

## 耕作措施与秸秆还田方式对土壤活性有机碳库及水稻产量的影响

王丹丹<sup>1</sup>, 曹凑贵<sup>2\*</sup>

(1. 周口科技职业学院医学系, 河南周口 466000; 2. 华中农业大学植物科技学院, 湖北武汉 430070)

**摘要** [目的] 探明耕作措施和秸秆还田方式对耕层土壤(0~20 cm)活性有机碳和水稻产量的影响。[方法] 于2012年在湖北省大法寺镇稻麦复种系统试验基地, 设置了免耕(NT)和翻耕(PT)2种耕作方式以及5 250(SR<sub>3</sub>)、3 500(SR<sub>2</sub>)、1 750(SR<sub>1</sub>)、0 kg/hm<sup>2</sup>(SR<sub>0</sub>)4种秸秆还田量。[结果] 与翻耕相比, 免耕显著降低10~20 cm 土层土壤总有机碳(TOC)5%~21%、易氧化态碳(EOC)7%~43%、微生物量碳(MBC)10%~46%、碳库管理指数(CPMI)6%~44%, 显著降低5~10 cm 土层土壤水溶性有机碳(DOC)23%~36%。与秸秆不还田相比, 处理SR<sub>3</sub>和SR<sub>2</sub>增加5~10 cm 土层土壤DOC 29%~38%。处理SR<sub>3</sub>能显著降低水稻产量9%~24%。相关分析结果表明, 产量与EOC呈极显著正相关, 与DOC则呈显著负相关, 表明EOC、DOC对于短期内稻田耕作方式与秸秆还田量的改变响应最为敏感, 与作物生长密切相关。[结论] 相较于传统耕作方式, 短期免耕与秸秆还田不是适合砂壤土质增碳增产的技术模式。

**关键词** 秸秆还田; 免耕; 活性有机碳; 碳库管理指数; 产量

**中图分类号** S 181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)32-0123-05

## Effects of Tillage Practices and Wheat-straw Returned to the Field on Topsoil Labile Organic Carbon Fractions and Rice Yield

WANG Dan-dan<sup>1</sup>, CAO Cou-gui<sup>2</sup> (1. Zhoukou Vocational College of Science and Technology, Zhoukou, Henan 466000; 2. College of Plant Science and Technology Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070)

**Abstract** [Objective] To study the effects of tillage practices combined with wheat-straw returned to the field on top soil(0-20 cm) liable organic carbon(LOC) and rice yield at the Dafasi in Hubei Province of China. [Method] Treatments were established following a split-plot design of a randomized complete block with tillage practices [plough tillage(PT) and no-tillage(NT)] as the main plot and wheat straw returning level [5 250 (SR<sub>3</sub>), 3 500 (SR<sub>2</sub>), 1 750 (SR<sub>1</sub>) and 0 kg/hm (SR<sub>0</sub>)] as the sub-plot treatment. [Result] In 10-20 cm soil layer, compared with PT, NT significantly decreased the content of soil total organic carbon(TOC) by 5%-21%, easily oxidizable carbon (EOC) by 7%-43%, microbial biomass carbon (MBC) by 10%-46%, carbon pool management index(CPMI) by 6%-44%, decreased the water-soluble organic carbon (DOC) by 23%-36% in the 5-10 cm soil layer. Compared with SR<sub>0</sub>, the SR<sub>3</sub> and SR<sub>2</sub> significantly increased the DOC contents by 29%-38% in the 5-10 cm soil layer. The treatment SR<sub>3</sub> significantly increased rice grain yield by 9%-24%. Correlation analysis showed that rice grain yield had a significant positive correlation with EOC, significant negative correlation with DOC, revealed that EOC and DOC is active organic carbon that more sensitive to the changes of tillage practices and straw returned, closely associated with crop growth. [Conclusion] Compared with traditional farming modes, short-term tillage practices and wheat-straw returned to the field is not an effectively way to increase organic carbon content and grain yield under the sandy soil.

