低了 12.3% 和 27.6%。15 ~ 30 cm 土壤中, 与同种施肥方式下的常耕耕作相比, 粉垄耕作  $FN_1$  和  $FN_2$  处理土壤 LOC 多数表现为降低, 而  $FN_2$  较  $CN_2$  的土壤 MLOC 增加 19.3%; 绿肥的增加能较有效提高该土层粉垄稻田土壤 LOC 含量, 但  $FN_1$  较  $FN_0$  降低 0.5%。30 ~ 45 cm 土壤中, 与同种施肥方式下的常耕相比,  $FN_2$  处理土壤 LOC 含量总体表现为降低, 而  $FN_1$  的土壤 MLOC 和 HLOC 含量分别增加 134.3% 和 27.3%。

表 2 稻田土壤活性有机碳含量  
Table 2 The content of soil labile organic carbon in paddy fields

活性有机碳	项目	CN	$CN_0$	$CN_1$	$CN_2$	FN	$FN_0$	$FN_1$	$FN_2$		
LLOC	生育期	分蘖期	5.32 ± 0.03 b	5.64 ± 0.13 ab	5.87 ± 0.02 a	5.94 ± 0.28 a	3.49 ± 0.13 d	3.11 ± 0.12 d	4.76 ± 0.09 c	5.27 ± 0.24 b	
		孕穗期	3.26 ± 0.09 b	3.65 ± 0.20 b	4.73 ± 0.20 a	4.56 ± 0.10 a	2.26 ± 0.12 c	2.34 ± 0.18 c	3.34 ± 0.18 b	3.71 ± 0.11 b	
		齐穗期	3.35 ± 0.02 b	3.07 ± 0.03 c	3.37 ± 0.05 b	4.16 ± 0.07 a	2.22 ± 0.01 e	2.23 ± 0.07 e	2.84 ± 0.08 d	3.28 ± 0.03 b	
		收获期	3.08 ± 0.13 b	3.69 ± 0.08 a	3.66 ± 0.13 a	3.71 ± 0.03 a	1.61 ± 0.05 e	1.46 ± 0.03 e	2.18 ± 0.07 d	2.44 ± 0.05 c	
	土层(cm)	0 ~ 15	3.23 ± 0.28 a	3.35 ± 0.03 bc	3.29 ± 0.08 bc	3.28 ± 0.01 bcd	3.00 ± 0.05 e	2.81 ± 0.05 ab	3.24 ± 0.14 ab	2.81 ± 0.00 cd	
		15 ~ 30	2.54 ± 0.11 ab	2.47 ± 0.00 b	3.35 ± 0.27 ab	2.61 ± 0.01 ab	2.71 ± 0.01 a	2.47 ± 0.01 b	2.46 ± 0.11 b	2.48 ± 0.03 b	
		30 ~ 45	2.90 ± 0.15 a	2.50 ± 0.01 abc	2.46 ± 0.11 abc	2.52 ± 0.01 ab	2.65 ± 0.05 a	2.38 ± 0.03 abc	1.93 ± 0.36 c	2.04 ± 0.20 bc	
	MLOC	生育期	分蘖期	2.88 ± 0.08 a	2.74 ± 0.10 a	3.11 ± 0.08 a	3.06 ± 0.15 a	1.50 ± 0.06 c	1.31 ± 0.00 c	2.25 ± 0.12 b	2.12 ± 0.11 b
			孕穗期	2.07 ± 0.11 bc	2.08 ± 0.04 b	2.65 ± 0.09 a	2.64 ± 0.15 a	1.26 ± 0.07 d	1.40 ± 0.08 d	1.80 ± 0.06 c	2.04 ± 0.04 bc
