

耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响

王丹丹, 周 亮, 黄胜奇, 李成芳*, 曹凑贵*

(农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 华中农业大学植物科技学院, 武汉 430070)

摘 要:为探明耕作方式和小麦秸秆还田对稻田表层(0~20 cm)土壤活性有机碳(LOC)、碳库管理指数(CPMI)和作物产量的短期影响,于2011年在湖北省随州市均川镇,设置了免耕(NT)和翻耕(PT)两种耕作方式以及6000(SR₃)、4000(SR₂)、2000(SR₁)、0 kg·hm⁻²(SR₀)4种还田量。结果表明:相对于翻耕,免耕显著提高水溶性有机碳(WSOC)23%~68%($P<0.0001$)、微生物生物量碳(MBC)21%~40%和易氧化态碳(EOC)10%~63%($P<0.0001$),但不影响颗粒态碳。相对于秸秆不还田处理(SR₀),SR₂和SR₁显著提高WSOC 37%~74%($P<0.0003$);EOC含量随还田量增加而增加。对CPMI的影响,耕作处理表现为免耕>翻耕,秸秆还田处理为SR₃>SR₂>SR₁>SR₀。处理SR₃、SR₂和SR₁比SR₀分别使产量提高了7.7%~16%、17%~35%和23%~28%。线性相关分析表明,WSOC与产量有极显著相关性($P<0.01$),表明土壤水溶性碳对短期土壤管理措施的改变反应敏感。

关键词:秸秆还田;土壤活性有机碳;碳库管理指数

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)04-0735-06 doi:10.11654/jaes.2013.04.012

Short-term Effects of Tillage Practices and Wheat-straw Returned to the Field on Topsoil Labile Organic Carbon Fractions and Yields in Central China

WANG Dan-dan, ZHOU Liang, HUANG Sheng-qi, LI Cheng-fang*, CAO Cou-gui*

(MOA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Conservation management practices, such as no-tillage(NT) or crop residue returning, alter soil organic carbon(C) lability, thus affecting soil quality. However, inconsistent effects of conservation management practices on soil labile organic C have been commonly reported. Therefore, a field experiment was conducted to study the effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on soil labile organic carbon(LOC), carbon pool management index(CPMI) and rice grain yield at the Junchuan in Hubei Province of China. 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 [6000 kg·hm⁻²(SR₃), 4000 kg·hm⁻²(SR₂), 2000 kg·hm⁻²(SR₁) and 0 kg·hm⁻²(SR₀)] as the sub-plot treatment. The results indicated that, compared with PT, NT significantly increased the content of soil water-soluble organic carbon(WSOC) by 23%~68% ($P<0.0001$), microbial biomass carbon(MBC) by 21%~40%, easily oxidizable carbon(EOC) by 10%~63% ($P<0.0001$), but didn't have remarkable effect on the particulate organic carbon(POC). The SR₂ and SR₁ significantly increased the WSOC contents by 37%~74% compared to SR₀ ($P<0.0003$). EOC contents increased with increasing amounts of wheat straw returning. NT significantly increased CPMI compared to PT. The effects of wheat straw returning on CPMI followed the order: SR₃>SR₂>SR₁>SR₀. SR₃, SR₂ and SR₁ increased rice grain yield by 7.7%~16%, 17%~35% and 23%~28% respectively. Correlation analysis revealed that WSOC could be a more sensitive indicator responding to the changes of soil management practices than other indices in short-term.

Keywords: wheat straw returned to the field; soil organic carbon; carbon pool management index

收稿日期:2012-09-22

基金项目:国家科技支撑计划:粮食丰产科技工程(2011BAD16B02);国家自然科学基金(31100319);中央高校基本科研业务费专项资金(2010QC032)