**Key words** Wheat straw returned to the field; No-tillage; Active organic carbon; Carbon management index; Yield

土壤有机碳是作物残体及有机肥等有机物料输入与输出之间动态平衡的结果, 能较好地反映土壤有机碳转化快慢及土壤质量提高或降低的程度<sup>[1]</sup>。虽然土壤活性有机碳组分如微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)和易氧化态碳(EOC)等指标占总有机碳比例较小<sup>[2-3]</sup>, 但与土壤有效养分、物理性状及农业管理措施如秸秆还田、耕作方式<sup>[4]</sup>等密切相关, 能更敏感地反映土壤质量变化情况, 是评价土壤质量的重要指标<sup>[5]</sup>, 有利于揭示农业管理措施对土壤有机碳的影响机制<sup>[6]</sup>。土壤碳库管理指数是土壤有机碳和参考土壤有机碳的比值与土壤有机碳活度指数的乘积, 综合考虑了土壤总有机碳与活性有机碳, 比活性有机碳更为灵敏地反映各种土地利用或管理措施引起的土壤质量下降或更新的程度<sup>[7-9]</sup>。

秸秆还田作为增加农田土壤有机碳的重要途径之一而备受关注, 研究表明, 秸秆还田可以提高土壤质量, 增加作物产量<sup>[10]</sup>。然而秸秆还田后, 也有可能遇到腐解难、利用率低、播种质量差、诱发病虫害以及影响温室气体排放等问题<sup>[11-12]</sup>, 不仅影响土壤有机碳的活性和稳定性, 改变其组成

与存在方式<sup>[13]</sup>, 而且对作物生长也会造成影响。但由于受到气候、土壤母质和轮作方式等因素的影响, 土壤有机碳及其活性组分对农田管理措施的响应在不同区域存在较大差异。在秸秆还田过程中, 不同耕作方式对秸秆腐解<sup>[14]</sup>、土壤活性有机碳<sup>[15-16]</sup>、水稻生产发育的影响均<sup>[14]</sup>不同。研究表明, 在秸秆还田条件下, 保护性耕作显著提高土壤活性有机碳含量, 提高作物产量<sup>[15]</sup>。研究表明, 保护性耕作方式配施秸秆还田能降低土壤活性有机碳含量<sup>[17-18]</sup>, 影响作物出苗率, 导致作物减产<sup>[19]</sup>。笔者采用田间试验, 基于小麦-水稻轮作模式, 研究不同耕作方式下, 4种还田量对不同土壤层次活性有机碳组分、碳库管理指数及水稻产量的影响, 旨在明确稻田土壤碳库动态变化过程, 为稻草还田和耕作措施的出台提供理论依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试验地概况** 试验于2012年在湖北省武穴市花桥镇试验基地进行。位于115°33' E, 29°51' N。年平均气温17.0~18.5℃, 无霜期215~302 d, 年均日照时间1 913.5 h, 年均降雨1 361 mm。供试土壤为砂质水稻土。耕层土壤厚约20 cm, 前茬为小麦, 小麦收获后土壤基本理化性质: 全氮2.38 g/kg, 全磷0.45 g/kg, 全钾3.29 g/kg, pH 4.79, 有机质19.89 g/kg, 铵态氮8.91 g/kg, 硝态氮20.20 g/kg, 速效磷32.79 g/kg, 速效钾30.98 g/kg。

**1.2 试验材料** 小麦品种为郑麦9023, 水稻品种采用杂交

**基金项目** 国家重点研发计划专项(2017YFD0301400); 中央高校基本科研业务费专项(2662017JC007)。

**作者简介** 王丹丹(1984—), 女, 河南周口人, 讲师, 从事生态学研究。  
\* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事农业生态与耕作、水稻栽培生理生态研究。

**收稿日期** 2018-09-01

稻两优培九,中熟种。种植方式为小麦-中稻复种,小麦采用直播技术,中稻采用抛秧技术。

**1.3 试验设计** 采用裂区设计,耕作方式为主区,分免耕(N<sub>T</sub>)与翻耕(P<sub>T</sub>),还田量为副区,分为5 250(SR<sub>3</sub>)、3 500(SR<sub>2</sub>)、1 750(SR<sub>1</sub>)、0 kg/hm<sup>2</sup>(SR<sub>0</sub>)。共8个处理:①翻耕0 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(P<sub>T</sub>+SR<sub>0</sub>);②翻耕1 750 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(P<sub>T</sub>+SR<sub>1</sub>);③翻耕3 500 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(P<sub>T</sub>+SR<sub>2</sub>);④翻耕5 250 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(P<sub>T</sub>+SR<sub>3</sub>);⑤免耕0 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(N<sub>T</sub>+SR<sub>0</sub>);⑥免耕1 750 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(N<sub>T</sub>+SR<sub>1</sub>);⑦免耕3 500 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(N<sub>T</sub>+SR<sub>2</sub>);⑧免耕5 250 kg/hm<sup>2</sup>秸秆还田(N<sub>T</sub>+SR<sub>3</sub>)。小区面积90 m<sup>2</sup>,3次重复,共24个小区,试验田为厢沟栽培模式,每个处理占地5厢。试验地水稻施肥措施为施纯N 210 kg/hm<sup>2</sup>,其中底肥40%、分蘖肥20%、穗肥20%、粒肥20%;施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg/hm<sup>2</sup>和K<sub>2</sub>O 180 kg/hm<sup>2</sup>,底肥一次性施用。