			齐穗期	2.33 ± 0.05 bc	2.15 ± 0.03 c	2.38 ± 0.06 b	2.85 ± 0.09 a	1.31 ± 0.03 e	1.39 ± 0.01 e	1.96 ± 0.11 d	1.85 ± 0.05 d
			收获期	2.68 ± 0.07 b	2.84 ± 0.16 ab	3.00 ± 0.08 a	2.97 ± 0.10 a	1.49 ± 0.03 d	1.50 ± 0.05 d	2.05 ± 0.02 c	2.15 ± 0.03 c
		土层(cm)	0 ~ 15	1.67 ± 0.14 de	2.12 ± 0.09 bc	2.08 ± 0.05 bc	2.04 ± 0.09 bcd	1.57 ± 0.00 e	2.74 ± 0.23 a	2.40 ± 0.05 ab	1.98 ± 0.04 cd
15 ~ 30			1.50 ± 0.36 a	0.99 ± 0.01 bc	1.05 ± 0.05 abc	0.77 ± 0.04 cd	1.44 ± 0.07 ab	0.50 ± 0.09 d	0.63 ± 0.01 cd	0.92 ± 0.03 cd	
30 ~ 45			0.44 ± 0.31 a	0.41 ± 0.03 a	0.15 ± 0.12 a	0.42 ± 0.01 a	0.61 ± 0.18 a	0.25 ± 0.18 a	0.35 ± 0.08 a	0.32 ± 0.03 a	
HLOC		生育期	分蘖期	1.26 ± 0.06 a	1.06 ± 0.02 b	1.30 ± 0.04 a	1.26 ± 0.08 a	0.73 ± 0.01 d	0.68 ± 0.02 d	1.02 ± 0.02 b	0.95 ± 0.05 b
			孕穗期	1.20 ± 0.08 bc	1.21 ± 0.06 bc	1.39 ± 0.08 a	1.28 ± 0.01 ab	0.80 ± 0.03 e	0.87 ± 0.06 de	1.04 ± 0.04 cd	1.17 ± 0.04 bc
			齐穗期	0.99 ± 0.08 ab	0.94 ± 0.05 bc	1.01 ± 0.06 ab	1.12 ± 0.01 a	0.63 ± 0.02 d	0.65 ± 0.02 d	0.81 ± 0.00 c	0.83 ± 0.02 c
			收获期	1.01 ± 0.04 abc	1.05 ± 0.03 ab	0.99 ± 0.05 bc	1.12 ± 0.04 a	0.61 ± 0.04 d	0.61 ± 0.03 d	0.92 ± 0.02 c	0.98 ± 0.04 bc
		土层(cm)	0 ~ 15	0.93 ± 0.07 e	1.19 ± 0.03 abc	1.24 ± 0.03 ab	1.09 ± 0.01 cd	0.92 ± 0.03 e	1.01 ± 0.01 de	1.32 ± 0.00 a	1.11 ± 0.08 bcd
	15 ~ 30		0.72 ± 0.28 ab	0.55 ± 0.01 ab	0.59 ± 0.00 ab	0.59 ± 0.29 ab	1.01 ± 0.15 a	0.26 ± 0.01 b	0.28 ± 0.04 b	0.47 ± 0.04 ab	
	30 ~ 45		0.23 ± 0.01 b	0.12 ± 0.09 b	0.15 ± 0.01 b	0.43 ± 0.00 a	0.16 ± 0.11 b	0.20 ± 0.04 b	0.19 ± 0.00 b	0.12 ± 0.07 b	

注: LLOC: 低活性有机碳; MLOC: 中活性有机碳; HLOC: 高活性有机碳。表中同行小写字母不同表示不同处理间土壤活性有机碳含量差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.3 绿肥还田对粉垄稻田土壤非活性有机碳占比的影响