作者简介:王丹丹(1984—),女,河南周口人,在读硕士,主要研究方向为生态学。E-mail:wangdandan87810@163.com

* 通信作者:曹凑贵 E-mail:cgcui@mail.hzau.edu.cn

李成芳 E-mail:lichengfang@mail.hzau.edu.cn

随着土壤碳循环理论及实证研究的深入,秸秆还田在强化土壤有机质积累方面备受关注。然而,土壤有机质在较短时间内的微小变化难以观测,且土壤有机质的含量高低只是有机质积累和矿化二者平衡的结果,不能很好地反应土壤质量变化及转化速率的问题^[1]。土壤活性有机碳(LOC)指在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中不稳定、易氧化、易分解矿化,有利于植物、微生物利用的那一部分土壤有机碳^[2]。虽然只占土壤全碳的小部分,但较土壤全碳更能敏感地反映土壤微小的变化^[3-4],对土壤碳素的转化、土壤养分流起着重要作用,与土壤内在的生产力密切相关^[1],且与土壤有效养分、土壤的物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,在不同程度上反映有机质的有效性,指示土壤有机质或土壤质量。其不同组分和碳库管理指数(CPMI)能反映土壤质量和土壤肥力状况,是评价土壤管理的良好指标。

目前对于耕作方式和秸秆还田的研究多集中于长期效应,且已有较为统一的结论,长期的免耕与秸秆还田皆能提高土壤质量,增加作物产量^[5-6],但对于短期效应的研究较少,且说法不一。有研究报道认为,短期(<3年)保护性耕作并不提高土壤有机碳^[7-8]和作物产量^[9];也有一部分学者认为,短期免耕能增加土壤有机碳^[10]并提高作物产量^[11]。蔡太义^[12](<3年玉米)与张永清^[13](3年小麦-水稻)等的研究结果表明了秸秆还田能增加作物产量,而李录久等^[14](1年玉米、小麦)则认为秸秆还田能导致作物减产。为此,本研究通过设置不同耕作方式和不同秸秆还田量试验,研究短期耕作与秸秆还田对农田土壤活性有机碳组分及产量的影响,旨在找到适宜稻田生产的最适秸秆还田量与耕作方式,为稻田作物生产及土壤培肥制度的建立提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验于2011年6月至10月在湖北省随州市均川镇试验基地进行,位于东经113°17',北纬31°36',年平均气温14.5~16℃,冬季最低气温-2~5℃,夏季气温26.5~37℃,无霜期为194~280d。年均日照时间260d,年均降雨量970mm。耕层土壤厚约20cm,前茬为小麦,小麦收获后测定的耕作层土壤的基本理化性状为:pH 5.38、有机质23.82 g·kg⁻¹、全氮1.42 g·kg⁻¹、NH₄⁺-N 0.49 mg·kg⁻¹、NO₃⁻-N 12.87 mg·kg⁻¹、速效磷50.28 mg·kg⁻¹、速效钾44.38 mg·kg⁻¹、水溶性碳0.79 g·

kg⁻¹、微生物量碳1.24 g·kg⁻¹、易氧化态碳4.29 g·kg⁻¹、颗粒态碳25.51 g·kg⁻¹。供试土壤为水稻土,壤质。供试水稻品种为黄华粘(中稻)。种植方式为小麦-中稻轮作,小麦采用直播技术,中稻采用直播技术。

1.2 试验设计

试验裂区设计,耕作方式为主区,分免耕(NT)与翻耕(PT),还田量为副区,分为6000(SR₃)、4000(SR₂)、2000(SR₁)、0 kg·hm⁻²(SR₀)。共8个处理:(1)翻耕0 kg·hm⁻² 秸秆还田(PT+SR₀);(2)翻耕2000 kg·hm⁻² 秸秆还田(PT+SR₁);(3)翻耕4000 kg·hm⁻² 秸秆还田(PT+SR₂);(4)翻耕6000 kg·hm⁻² 秸秆还田(PT+SR₃);(5)免耕0 kg·hm⁻² 秸秆还田(NT+SR₀);(6)免耕2000 kg·hm⁻² 秸秆还田(NT+SR₁);(7)免耕4000 kg·hm⁻² 秸秆还田(NT+SR₂);(8)免耕6000 kg·hm⁻² 秸秆还田(NT+SR₃)。

小区面积90 m²,3次重复。水稻施1次底肥3次追肥,底肥在水稻直播前施,追肥时期分别为分蘖期、抽穗期、灌浆期。水稻施肥措施为667 m²施纯氮14 kg,其中底肥40%、分蘖肥20%、穗肥20%、粒肥20%。666 m²施磷肥7 kg和钾肥12 kg,作为底肥1次性施用。