**1.4 测定项目与方法** 水稻成熟期采用S形取样法随机选取5点,分别采集0~5、5~10、10~20 cm土样。带回实验室,经预处理之后新鲜土样立即测定部分指标,经混匀风干处理后依据需要过不同目数的筛子后测定其他指标。

土壤全碳(TOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定<sup>[20]</sup>;土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取方法测定<sup>[21]</sup>;可溶性有机碳(WSOC)采用重铬酸钾容量法测定<sup>[22]</sup>;土壤易氧化碳(EOC)采用Blair等<sup>[23]</sup>提出的方法——KMnO<sub>4</sub>氧化法测定。

土壤碳库管理指数计算方法<sup>[23]</sup>:

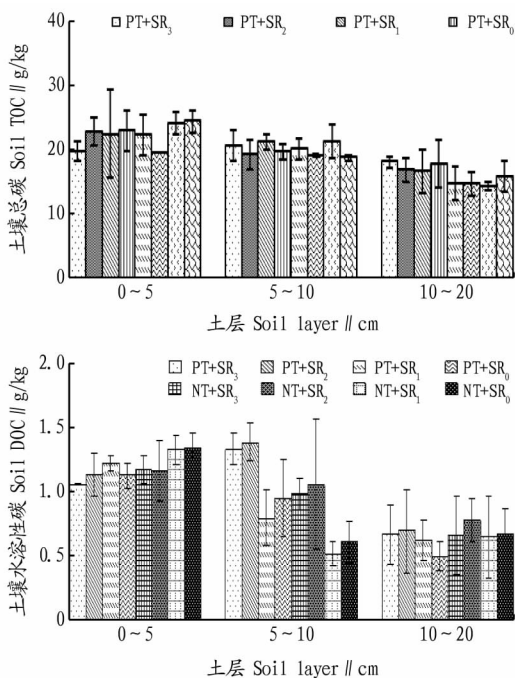


图1 不同耕作措施与秸秆还田方式各土层土壤活性有机碳组分含量的比较

Fig.1 Comparison of soil labile organic carbon fractions content under different tillage practices and residue return methods

**2.2 土壤碳库管理指数** 碳库管理指数指示了土壤的肥力状况,升高则表明农艺措施提高了土壤质量。由表1可知,相对于翻耕,免耕5~10 cm土层AI提高了5%~9%,但10~

碳库指数(CPI)=样品全碳含量(g/kg)/参考土壤全碳含量(g/kg)

碳库活度(A)=活性碳含量/非活性碳含量

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度

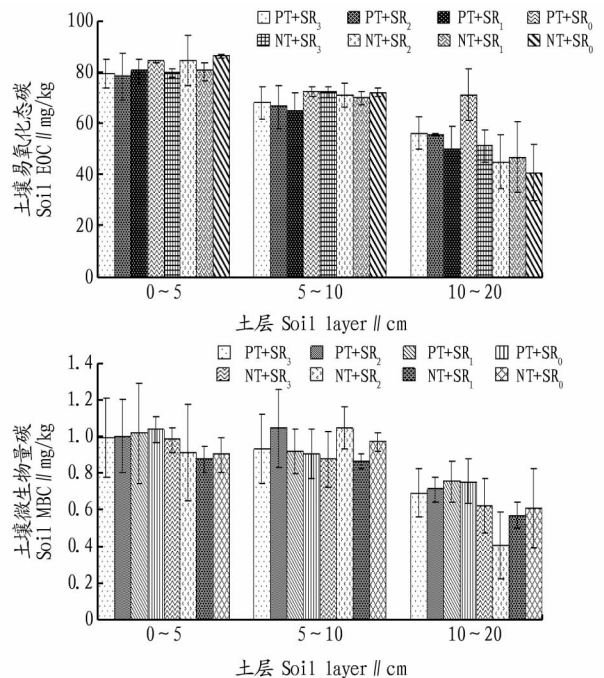
碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100  
= CPI×AI×100。

