基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对土壤易变性有机碳的影响

周 玲,张世熔*,李 婷,李 云,徐小逊,贾永霞

(四川省土壤环境保护重点实验室 四川农业大学资源环境学院 四川农业大学生态环境研究所,成都 611130)

摘 要:通过田间试验研究了不施肥(CK)、化肥(NPK)、基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥高、中、低水平(CF1、CF2 和 CF3)5 种施肥处理下 0~60 cm 土壤易变性有机碳含量及其在玉米生长期内的动态变化。结果表明:CF1、CF2 和 CF3 处理能显著提高 0~60 cm 土壤总有机碳(TOC)和易变性有机碳的含量及易变性有机碳的活性($P<0.05$),其中以 CF2 处理提高最显著;施肥对土壤易变性有机碳影响随着土层的加深而减弱。土壤易氧化有机碳(ROC)、溶解性有机碳(DOC)、水溶性有机碳(WSOC)这 3 种易变性有机碳中 ROC 和 DOC 可以作为指示土壤有机碳对有机无机复混肥敏感的指标,可用于预测土壤有机碳的变化趋势。研究基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对土壤有机碳库含量的影响,还需进行长期的定位试验。

关键词:有机无机复混肥;易变性有机碳;总有机碳;动态变化

中图分类号:S143.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2013)11-2231-08 doi:10.11654/jaes.2013.11.018

Soil Labile Organic Carbon as Influenced by Organic-inorganic Compound Fertilizer Made from Ash and Pig Manure

ZHOU Ling, ZHANG Shi-rong*, LI Ting, LI Yun, XU Xiao-xun, JIA Yong-xia

(Key Lab of Soil Environment Protection in Sichuan Province, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Institute of Ecological Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the dynamics of soil labile organic carbon in 0~60 cm soil layer at the growth stage of maize. Five treatments, including no fertilizer(CK), chemical fertilizer only(NPK) and three application rates of organic-inorganic compound fertilizers made from ash and pig manure(high-CF1, medium-CF2 and low-CF3) were used. Compared to the control, applying organic-inorganic compound fertilizer significantly increased the contents of total organic carbon(TOC) and labile organic carbon in 0~60 cm soil layer($P<0.05$), with the most significant effects found in CF2 treatment. The effects of fertilizers on soil labile organic carbons decreased gradually with soil depth. Significant correlations were observed among TOC, easily oxidizable organic carbon(ROC), dissolved organic carbon(DOC) and water-soluble organic carbon(WSOC). ROC and DOC were more sensitive to organic-inorganic compound fertilizers than other organic carbons, which could forecast dynamic of TOC. However, more research is needed to better understand the long term impacts of such organic-inorganic compound fertilizers on soil organic carbon pools.

Keywords: organic-inorganic compound fertilizer; labile organic carbons; total organic carbon; dynamics

近年来随着生物质发电产业和现代养猪业的发展产生了大量的灰渣和猪粪,如果处理不当,将会给环境带来严重影响。灰渣含有作物所需要的钾、钙等营养元素[1-2],但缺乏有机质、氮素等[2-3];猪粪能提供有机质和氮、磷、钾等养分,但其养分含量偏低。因此,灰渣和猪粪二者单施均不能满足作物的生长需要[3-4]。研究表明灰渣用于有机质含量丰富的土壤上能促进作物生长[5-6],而猪粪和化肥配合施用能够增加土壤有机碳储量和降低氮肥损失率[7-8]。因此,基于灰渣和猪粪配合无机化肥制造的有机无机复混肥不仅能够供给作物生长所需的养分,而且还能降低灰渣和猪粪对环

收稿日期:2013-03-14

基金项目:国家科技支撑计划课题项目(2012BAD14B18-2)