降低土壤非活性有机碳(NLOC)在总有机碳中的占比,是提高土壤有机碳利用的基础,即:土壤 NLOC 占比越少,土壤 LOC 的可激活率越高,对土壤碳库应用尺度越大。如图 2A 所示,水稻生长时间越长,土壤 NLOC 占比越高。将各处理按 4 个生育期拟合合成直线,粉垄耕作的决定系数  $R^2$  均高于常规耕作,且 FN 处理在前 3 个生育期中  $R^2$  达 0.999, FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 在后 3 个生育期中  $R^2$  分别可达 0.999 和 0.992,说明粉垄耕作土壤 NLOC 占比在对应时期随时间增加而增加,且呈线性变化规律。与常耕相比, FN<sub>1</sub> 较 CN<sub>1</sub> 在前 3 个生育期 NLOC 增加 1.3%~1.7%,在收获期增加最多,达 7.5%; FN<sub>2</sub> 较 CN<sub>2</sub> 在前 3 个生育期降低 1.8%~5.7%,在收获期增加 7.0%。粉垄耕作中,与 FN<sub>0</sub> 相比, FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 的 NLOC 占比逐渐降低,但 FN<sub>1</sub> 在齐穗期增加 1.8%。

随着土层的加深,土壤 NLOC 占比逐渐降低(图 2B)。水稻收割后剖面土 0~15 cm 与如图 2A 收获期的土壤 NLOC 占比特征不同:与 FN<sub>0</sub> 相比, FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 分别增加 2.8% 和 5.4%,而 15~30 cm 中 FN<sub>2</sub> 增加率会低于 FN<sub>1</sub>;至 30~45 cm 时, FN<sub>2</sub> 较 FN<sub>0</sub> 降低 3.1%,而 FN<sub>1</sub> 仍然高 FN<sub>0</sub> 1.7%。与常规耕作相比, FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 的土壤 NLOC 占比表现为增加, FN<sub>1</sub> 在 15~45 cm 增加较多, FN<sub>2</sub> 在 0~30 cm 增加较多,且 FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 在 30~45 cm 中的土壤 NLOC 占比远高于 CN<sub>1</sub> 和 CN<sub>2</sub>,分别增了 80.6% 和 59.3%。若将各处理按 3 个土层拟合直线, FN<sub>1</sub> 和 FN<sub>2</sub> 决定系数  $R^2$  分别达 0.999 和 0.998,说明土壤 NLOC 占比随土层的加深而降低,呈线性变化规律。

### 2.4 绿肥还田对粉垄稻田土壤碳库管理指数的影响

粉垄耕作的土壤碳库管理指数(CPMI)始终低于常规耕作。如图 3A 所示,水稻孕穗期出现土壤 CPMI

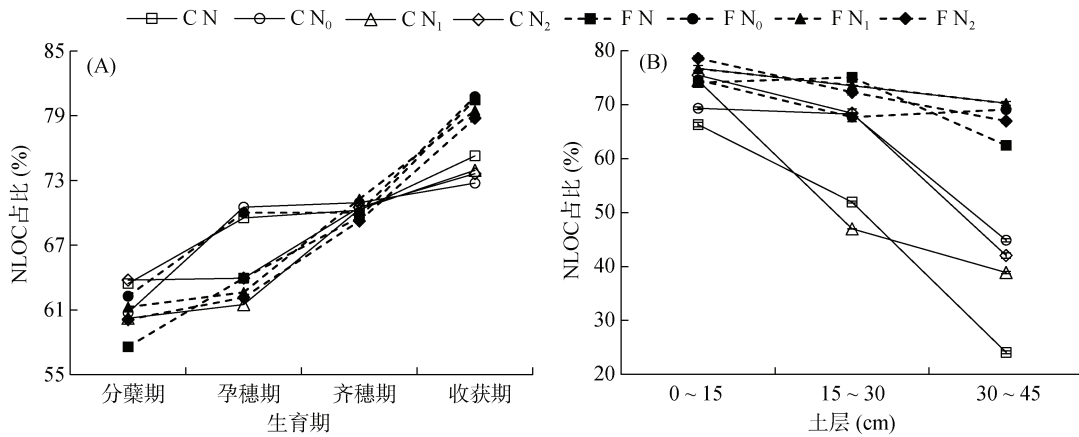


图 2 稻田土壤非活性有机碳的占比  
Fig. 2 The proportions of soil non-labile organic carbon in paddy fields