**1.5 数据分析** 试验数据均采用Excel(Microsoft office, 2003)进行分析整理,用SAS8.1软件DUNCAN法进行方差分析,采用最小显著差数法进行显著性水平检验( $P<0.05$ )。试验结果以3次重复的平均值与标准差来表示。

## 2 结果与分析

**2.1 土壤活性有机碳** 由图1可知,不同处理下TOC含量均随着土层深度的增加显著降低。5~10 cm以及10~20 cm土层TOC含量仅为0~5 cm土层的77%和59%~91%。与翻耕相比,免耕降低10~20 cm土层5%~21%( $P<0.05$ )的TOC含量。易氧化态碳含量随着土层深度的增加而不断下降,0~5 cm土层各处理下EOC的含量显著高于5~20 cm土层。与翻耕相比,免耕降低10~20 cm土层7%~43%( $P<0.05$ )的EOC含量。10~20 cm土层MBC含量为0~10 cm土层的39%~75%,相较于翻耕,免耕降低10~20 cm土层10%~46%( $P<0.05$ )的MBC含量以及5~10 cm土层23%~36%( $P<0.05$ )的DOC含量。

秸秆还田对土壤TOC、EOC、MBC的含量无显著影响。相较于SR<sub>0</sub>,SR<sub>3</sub>和SR<sub>2</sub>显著增加5~10 cm土层29%~38%( $P<0.05$ )和31%~42%( $P<0.05$ )的DOC含量。



20 cm土层CPMI降低了6%~44%。秸秆还田对土壤AI和CPMI无显著影响。

表 1 不同耕作措施与秸秆还田方式对稻田土壤碳库管理指数的影响

Table 1 The effect of different tillage and residue treatments on carbon pool management index in paddy fields

处理 Treatment	碳库活度指数 AI			碳库管理指数 CPMI//%		
	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
PT+SR <sub>3</sub>	1.13 a	0.86 bc	1.23 ab	92 a	94 a	141 ab
PT+SR <sub>2</sub>	0.97 a	0.90 abc	1.31 ab	90 a	92 a	139 ab
PT+SR <sub>1</sub>	1.01 a	0.79 c	1.20 ab	92 a	89 a	126 b
PT+SR <sub>0</sub>	1.03 a	0.95 ab	1.60 a	97 a	100 a	180 a
NT+SR <sub>3</sub>	1.00 a	0.94 ab	1.38 ab	92 a	100 a	129 b
NT+SR <sub>2</sub>	1.22 a	0.96 ab	1.22 ab	98 a	98 a	113 b
NT+SR <sub>1</sub>	0.93 a	0.85 bc	1.31 ab	92 a	96 a	118 b
NT+SR <sub>0</sub>	0.99 a	1.00 a	1.02 b	99 a	100 a	102 b

注: 同列不同小写字母表示同一土壤层次不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different small letters in the same column meant significant differences between different treatments at the same soil layer at 0.05 level

**2.3 产量** 由图 2 可知, 相较于 SR<sub>0</sub>, 处理 SR<sub>3</sub> 显著降低了 9%~24% 的水稻产量。处理 SR<sub>2</sub> 和 SR<sub>1</sub> 分别提高 3%~12% 和 3%~4% 的水稻产量, 但差异不显著。翻耕和免耕处理水稻产量无显著差异。

**2.4 土壤活性碳组分与产量之间的相关性** 各有机碳组分

表 2 有机碳成分与产量之间的相关性

Table 2 Correlation among organic carbon fractions and yield under different treatments

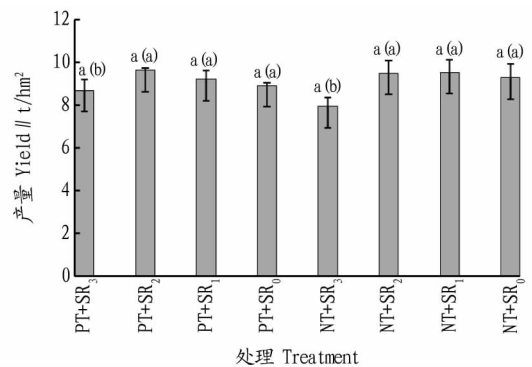
指标 Indicator	易氧化态碳 EOC	水溶性有机碳 DOC	微生物生物量碳 MBC	有机质 TOC	产量 Yield
易氧化态碳 EOC	1				
水溶性有机碳 DOC	-0.42**	1			
微生物生物量碳 MBC	0.03	-0.02	1		
有机质 TOC	0.02	-0.11	0.68**	1	
产量 Yield	0.73**	-0.30*	-0.10	-0.05	1