1.3 测定项目与方法

在水稻收获后,随机取5点采集0~20 cm耕层土壤样品,混匀,取部分新鲜土样进行相关项目的测定,其余部分风干过筛备用。

土壤活性碳组分的测定。土壤全碳(TOC):称取过0.25 mm筛的风干土0.1 g,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定^[15]。土壤微生物生物量碳(MBC):称取去除植物及动物残体的新鲜土样10 g于离心管中,采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取方法测定^[16]。水溶性有机碳(WSOC):称取去除植物及动物残体新鲜土样10 g,采用重铬酸钾容量法测定^[17]。土壤易氧化碳(EOC):称取过0.25 mm筛的风干土4 g,采用Blair^[3]提出的方法——KMnO₄氧化法测定。土壤颗粒态有机碳(POC):称取过2 mm筛的风干土20 g,采用Cambardella and Elliot^[18]描述的六偏磷酸钠分散-重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定。

本研究土壤碳库管理指数计算采用Blair等^[1]提出的方法,选取免耕0 kg·hm⁻² 秸秆还田处理为参考土壤,具体计算如下:

碳库指数(CPI)=样品全碳含量(g·kg⁻¹)/参考土壤全碳含量(g·kg⁻¹)

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

1.4 数据分析

所有试验数据均采用 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($P<0.05$)。试验结果是以 3 次重复分析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

耕作方式对土壤 TOC 的影响不显著(表 1)。秸秆还田显著影响土壤 TOC, 各处理 TOC 含量大小依次为 $SR_3>SR_2>SR_1>SR_0$, 处理 SR_3 、 SR_2 与 SR_1 分别比 SR_0 提高了 16%、6%与 4%。

由表 1 可知, 耕作方式和秸秆还田显著影响 WSOC。免耕较翻耕显著提高土壤的 WSOC 23%~68% ($P<0.0001$)。相对于 SR_0 , 处理 SR_2 与 SR_1 显著提高 37%~74% ($P<0.0003$)。耕作方式与秸秆还田之间交互作用不显著。

相对于翻耕, 免耕显著提高土壤 EOC 含量 10%~63% ($P<0.0001$)。秸秆还田显著影响土壤 EOC ($P<0.0003$), 表现为 EOC 含量随秸秆还田量增加而增加的趋势。秸秆还田处理 EOC 含量比不还田处理提高

了 2%~73%。由表 1 也可知, 耕作方式显著影响 MBC, 表现为免耕大于翻耕, 免耕 MBC 的含量比翻耕处理提高 21%~40%。秸秆还田并没有影响 MBC。耕作方式与秸秆还田对颗粒态碳影响不显著。

2.2 土壤碳库管理指数

由表 2 可以看出, 耕作方式和秸秆还田显著影响碳库管理指数、碳库活度和碳库活度指数。相对于翻耕, 免耕 CPMI 提高了 25%~48%; 相对于不还田处理 SR_0 , SR_3 、 SR_2 与 SR_1 的 CPMI 分别提高 95%~279%、57%~157%与 24%~128%。

2.3 作物产量

由图 1 可知, 秸秆还田显著影响水稻产量 ($P<$

表 2 不同处理对稻田土壤碳库管理指数的影响

Table 2 The effect of different treatments on carbon pool management index in paddy fields

处理 Treatment	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CPMI/%
PT+ SR_3	0.87b(a)	1.33b(a)	1.18a(a)	156.28b(a)
PT+ SR_2	0.62b(ab)	0.96b(ab)	1.11a(ab)	105.91b(b)
PT+ SR_1	0.56b(b)	0.86b(b)	1.10a(b)	94.15b(b)
PT+ SR_0	0.26b(c)	0.39b(c)	1.05a(b)	41.25b(c)
NT+ SR_3	1.08a(a)	1.66a(a)	1.16a(a)	194.57a(a)
NT+ SR_2	0.97a(ab)	1.48a(ab)	1.07a(ab)	156.89a(b)
NT+ SR_1	0.79a(b)	1.20a(b)	1.03a(b)	123.69a(b)
NT+ SR_0	0.65a(c)	1.00a(c)	1.00a(b)	99.70a(c)
T	0.000 5**	0.000 5**	0.11 ^{ns}	0.002 5**
SR	0.000 5**	0.000 5**	0.014**	0.000 2**
T×SR	0.73 ^{ns}	0.73 ^{ns}	0.96 ^{ns}	0.85 ^{ns}