作者简介:周 玲(1988—),女,四川双流人,硕士研究生,主要从事农业废弃物循环利用研究。E-mail:jourley@126.com

* **通信作者**:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

境的污染,改善生态环境和增加土壤碳汇。

土壤易变性有机碳是指容易被微生物利用和转化的有机碳[9],能够及时灵敏的反映施肥对土壤有机碳库的影响,是衡量土壤有机碳库有效和敏感的指标[10-11]。它常因浸提方法的不同分为易氧化有机碳(Easy oxidizable organic carbon,ROC)、溶解性有机碳(Dissolved organic carbon,DOC)、水溶性有机碳(Water-soluble organic carbon,WSOC)等。一些研究表明,经过长期(3~20 年)施用有机肥能显著提高土壤易变性有机碳含量[7,11-14]。Zhou 等的研究表明,1~2 年的短期施肥管理也会影响土壤易变性有机碳的季节性变化[15],然而短期的施肥管理对农田作物生长期内土壤易变性有机碳含量变化却少见报道。

本文拟通过田间试验,以 ROC、DOC、WSOC 作为评价指标,研究基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对农田作物生长期内土壤易变性有机碳含量及其动态变化的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年 5 月至 9 月在四川省盐亭县生物质发电灰渣利用试验基地进行,该基地位于四川盆地中部偏北,北纬 31°14′,东经 105°05′,属亚热带湿润季风气候区,气候温和,热量充沛,平均气温 17.3 ℃,年平均降水量 825.8 mm,无霜期 294 d。试验土壤为粘壤土,pH 为 8.36,有机质含量为 16.98 g·kg^{-1}、碱解氮 93.10 mg·kg^{-1}、速效磷 8.44 mg·kg^{-1}、有效钾 93.15 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

试验共设计 5 个处理,包括不施肥(CK)、常规施肥(NPK)及基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥 1(CF1)、2(CF2)、3(CF3),其中 CF2 处理的含氮量与 NPK 处理相同,CF1、CF3 处理的含氮量分别是 NPK 处理的 1.2 倍和 0.8 倍。每个处理设置 3 个重复,每个小区面积为 3 m×6 m=18 m^2,采用随机区组排列方式。供试作物为玉米川单 428,种植行距为 0.5 m,窝距为 0.35 m,小区之间间隔 1 m,玉米种植前对田块进行翻耕,翻耕深度为 20 cm。各处理肥料均在种植玉米时一次性以基肥形式采用穴施方法施入,有机肥和无机肥料混合均匀后直接施入 20 cm 深的种植玉米苗的窝穴中,施肥时避免肥料与玉米根系直接接触,然后用土覆盖好肥料。肥料用量见表 1,灰渣和猪粪的基本化学性质如表 2。

表 1 肥料用量(kg·hm^{-2})

Table 1 Fertilizer application rates(kg·hm^{-2})

处理 Treatments	猪粪 Pig manure	灰渣 Ash	N Nitrogen	P_2O_5 Phosphorus pentoxide	K_2O Potassium oxide
CK	0	0	0	0	0
NPK	0	0	225.50	67.50	67.50
CF1	1206	48	132.65	37.93	14.22
CF2	1005	60	146.75	47.41	17.73
CF3	804	72	160.99	56.90	21.24

表 2 灰渣和猪粪的基本化学性质

Table 2 The basic chemical property of ash and pig manure

物质 Materials	pH	TOC	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
		g·kg^{-1}			
灰渣 Ash	11.20	36.9	0.45	0.53	0.93
猪粪 Pig manure	8.98	174.0	15.4	16.5	8.7

1.3 样品采集与测定方法

于 2011 年 5 月 10 日玉米种植前采集土壤样品,5 月 25 日种植玉米,然后分别在玉米的拔节期(6 月 25 日)、孕穗期(7 月 26 日)和成熟期(8 月 30 日)采用 5 点混合取土法采集各小区 0~20、20~40、40~60 cm 土层的土样,然后分别将各土层的 5 个平行样混合均匀,以“四分法”去除多余的土壤,最后留 1 kg 左右的样品作为最终的土壤样品,用塑料带封装后带回实验室,去除其中可见的动植物残体、石块等杂物,于通风阴凉处风干、研磨、过 2 mm 筛、混合均匀备用。