### 3 讨论

该研究结果表明, 相较于翻耕, 免耕对 0~10 cm 土层 TOC 含量无显著影响, 降低 10~20 cm 土层的 TOC 含量。这与 Tian 等<sup>[24]</sup>、杨敏芳等<sup>[1]</sup> 10~20 cm 土层翻耕 TOC 含量高于其他保护性耕作的研究结果相似。Yang 等<sup>[25]</sup> 研究显示, 长期免耕较翻耕提高了表层 0~10 cm 土壤有机碳含量, 但降低了 10~20 cm 土层土壤有机碳含量。Liang 等<sup>[26]</sup> 研究表明, 翻耕比免耕增加 5~20 cm 土层土壤有机碳含量, 且秸秆还田后趋势不变。Dikgwatlhe 等<sup>[27]</sup> 研究表明, 2 年翻耕秸秆还田对比免耕秸秆覆盖在 5~15 cm 土层有更高的土壤有机碳含量, 原因是翻耕对比免耕植物根系在耕层中分布更广泛并在作物生长过程中向土壤释放更多碳, 使得积累量显著增加。秸秆还田相较于秸秆不还田, 对土壤有机碳无显著影响, 这可能是因为该试验年限较短, 秸秆最初还入农田, 新鲜的有机物质需要一个腐解转化的过程, 且土壤有机碳转化与平衡也需要较长时间<sup>[28]</sup>, 因此对有机碳总量的影响表现不明显。也有学者认为耕作对于表层土壤有机碳含量的影响比秸秆还田更显著, 而秸秆还田对 20 cm 土层以下土壤有机碳含量影响更明显。

与翻耕相比, 免耕显著降低 10~20 cm 土层土壤的 EOC

与产量的相关关系见表 2。由表 2 可知, 产量与 EOC 呈极显著正相关 ( $r = 0.73^{**}$ ), 与 DOC 则呈显著负相关 ( $r = -0.30^*$ )。土壤 TOC 与 MBC 呈极显著正相关 ( $r = 0.68^{**}$ )。



注: 括号外字母表示耕作处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 括号内字母表示秸秆还田处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different letters outside the brackets stand for significant differences at 0.05 level between treatments in tillage and no-tillage; different letters in brackets stand for significant differences at 0.05 level between different amount of wheat-straw returned

图 2 不同耕作方式与秸秆还田对水稻产量的影响

Fig.2 The effect of tillage and residue treatments on rice yield

含量, 这与路丹等<sup>[16]</sup> 提出的相较于翻耕, 免耕显著降低 5~20 cm 土层土壤 EOC 含量的结果一致。这可能是因为免耕使秸秆在土壤表层聚集, 降低了分解速率, 而翻耕使秸秆和土壤混合比较均匀, 给微生物提供了充足的碳源, 腐解较为彻底, 提高了有机碳活性。关于短期内秸秆还田是否提高土壤 EOC 的说法不一, 徐明岗等<sup>[29]</sup> 研究表明, 秸秆还田对提高土壤总有机碳有作用, 但并不能增加土壤 EOC 含量, 由于气候条件的差异, 秸秆还田对土壤活性有机质的影响在不同土壤上表现不一。也有人认为秸秆还田能够增加土壤 EOC 含量<sup>[16]</sup>。该研究结果表明, 秸秆还田对土壤 EOC 含量无显著影响, 这可能与土壤类型、质地及作物种植年限有关。

土壤中 DOC 主要来源于落叶和根系分泌物以及表层有机物质的分解, 此外, 土壤有机质的微生物过程也是其来源<sup>[30]</sup>。免耕相较于翻耕减少了土壤扰动, 降低了有机物质的输入, 直接导致 DOC 来源减少, 使 5~10 cm 土层土壤 DOC 含量显著降低, 也可能是砂壤土本身保水蓄水力较弱, 耕作有利于降水的入渗, 导致在翻耕时 DOC 含量比免耕高。相比较秸秆不还田, 5 250 kg/hm<sup>2</sup> 及 3 500 kg/hm<sup>2</sup> 还田量增加 5~10 cm 土层土壤 DOC 含量, 这与周坎等<sup>[17]</sup> 的研究结果一致, 这是因为秸秆以及植物的腐解为土壤 DOC 提供了重要