表 1 不同处理下土壤活性碳含量的比较

Table 1 Comparison of soil liable organic carbon content under different treatments

处理 Treatment	全碳 TOC/g·kg ⁻¹	水溶性有机碳 WSOC/g·kg ⁻¹	易氧化态碳 EOC/g·kg ⁻¹	微生物生物量碳 MBC/g·kg ⁻¹	颗粒态碳 POC/g·kg ⁻¹
PT+ SR_3	32.05±1.9a(a)	0.38±0.07b(b)	13.06±2.79b(a)	1.20±0.17b(a)	8.65a(a)
PT+ SR_2	30.16±2.8a(ab)	0.60±0.00b(a)	11.30±2.68b(ab)	1.15±0.23b(a)	7.25a(a)
PT+ SR_1	29.78±0.83a(b)	0.66±0.10b(a)	10.78±1.31b(b)	0.97±0.10b(a)	6.90a(a)
PT+ SR_0	28.52±1.34a(b)	0.51±0.08b(b)	7.54±0.06b(c)	1.15±0.31b(a)	8.14a(a)
NT+ SR_3	31.39±0.5a(a)	0.64±0.08a(b)	14.37±1.99a(a)	1.50±0.16a(a)	6.43a(a)
NT+ SR_2	28.87±1.18a(ab)	0.76±0.11a(a)	13.31±1.41a(ab)	1.39±0.38a(a)	8.57a(a)
NT+ SR_1	27.89±2.40a(b)	0.86±0.06a(a)	12.52±0.50a(b)	1.36±0.20a(a)	8.55a(a)
NT+ SR_0	27.11±2.41a(b)	0.63±0.10a(b)	12.26±1.64a(c)	1.43±0.20a(a)	6.21a(a)
T	0.1 ^{ns}	0.000 1**	0.000 1**	0.005 6**	0.66 ^{ns}
SR	0.02 [*]	0.000 3**	0.000 3**	0.58 ^{ns}	0.58 ^{ns}
T×SR	0.76 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.04 [*]	0.96 ^{ns}	0.62 ^{ns}

注: 括号外字母表示耕作处理间差异达到 0.05 显著水平; 括号内字母表示秸秆还田处理间差异达 0.05 显著水平。* 表示差异达 0.05 水平; ** 表示差异达 0.01 水平; ns 表示差异不显著; T 表示耕作方式; SR 表示秸秆还田。下同。

Note: Different letters outside the brackets stand for significance at $P<0.05$ between treatments in tillage and no-tillage. Different letters in brackets stand for significance at $P<0.05$ between different amount of wheat-straw returned. *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ns, $P>0.05$. T is tillage practices; SR is wheat-straw returned to the field. The same is as below.