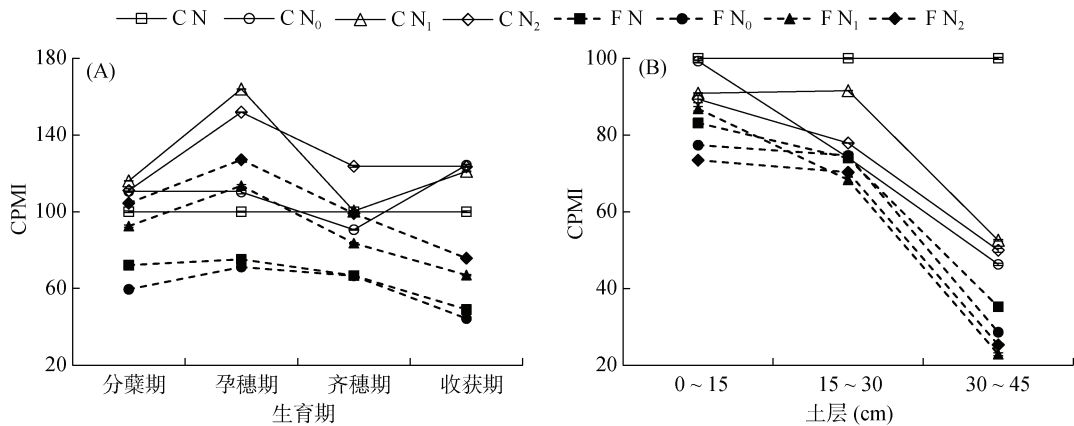


图 3 稻田土壤碳库管理指数  
Fig. 3 Carbon pool management indexes in paddy fields

最大值, 绿肥的增加提高了粉垄稻田各生育期土壤 CPMI, 粉垄耕作后 3 个时期呈负线性相关,  $FN_1$  和  $FN_2$  决定系数  $R^2$  分别达 0.973 和 0.997, 随水稻的生长土壤 CPMI 逐渐降低。绿肥的增加减小了各生育期粉垄与常规耕作土壤 CPMI 的降低率: 4 个关键期中  $FN_0$  较  $CN_0$  减少了 28.4% ~ 60.7%,  $FN_1$  较  $CN_1$  减少了 22.3% ~ 40.5%,  $FN_2$  较  $CN_2$  减少了 8.7% ~ 38.4%。

如图 3B 所示, 水稻收割后剖面土 0 ~ 15 cm 与图 3A 收获期的土壤 CPMI 特征不同: 粉垄耕作中  $FN_2$  低于其他施肥处理。 $CN_0$  随土层的增加土壤 CPMI 呈线性降低, 决定系数  $R^2$  达 0.999。15 ~ 30 cm 和 30 ~ 45 cm 土壤 CPMI 均表现为  $FN_1$  和  $FN_2$  低于  $FN_0$ , 其中  $FN_1$  降低得较多, 分别降低 8.5% 和 20.1%,  $FN_2$  降低得较少。与常耕相比, 粉垄稻田土壤 15 ~ 30 cm 到 30 ~ 45 cm 的土壤 CPMI 降低更快。