来源<sup>[31]</sup>。

相较于翻耕,免耕降低 10~20 cm 土层土壤 MBC 含量。李晓莎<sup>[18]</sup>也发现了相同规律,可能是因为砂壤土质地较粗,不饱和水传导率以及储水率均较差,根的呼吸速率以及生长慢,导致根际微生物含量本身就较低,而免耕使腐解物集中于土壤表层,翻耕使作物秸秆与土壤充分混合,导致土壤下层 MBC 比翻耕低。该研究结果显示,秸秆还田相较于秸秆不还田,并未对土壤 MBC 有显著影响。这可能是因为该试验所取土样为水稻成熟期,而李晓莎<sup>[18]</sup>认为秸秆还田后随着时间的推移秸秆对土壤微生物量的影响效应逐渐变小,成熟期秸秆还田对土壤 MBC 含量影响不显著。

研究表明,相比翻耕,免耕能提高 10 cm 以上土层的土壤肥力状况,显著降低 10 cm 以下土层土壤肥力状况,使土壤养分表层富集化<sup>[32]</sup>。该研究结果显示,免耕相较于翻耕降低了 10~20 cm 土层 CPMI,提高了 5~10 cm 土层 AI。表明免耕降低了砂壤土 10~20 cm 土层土壤肥力,提高了 5~10 cm 土层土壤活性碳含量,却未能改善 10 cm 以上土层土壤肥力状况。其原因可能是翻耕措施有利于深层土壤有机碳的累积<sup>[33]</sup>,也有可能是砂壤土肥力较差,且试验年限较短。大量研究显示,秸秆还田能显著增加土壤 CPMI<sup>[4,34]</sup>,而该研究结果表明,秸秆还田对 CPMI 及 AI 无显著影响,这可能是因为砂壤土土质松散,保水性能差,秸秆还田在较长时间内调节地表温度和水分状况,使其有利于土壤微生物的繁殖,进而增加土壤有机碳的矿化,而砂性土壤有机碳的矿化速率比其他黏粒含量高的土壤迅速<sup>[35]</sup>,土壤有机质易被微生物降解,有利于养分的迅速释放<sup>[36]</sup>。也可能与试验年限、土壤生态环境以及秸秆腐烂程度有关。结果仍需进一步研究。

免耕对作物产量的影响存在争议,Jat 等<sup>[37]</sup>、Sharma 等<sup>[38]</sup>研究指出,免耕提高了作物产量。也有研究发现保护性耕作措施对产量影响不明显<sup>[39-40]</sup>。韩宾等<sup>[19]</sup>认为保护性耕作能降低作物出苗率,增加土壤容重,限制根系伸展,继而使作物减产。近年来,随着旋耕、免耕等保护性耕作措施在农业生产中常年使用,耕层浅薄化、土壤紧实化等一系列土壤健康问题逐渐凸显<sup>[41-42]</sup>。已成为制约粮食作物持续高产、稳产的新问题<sup>[43]</sup>。该研究结果显示,一年免耕对作物产量影响不显著。这可能与试验年限、土壤肥力有关,进行长期定位试验可以不断完善相关结论。高量秸秆还田降低了水稻产量,可能是因为过高的还田量降低了出苗率及单位面积穗数<sup>[19]</sup>。

相关性分析结果表明,水稻产量与 EOC 呈极显著正相关,与 DOC 则呈显著负相关,与 TOC 相关性不显著,与路文涛等<sup>[44]</sup>、蔡太义等<sup>[45]</sup>研究结果类似,表明 EOC、DOC 对于短期内稻田耕作方式与秸秆还田量的改变响应最为敏感,能更准确地反映土壤质量的变化,与作物生长密切相关。土壤 TOC 与 MBC 呈极显著正相关,与马和平等<sup>[46]</sup>的研究结果一致,说明 MBC 是土壤碳库中活性较强而又易于转化的成分,对于保持土壤肥力有重要作用,可以作为表征土壤碳库质量