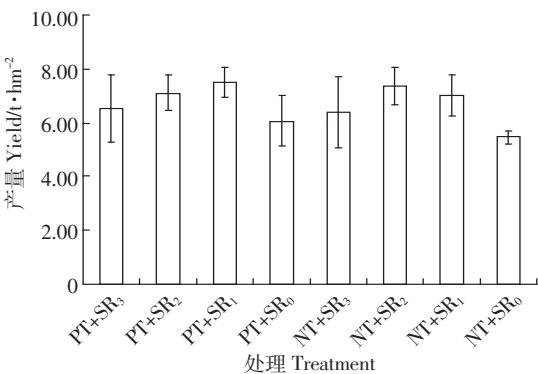


图 1 不同处理下的水稻产量
Figure 1 Rice grain yield in different treatments

0.01), 处理 SR₃、SR₂ 和 SR₁ 产量较 SR₀ 分别提高了 7.7%~16%、17%~35% 和 23%~28%。耕作方式对产量的影响不显著。

2.4 各活性碳成分之间相关性分析

土壤碳组分之间无显著相关(表 3),而水稻产量与土壤 WSOC 显著相关。

3 讨论

本研究表明,1 年免耕不能显著增加作物产量(图 1),这与 Jat 等^[9](3 年小麦-水稻轮作试验)、Sharma 等^[19](4 年小麦-水稻轮作试验)的研究结果类似。但是,Jiang 等^[20](16 年水稻试验)和 Mishra 等^[11](3 年小麦-水稻轮作试验)研究指出,免耕改善了土壤的理化性质,从而提高了作物产量。鉴于此,谢瑞芝等^[21]综述了中国保护性耕作对作物产量的影响,认为耕作间产量的差异可能与不同的气候条件、土壤肥力或免耕时间长短有关。因此,短期免耕对作物产量的影响还需要进一步的研究。短期秸秆还田显著提高水稻产量,这与蔡太义等^[12]所做的 1 年玉米秸秆还田试验的研究结果相似。但本研究秸秆还田量与水稻产量并非为简单的线性关系,其原因可能是,本研究水稻为直播,秸秆还田量较高时,会降低水稻出苗率,从而影响

水稻产量。

由于土壤自身特性及受环境因子影响的复杂性,土壤有机质对短期内因不同土壤或作物管理措施而引起的土壤质量的改变并不敏感,本试验结果显示,一年免耕对土壤 TOC 的影响不显著,与蔡太义等^[12](1 年免耕玉米旱地试验)和展茗等^[5](1 年油菜-水稻轮作试验)的研究结果较为一致。然而,有研究指出,虽然长期采用少免耕措施有利于土壤有机碳含量的提高,但其增长可能呈 S 型曲线变化,少免耕实施后 2~5 年内,土壤有机碳含量几乎没有变化或变化甚微,5~10 年间变化较大,其后 25~50 年会持续增长^[22]。秸秆还田显著增加土壤 TOC 含量,这与 Li 等^[23](3 年油菜-水稻轮作试验)、Dou 等^[24](20 年期小麦-大豆轮作试验)的研究结果类似,其原因可能是秸秆施用后,在土壤微生物作用下分解,部分进入土壤,提高了土壤有机碳含量,从而增加土壤碳库^[25]。

土壤活性有机碳,如 EOC、WSOC 等,能够很好地反映土壤质量,且对土壤管理措施的改变反应敏感^[26]。本研究的结果显示,免耕和秸秆还田等保护性耕作措施提高了土壤活性有机碳含量。这与 Jacobs 等^[27](40 年旱地实验)、Roper 等^[28](7 年小麦旱地实验)的研究结果是一致的。其原因可能是免耕避免土壤扰动,减少了土壤中微生物的保护性物质释放,缓解了土壤有机质的氧化和矿化^[26]。而秸秆还田增加了外源有机物的投入,为微生物提供了充足的碳源,促进微生物生长、繁殖,提高土壤微生物活性,微生物分解的有机物质以及秸秆腐解物是活性碳组分的主要来源,所以秸秆还田有助于提高 WSOC 和 EOC 的含量^[29]。

免耕显著增加土壤 MBC,秸秆还田对土壤 MBC 的影响则不显著,这与康轩^[30]所做的 1 年红薯旱地的研究结果不一致,其原因可能和土壤类型、种植制度以及耕作年限有关,但从表 1 可以看出,短期秸秆还田有提高土壤 MBC 含量的趋势。因此,如果长期采用秸秆还田,将有利于提高土壤 MBC 含量,培肥土壤。

表 3 不同处理各有机碳成分与产量之间的相关性分析
Table 3 Correlation among organic carbon fractions and yield under different treatments

指标 Indicator	总碳 TOC	水溶性有机碳 WSOC	易氧化态碳 EOC	微生物生物量碳 MBC	颗粒态碳 POC	产量 Yield
总碳 TOC	1					
水溶性有机碳 WSOC	-0.26	1				
易氧化态碳 EOC	0.15	0.2	1			
微生物生物量碳 MBC	-0.1	0.15	0.36	1		
颗粒态碳 POC	-0.17	0.2	-0.16	0.09	1	
产量 Yield	0.02	0.54**	-0.06	-0.39	-0.04	1

本研究中土壤 POC 未受短期耕作方式与秸秆还田影响,这与严昌荣等^[31](5 年玉米旱地试验)、Dou 等^[24](20 年小麦-大豆轮作试验)的研究结果不一致,其原因可能是,秸秆还田提高了地表活性有机质,增加了微生物活性,导致活性有机质分解较强,因此秸秆还田与免耕不能影响土壤 POC^[32]。耕作措施与秸秆还田对土壤活性碳的影响不仅包含土壤扰动与作物残茬分布,还包含长期效应带来的土壤物理、化学与生物变化导致的影响,而我们只研究了短期耕作(1 年)对土壤活性碳组分的影响,缺乏对长期耕作(>10 年)的了解,故有待进一步的探索。