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量-外加热法测定[16],ROC 采用 0.02 mol·L^{-1} 的 $KMnO_4$ 浸提-比色法测定[17];DOC 采用 2 mol·L^{-1} KCl 浸提-$K_2Cr_2O_7$ 容量法测定[18];WSOC 采用去离子水(5∶1)浸提-$K_2Cr_2O_7$ 容量法测定[19]。土壤的基础指标采用常规分析方法测定[16]。

1.4 数据统计与分析

不同施肥处理间的数据经 Microsoft Office Excel 2003 整理后,采用 SPSS 17.0 进行方差分析(ANOVA),用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验(P<0.05)。

2 结果与讨论

2.1 总有机碳含量

土壤总有机碳含量是体现土壤肥力的指标之一,也影响着土壤易变性有机碳的含量,因此研究总有机

碳含量的变化。从表 3 可以看出,在玉米种植前各处理的总有机碳含量无显著性差异,从玉米拔节期开始出现差异;整个生长期内总有机碳含量呈先升高,在孕穗期达到最大后再降低的趋势;在玉米成熟期 CF1、CF2 和 CF3 处理 0~60 cm 总有机碳含量均显著高于 CK 和 NPK 处理,其 0~20 cm 土壤总有机碳含量相对于 CK 分别提高了 4.35%、4.60%、2.52%,相对于 NPK 分别提高了 3.92%、4.17%、2.10%。这表明在玉米生长期内基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能够显著提高土壤总有机碳的含量,以 CF2 处理提高土壤总有机碳含量最显著(P<0.05)。20~40 cm 和 40~60 cm 土壤总有机碳相对于 CK、NPK 处理也有一定量的提高,但较 0~20 cm 提高量少;随着土层的加深总有机碳含量递减,各处理间的显著性差异也减小(P<0.05),表明施肥对土壤的影响随着土层的加深而逐渐减弱,这与大多数学者研究管理措施对土壤的影响一致[12,20]。玉米成熟期时,总有机碳含量较种植前有所提高,但是提高量较小,可能是因为土壤总有机碳含量在短期内受到施肥的影响较小,多数总有机碳的研究是经过长期的施肥管理对其的影响[7,11,14],所以要研究总有机碳的变化还需进行长期的试验。

表 3　总有机碳含量变化

Table 3　Soil TOC dynamic

土层/cm Layer	处理 Treatments	TOC/g·kg^{-1}			
		BS	ES	MS	LS
0~20	CK	10.10a	10.22c	10.53c	10.37d
	NPK	10.13a	10.35c	10.78b	10.45d
	CF1	10.11a	10.80ab	11.40a	10.82b
	CF2	10.20a	10.91a	11.48a	10.95a
	CF3	10.17a	10.69b	11.37a	10.70c
20~40	CK	8.49a	8.58c	8.67b	8.76c
	NPK	8.45a	8.64c	8.86b	8.80c
	CF1	8.46a	8.84b	9.34a	9.07b
	CF2	8.47a	8.91a	9.41a	9.13a
	CF3	8.47a	8.82b	9.31a	9.05b
40~60	CK	6.45a	6.54b	6.65b	6.60b
	NPK	6.47a	6.61b	6.69b	6.64b
	CF1	6.47a	6.74a	6.75a	6.78a
	CF2	6.48a	6.79a	6.77a	6.80a
	CF3	6.48a	6.73a	6.73a	6.77a

注:表中 BS 代表玉米种植前,ES 代表拔节期,MS 代表孕穗期,LS 代表成熟期。不同字母表示同一时期不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。下同。

Note: BS indicate early stage before plant maize, ES indicate jointing stage, MS indicate booting stage, LS indicate maturation stage. Different letters indicate significant differences at P<0.05 level at the same stage among the different treatments. The same below.