和土壤生物学肥力的理想指标。

#### 4 结论

经过 1 年砂壤土质下稻-麦轮作田间试验,短期免耕显著降低土壤活性有机碳各组分含量以及土壤碳库管理指数,高量秸秆还田显著降低水稻产量,说明短期免耕与秸秆还田降低了土壤肥力并使作物减产。因此,对于土质松散、肥力较差的砂壤土质,短期免耕与秸秆还田并不是最适合增碳增产的技术模式。由于该研究年限为一年,关于保护性耕作对于砂壤土质活性有机碳及产量的长期影响,还需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 杨敏芳,朱利群,韩新忠,等.不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1387-1393.
- [2] GARTEN C T JR,POST W M III,HANSON P J,et al.Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J].Biogeochemistry,1999,45(2):115-145.
- [3] WARDLE D A.A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil[J].Biological reviews,1992,67(3):321-358.
- [4] 李硕,李有兵,王淑娟,等.关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2015,26(4):1215-1222.
- [5] 龚伟,胡庭兴,王景燕,等.川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化[J].生态学报,2008,28(6):2536-2545.
- [6] CHRISTENSEN B T.Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J].European journal of soil science,2001,52(3):345-353.
- [7] 邱莉萍,张兴昌,程积民.不同封育年限草地土壤有机质组分及其碳库管理指数[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1166-1171.
- [8] DA SILVA F D,AMADO T J C,FERREIRA A O,et al.Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop-livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil[J].Agriculture, ecosystems and environment,2014,190:60-69.
- [9] LUO S S,ZHU L,LIU J L,et al.Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to soil surface mulching in semiarid farmland[J].European journal of soil biology,2015,67:35-42.
- [10] 王晓波,车威,纪荣婷,等.秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J].土壤,2015,47(3):483-489.
- [11] 陈春兰,侯海军,秦红灵,等.南方双季稻区生物质炭还田模式生态效益评价[J].农业资源与环境学报,2016,33(1):80-91.
- [12] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等.秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2362-2367.
- [13] 王虎,王旭东,田宵鸿.秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J].中国应用生态学报,2014,25(12):3491-3498.
- [14] GWENZI W,GOTOSA J,CHAKANETSA S,et al.Effects of tillage systems on soil organic carbon dynamics,structural stability and crop yields in irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) rotation in semi-arid Zimbabwe[J].Nutrient cycling in agroecosystems,2009,83(3):211-221.
- [15] 朱敏,王兴龙,张颀,等.耕作方式与秸秆还田对川中紫土土壤碳库与玉米产量的影响[J].华北农学报,2017,32(S1):302-307.
- [16] 路丹,何明菊,区惠平,等.耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J].土壤通报,2014,45(5):1144-1150.
- [17] 周欢,蔡立群,张仁陟,等.不同耕作方式下秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J].甘肃农业大学学报,2015(1):63-68.
- [18] 李晓莎.秸秆还田和耕作方式对夏玉米田土壤微生物特性和有机碳组分的影响[D].泰安:山东农业大学,2016:1-58.
- [19] 韩宾,李增嘉,王芸,等.土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):48-53.
- [20] LOGAN T J,LAL R,DICK W A.Tillage systems and soil properties in North America[J].Soil tillage research,1991,20(2/3/4):241-270.
- [21] VANCE E D,BROOKES P C,JENKINSON D S.An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J].Soil biology & biochemistry,1987,19(6):703-707.
- [22] 张甲坤,陶澍,曹军.土壤中水溶性有机碳测定中的样品保存与前处理

- 方法[J].土壤通报,2000,31(4):174-176.
- [23] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian journal of agricultural research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [24] TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(2): 373-378.
- [25] 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 & tillage research, 2008, 100(1): 120-124.
- [26] LIANG A Z, ZHANG X P, FANG H J, et al. Short-term effects of tillage practices on organic carbon in clay loam soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 619-623.
- [27] DIKGWATLHE S B, CHEN Z D, LAL R, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Soil & tillage research, 2014, 144(4): 110-118.
- [28] 江晓东, 迟淑筠, 王芸, 等. 免耕对小麦/玉米农田玉米还田秸秆腐解的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 247-251.
- [29] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
- [30] MCDOWELL W H, CURRIE W S, ABER J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendment on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. Water, air and soil pollution, 1998, 105(1/2): 175-182.
- [31] DALVA M, MOORE T R. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchments[J]. Biogeochemistry, 1991, 5(1): 1-19.
- [32] BLANCO-CANQUI H, LAL R. No-tillage and soil profile carbon sequestration: An on-farm assessment[J]. Soil science society of America journal, 2008, 72(3): 693-701.
- [33] 吴家梅, 彭华, 纪雄辉, 等. 稻草还田方式对双季稻田耕层土壤有机碳积累的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2360-2365.
- [34] 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.
- [35] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1218-1224.
- [36] 陈国潮, 何振立, 黄昌勇. 红壤微生物生物量 C 周转及其研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 152-160.
- [37] JAT M L, GATHALA M K, LADHA J K, et al. Evaluation of precision land leveling and double zero-tillage systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties[J]. Soil tillage research, 2009, 105: 112-121.
- [38] SHARMA P, TRIPATHI R P, SINGH S. Tillage effects on soil physical properties and performance of rice-wheat-cropping system under shallow water table conditions of Tarai, Northern Indian[J]. European journal of agronomy, 2005, 23: 327-335.
- [39] 王小彬, 蔡典雄, 金珂, 等. 早坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1044-1049.
- [40] 刘立晶, 高焕文, 李洪文. 玉米-小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 70-73.
- [41] 石彦琴, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 2057-2064.
- [42] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 等. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 66-71.
- [43] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 等. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(3): 468-478.
- [44] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
- [45] 蔡太义, 黄耀斌, 黄会娟, 等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1962-1968.
- [46] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳海拔梯度的变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 163-166.