### 3 讨论

绿肥还田能有效提高粉垄稻田土壤固碳水平。耕地对土壤扰动会降低土壤团聚体的稳定性, 不利于保证土壤有机碳的积累, 降低了土壤固碳能力<sup>[11, 19]</sup>, 绿肥还田将土壤新的碳储量进行更新和积累, 提高有机碳库存<sup>[20]</sup>。绿肥中含有大量的养分及高活性有机碳<sup>[21]</sup>, 同时促进了土壤原有有机碳转变成易被作物吸收利用的活性有机碳<sup>[6]</sup>。绿肥易分解有机物的稳定性越小, 其碳损失较大<sup>[22]</sup>。也有学者认为, 与碳输入量相比, 土壤自身对有机碳的扭转水平更能影响土壤对外源有机碳的固持作用<sup>[23]</sup>, 粉垄耕作对土壤有机碳的扭转具有一定的促进作用。水稻分蘖期土壤有机碳最高, 绿肥的增加可有效提高粉垄双季稻田土壤碳库管理指数, 且在孕穗期最高、收获期最低。分析其原因可能是水稻分蘖期是化肥养分溶解或绿肥腐解的重要时期, 多处淹水状态, 养分运移最为活跃, 刺激了土壤微生物的繁殖和生长<sup>[24]</sup>, 促进土壤有机质的更新与活化<sup>[25]</sup>, 对有机碳的提升起到了关键作用。水稻分蘖期低活性有机碳含量降低, 可能是水稻因绿肥腐解为高活性有机碳提供了直接来源<sup>[26]</sup>, 有效提高了生育初期土壤中、高活性有机碳含量, 在一定程度上对低活性有机碳的降低有着间接的影响。

绿肥还田影响粉垄稻田土壤垂直空间活性有机碳稳定性, 低活性有机碳 > 中活性有机碳 > 高活性有机碳。由高至低活性有机碳, 若较高一级与较低一级的活性有机碳的降低率越低, 说明其较高一级的有机碳含量更加接近较低一级, 活性有机碳含量级别越低, 所呈现的土壤易氧化程度越高。不同活性的有机

碳组分可以灵敏地反映土壤质量和土壤有机质有效组分的变化状况<sup>[27]</sup>。绿肥中含有大量的养分及高活性有机碳<sup>[21]</sup>, 尤其是新鲜的有机资源粉碎后腐解产生的热量, 有助于改善、优化土壤结构, 在一定程度上保持土壤的温度和水分条件<sup>[28]</sup>, 促进了土壤原有有机碳转变成易被作物吸收利用的活性有机碳。而当前对稻田剖面土壤活性有机碳的运移分布特征研究甚少, 本研究通过绿肥粉垄耦合下稻田剖面土壤各级活性有机碳转变特征受粉垄耕作、绿肥投入的共同影响。特征如下: ①粉垄耕作能有效增加 0 ~ 15 cm 稻田土壤中活性有机碳向低活性有机碳的易氧化程度, 绿肥还田增加粉垄稻田 0 ~ 15 cm 土壤高活性有机碳向中活性有机碳的易氧化程度; ②双倍绿肥还田粉垄耕作加速 15 ~ 30 cm 土壤中活性有机碳向低活性有机碳、高活性有机碳向中活性有机碳的易氧化程度; ③粉垄耕作有效增加稻田 30 ~ 45 cm 土壤中活性有机碳向低活性有机碳转变的易氧化程度, 增加高活性有机碳向中活性有机碳的易氧化程度。但其发生原因有待深入研究, 该结果可为进一步的研究提供基础。

粉垄耕作对土壤有机碳的扭转具有一定的促进作用, 能减缓各垂直空间土壤有机碳随土层下降的程度。Liang 等<sup>[29]</sup>认为, 深层土壤的养分含量比表层土壤更低, 当外源易分解有机物进入深层土壤时, 土壤有机碳的矿化会受到限制。赵满兴等<sup>[30]</sup>研究发现, 土壤的耕层和母质层对可溶性有机碳的吸附能力相对较弱, 施用有机肥后对可溶性有机碳在土壤中的移动性较强, 会增加环境风险。然而本研究中, 粉垄耕作通过改变土壤空间移动, 改善了土壤结构, 有助于优化稻田土壤的碳纵向迁移过程。绿肥的增加提高了水稻收获期 0 ~ 15 cm 土壤的有机碳, 这是有机资源对土壤碳的直接作用<sup>[20]</sup>。单倍绿肥还田增加了粉垄稻田剖面各土层有机碳积累, 这可能是化肥中 50% 的养分氮被单倍绿肥中的养分氮替代, 恰好达到一定介质, 促进土壤的扭转<sup>[23]</sup>, 加速了土壤有机酸的活化。水稻收割后剖面土 0 ~ 15 cm 与未收割水稻收获期 0 ~ 15 cm 土壤的有机碳、活性有机碳、碳库管理指数特征有所差异, 造成收割后 0 ~ 15 cm 剖面土在粉垄耕作下的有机碳、活性有机碳、碳库管理指数相比收获期 0 ~ 15 cm 土壤偏高。常规耕作下偏低的原因: ①收获前的土壤有水稻植株种植间隔覆盖, 而挖掘剖面土是在水稻收割之后, 土壤有机碳受到水稻收获前后植株凋零物中易氧化有机质的影响; ②各生育期 0 ~ 15 cm 土壤采用土钻取样, 取样过程受到压实, 实际取样深度可能偏大, 而取样剖面土先用卷尺测量