CPMI 是反映土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标,为培肥地力、增加土壤活性碳含量提供了量化依据。表 2 显示,短期免耕和秸秆还田提高土壤 A、AI、CPI、CPMI,且随还田量增加而增加,这与展茗等^[5](1 年油菜-水稻轮作试验)、蔡太义等^[12](1 年玉米旱地试验)的研究结果类似。这可能是因为秸秆腐烂分解,增加了土壤微生物的数量,提高了微生物的活度,养分进入土壤活性碳库,有助于土壤活性碳库的积累,且秸秆还田量多时,可在土壤和大气之间形成一层屏障,减少水分蒸发,同时降低了土壤表面风速,使水分和热量交换降低,更有利于养分的矿化和吸收^[12]。

土壤 SMBC 是土壤碳库中活性较强的成分,易转化,对于保持土壤肥力有重要作用。土壤 WSOC 源自土壤溶液中的有机化合物,为微生物活动的动力,是土壤微生物活性的主要能量来源。土壤 EOC 在一定程度上反应了土壤活性有机质的酶分解状况^[23]。POC 是与土壤砂粒组分结合的那部分有机碳,在土壤中周转速度较快,易受土壤管理方式的影响,被作为土壤有机碳库变化的早期预示指标^[32]。Dou 等^[24](20 年小麦-大豆轮作试验)、Chen 等^[26](11 年小麦旱田试验)研究发现土壤活性有机质各组分之间显著相关。然而,本研究并没有观察到土壤 SMBC、WSOC、EOC、POC 之间存在显著相关,这可能是因为本试验年限短,也可能是因为土质、土壤水分状况的不同、气候的差异等造成的。

水稻产量与 TOC 无显著相关性,与大多数研究相同^[12],与 CPMI 无显著相关性,但与沈宏等^[33]的结果不一样,这可能与本研究的年限较短有关。线性相关分析表明,WSOC 与水稻产量呈极显著正相关(表 3),且 WSOC 对管理措施响应极为敏感(表 1),我们的研究表明,土壤 WSOC 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。

4 结论

经过 1 年的稻-麦轮作种植试验,短期免耕与秸秆还田显著影响土壤活性有机碳和碳库管理指数,进而影响水稻产量。

(1)相对于翻耕处理,免耕显著提高 WSOC 23%~68%、MBC 21%~40%、EOC 10%~63%和 CPMI 25%~48%,但不影响水稻产量。

(2)秸秆还田处理较不还田处理提高了 TOC 4%~16%、WSOC 37%~74%、EOC 2%~73%、CPMI 24%~279%和水稻产量 7.7%~35%。

(3)相关分析表明,WSOC 与水稻产量极显著相关($r=0.54^{**}$)。

本研究表明,土壤水溶性有机碳能更敏感地反映短期内农艺管理措施的改变,但因本试验年限较短,结果有待进一步研究和探索。

参考文献:

- [1] Blair G J, Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [2] 沈 宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3):32-38.
SHEN H, CAO Z H, HU Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3):32-38..
- [3] Wander M M, Train A S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1130-1139.
- [4] 张 迪,韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2715-2723.
ZHANG D, HAN X Z. Changes of black soil labile organic carbon pool under different vegetation and fertilization managements[J]. *China Agricultural Science*, 2010, 43(13): 2715-2723.
- [5] 展 茗,汪金平,乐丽鑫,等. 短期免耕对稻田土壤活性有机碳库的影响[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(4): 834-837.
ZHAN M, WANG J P, YUE L X, et al. Effects of short-term no-tillage on soil carbon pool in paddy fields [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(4): 834-837.
- [6] 陈尚洪,朱钟麟,刘定辉,等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 806-809.
CHEN S H, ZHU Z L, LIU D H, et al. Influence of straw mulching with no till on soil nutrients and carbon pool management index [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 806-809.
- [7] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 437-445.
- [8] McCarty G, Wlysenko N, Starr J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition[J]. *Soil Science*