(上接第 119 页)

## 参考文献

- [1] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状: 关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [2] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 361-367.
- [3] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [4] 乔洪涛, 赵保卫, 刁静茹, 等. 螯合型表面活性剂对 Pb-Zn 复合污染土壤的洗脱效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(12): 1931-1938.
- [5] DEMONT G, BERGERON M, MERCIER G, et al. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications[J]. Journal of hazardous materials, 2008, 152(1): 1-31.
- [6] QIU R L, ZOU Z L, ZHAO Z H, et al. Removal of trace and major metals by soil washing with Na<sub>2</sub>EDTA and oxalate[J]. Journal of soils sediments, 2010, 10(1): 45-53.
- [7] QIAO H T, ZHAO B W, DIAO J R, et al. Removal of lead and zinc from contaminated soil by a novel chelating surfactant[J]. Clean-soil, air, water, 2016, 44(9): 1191-1197.
- [8] CHIU K K, YE Z H, WONG M H. Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by *Vetiveria zizanioides* and *Zea mays* using chelating agents[J]. Chemosphere, 2005, 60(10): 1365-1375.
- [9] GIANNIS A, NIKOLAOU A, PENTARI D, et al. Chelating agent-assisted electrokinetic removal of cadmium, lead and copper from contaminated soils[J]. Environmental pollution, 2009, 157(12): 3379-3386.
- [10] TANDY S, BOSSART K, MUELLER R, et al. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents[J]. Environmental science and technology, 2004, 38(3): 937-944.
- [11] QIAO J B, SUN H M, LUO X H, et al. EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil[J]. Chemosphere, 2017, 167: 422-428.
- [12] 刘仕翔, 胡三荣, 罗泽娇. EDTA 和 CA 复配淋洗剂对重金属复合污染土壤的淋洗条件研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(3): 77-83.
- [13] 李尤, 廖晓勇, 阎秀兰, 等. 鼠李糖脂淋洗修复重金属污染土壤的工艺条件优化研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1287-1292.
- [14] WANG X X, ZHAO J J, YAO X Z, et al. Synthesis and properties of *N*-hexadecyl ethylenediamine triacetic acid[J]. Journal of colloid and interface science, 2004, 279: 548-551.
- [15] 王军, 杨许召, 李刚森. 功能性表面活性剂制备与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [16] 孙岩, 殷福珊, 宋湛谦, 等. 新表面活性剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [17] HASEGAWA H, RAHMAN I M M, NAKANO M, et al. Recovery of toxic metal ions from washing effluent containing excess aminopolycarboxylate chelant in solution[J]. Water research, 2011, 45(16): 4844-4854.
- [18] 王显海, 刘云国, 曾光明, 等. EDTA 溶液修复重金属污染土壤的效果及金属的形态变化特征[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1008-1012.
- [19] ZHU R, WU M, YANG J. Mobilities and leachabilities of heavy metals in sludge with humus soil[J]. Journal of environmental sciences, 2011, 23(2): 247-254.
- [20] TAI Y P, MCBRIDE M B, LI Z A. Evaluating specificity of sequential extraction for chemical forms of lead in artificially-contaminated and field-contaminated soils[J]. Talanta, 2013, 107(2): 183-188.
- [21] 胡克伟, 贾冬艳, 颜丽, 等. 膨润土对重金属离子的竞争性吸附研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 467-470.
- [22] 王艳. 黄土对典型重金属离子吸附解吸特性及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [23] 乔洪涛, 赵保卫, 刁静茹, 等. *N*-十二酰基乙二胺三乙酸钠对黄土吸附 Pb、Zn 的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 166-170.
- [24] KARŦALS, AYDIN Z, TOKALIOGLU S. Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data[J]. Journal of hazardous materials, 2006, 132(1): 80-89.
- [25] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.