再至上而下刮取,即为实际取样深度。

#### 4 结论

绿肥还田能有效增加粉垄稻田土壤有机碳储量和活性有机碳的稳定性,对稻田耕层土壤至上而下地激发各级活性有机碳的运移和潜在利用具有积极的线性变化规律。提高绿肥还田量是提升粉垄稻田各生育期表层土壤活性有机碳及有机碳储备的重要因素。但单倍绿肥还田有助于提高粉垄稻田剖面土有机碳的积累,调控粉垄耕作背景下土壤垂直空间活性有机碳库环境。

#### 参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [2] 张玉军, 黄绍敏, 李斌, 等. 长期施肥对潮土不同层次活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 160–165.
- [3] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4542–4548.
- [4] Unger S, Máguas C, Pereira J S, et al. Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean oak savannah[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154/155: 9–18.
- [5] Blagodatskaya E, Yuyukina T, Blagodatsky S, et al. Turnover of soil organic matter and of microbial biomass under C3-C4 vegetation change: Consideration of  $^{13}\text{C}$  fractionation and preferential substrate utilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 159–166.
- [6] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 459–465.
- [7] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156(1): 399–402.
- [8] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5546 – 5554.
- [9] 蔺芳, 邢晶鑫, 任思敏, 等. 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 183–189, 196.
- [10] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 121–127.
- [11] 张霞, 杜昊辉, 王旭东, 等. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2223 – 2237.
- [12] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [13] 李倩, 李晓秀, 吴会军, 等. 不同气候和施肥条件下保护性耕作对农田土壤碳氮储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1539–1549.
- [14] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 915–921.
- [15] 田慎重, 郭洪海, 董晓霞, 等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 39–45.
- [16] 郑佳舜, 胡钧铭, 韦翔华, 等. 绿肥压青粉垄保护性耕作对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(1): 15–24.
- [17] 蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 588–596.
- [18] 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: 13–14, 106–110, 272–276.
- [19] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2341–2348.
- [20] Dolan M S, Clapp C E, Allmaras R R, et al. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(2): 221–231.
- [21] 于维水, 王碧胜, 王士超, 等. 长期不同施肥下我国 4 种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(2): 29–34.
- [22] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 577.
- [23] Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1132–1139.
- [24] Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 133–142.
- [25] 王栋, 李辉信, 李小红, 等. 覆草旱作对稻田土壤活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 75–83.
- [26] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465–473.
- [27] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 194–202.
- [28] 田育天, 李湘伟, 谢新乔, 等. 秸秆还田对云南典型烟区土壤物理性状的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 964–969.
- [29] Liang Z, Olesen J E, Jensen J L, et al. Nutrient availability affects carbon turnover and microbial physiology differently in topsoil and subsoil under a temperate grassland[J]. *Geoderma*, 2019, 336: 22–30.
- [30] 赵满兴, 周建斌, 延志莲. 不同土层土壤对可溶性有机氮、碳的吸附特性研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1328–1332.