- Society of America Journal*, 1998, 62: 1564–1571.
- [9] 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.
- [10] 王昌全, 韦成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(2): 152–154.
WANG C Q, WEI C M, LI T Q, et al. Effect of different zero tillage on the crop yield and soil property[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(2): 152–154.
- [11] Mishra J S, Singh V P. Tillage and weed control effects on productivity of a dry seeded rice - wheat system on a Vertisol in Central Indian[J]. *Soil Tillage Research*, 2012, 123: 11–20.
- [12] 蔡太义, 黄耀威, 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.
CAI T Y, HUANG Y W, HUANG H J, et al. Soil labile organic carbon and carbon pool management index as affected by different years no-tilling with straw mulching[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9): 1962–1968.
- [13] 张永春, 汪吉东, 聂国书, 等. 不同量秸秆机械化还田对稻麦产量及土壤碳活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(6): 833–838.
Zhang Y C, Wang J D, Nie G S, et al. Effect of mechanized straw application on crop yields and soil labile carbon content C[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2008, 24(6): 833–838.
- [14] 李录久, 杨哲峰, 李文高, 等. 秸秆直接还田对当季作物产量效应[J]. 安徽农业科学, 2000, 28(4): 450–457.
LI L J, YANG Z F, LI W G, et al. Effect of the straw-returning field on following crop[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2000, 28(4): 450–457.
- [15] Logan T J, Lal R, Dick W A. Tillage systems and soil properties in North America[J]. *Soil Tillage Research*, 1991(20): 241–270.
- [16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1987, 19: 703–704.
- [17] 曹军, 张甲坤, 陶澍. 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.
CAO J, ZHANG J S, TAO S. Soil sample preservation and pretreatment for water soluble organic carbon determination[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(4): 174–176.
- [18] Cambardella C A, Elliot E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777–783.
- [19] 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.
- [20] Jiang X J, Xie D T. Combining ridge with no-tillage in lowland rice-based cropping system; Long-term effect on soil and rice yield[J]. *Pe-dosphere*, 2009, 19(4): 515–522.
- [21] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君. 中国保护性耕作研究分析: 保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1914–1924.
XIE R Z, LI S K, LI X J. The analysis of conservation tillage in China: Conservation tillage and crop production: Reviewing the evidence[J]. *China Agricultural Science*, 2007, 40(9): 1914–1924.
- [22] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122: 1–23.
- [23] Li C F, Yue L X, Kou Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China[J]. *Soil Tillage Research*, 2012, 119: 31–37.
- [24] Dou F G, Wright A L, Hons F M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems[J]. *Soil Science Society America Journal*, 2008, 72: 1445–1453.
- [25] 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.
LI C F, KOU Z K, ZHANG Z S, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362–2367.
- [26] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, et al. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat mono-culture in Loess Plateau of China[J]. *Soil Tillage Research*, 2009, 106: 85–94.
- [27] Jacobs A, Rauber R, Ludwig B. Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years[J]. *Soil Tillage Research*, 2009, 102: 158–164.
- [28] Roper M M, Gupta V S R, Murphy D V. Tillage practices altered labile soil organic carbon and microbial function without affecting crop yields[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(3): 274–285.
- [29] 徐国伟, 常二华, 蔡建. 秸秆还田的效应及影响因素[J]. 耕作与栽培, 2005(1): 6–9.
XU G W, CHANG E H, CAI J. Effects of the crop residue incorporation and its influencing factors[J]. *Tillage and Cultivation*, 2005(1): 6–9.
- [30] 康轩, 黄景, 姜建初, 等. 免耕稻草覆盖种植红薯对稻田土壤碳库及微生物数量的影响[J]. 广西农业科学, 2010, 41(3): 236–239.
KANG X, HUANG J, JIANG J C, et al. Effects of no-tillage and straw covering for sweet potato on paddy soil carbon pool and quantity of soil micro-organism [J]. *Guangxi Agricultural Science*, 2010, 41(3): 236–239.
- [31] 严昌荣, 刘恩科. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 58–63.
YAN C R, LIU E K. Effect of different tillage on soil organic carbon and its fractions in the loess plateau of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 58–63.
- [32] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 765–771.
ZHOU P, ZHANG X H, PAN G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region, China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765–771.
- [33] 沈宏, 曹志洪. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 663–668.
SHEN H, CAO Z H. Study on soil C pool management index of different farmland ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 663–668.