2.2　易氧化有机碳动态变化

本研究表明,表层(0~20 cm)土壤易氧化有机碳含量从玉米拔节期开始增加,在孕穗期达到最大后开始降低,到成熟期时仍高于种植前,和土壤总有机碳的变化趋势一致,这说明易氧化有机碳的变化趋势可以反映总有机碳的变化趋势(图 1)。另外,整个生长期内 CK 和 NPK 处理土壤易氧化有机碳含量均显著低于 CF1、CF2 和 CF3 处理(P<0.05),至成熟期时,CK 处理的土壤易氧化有机碳含量相对于种植前提高了 0.54%,NPK 处理相对于种植前提高了 1.73%,CF1、CF2 和 CF3 处理相对于 CK 提高了 4.14%~5.24%,相对于 NPK 提高了 2.95%~5.58%。20~40 cm 和 40~60 cm 土层 CF1、CF2、CF3 处理土壤易氧化有机碳含量的变化趋势与 0~20 cm 相同,只是随着土层的加深而逐渐减少,同时处理间的显著性差异逐渐减小(P<0.05)。这表明基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能影响土壤易氧化有机碳的动态变化,并能提高土壤易氧化有机碳含量,可能原因是其促进了土壤

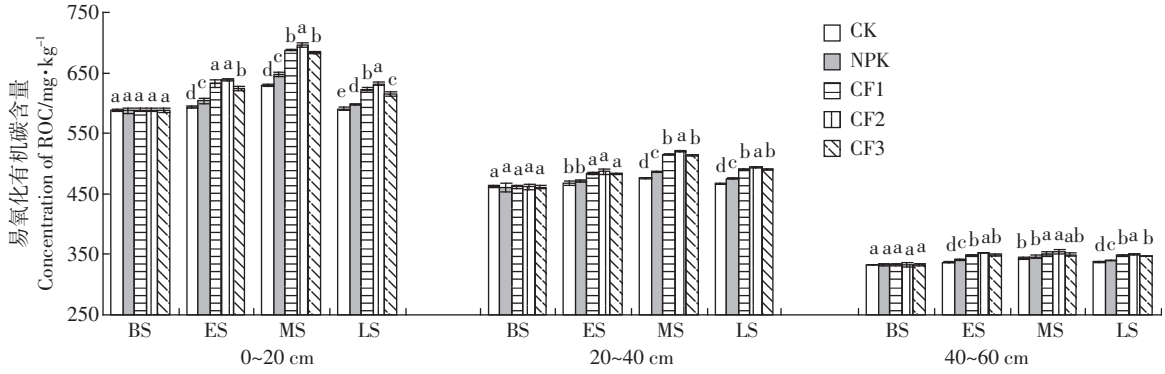

图 1　易氧化有机碳短期动态变化

Figure 1　Short-term dynamics of ROC

有机碳的降解，同时其中的有机肥部分提高了微生物活性及其自身分解释放出易氧化有机碳，从而使土壤易氧化有机碳含量提高[21-23]。

易氧化有机碳占总有机碳比例（ROC/TOC）与易氧化有机碳含量变化趋势相同（图 2），随着玉米的生长先升高，在玉米孕穗期达到最高后降低，到成熟期易氧化有机碳占总有机碳比例低于玉米种植前，表明成熟期时土壤总有机碳的分解减弱；易氧化有机碳占总有机碳比例随着土层的加深而逐渐降低，表明随着土层的加深土壤总有机碳的分解减弱。成熟期时 0~60 cm 土层 CF1、CF2 和 CF3 处理的易氧化有机碳占总有机碳比例均高于 CK 和 NPK 处理，其中 CF2 处理的易氧化有机碳占总有机碳比例最高，表明基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能提高易氧化有机碳占总有机碳比例。这可能是因为基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥增加了土壤中有机碳含量或促进了土壤有机碳的分解。

2.3 溶解性有机碳动态变化

土壤溶解性有机碳含量约是易氧化有机碳含量的 1/10，其整体变化趋势是随着玉米的生长呈先升高、在玉米拔节期达到最大后逐渐降低（图 3），同总有机碳含量变化趋势类似，但是其含量达到最高是在玉米的拔节期，比总有机碳（孕穗期）提前达到最高，表明溶解性有机碳可以预测总有机碳的变化趋势。溶解性有机碳在拔节期达到最大，可能是由于玉米根系活动和施肥的共同作用，拔节期是玉米的生长旺盛期，强烈的根系活动促进了土壤中有机质的分解，使溶解性有机碳含量增加。高会议等[24]的研究结果也表明溶解性有机碳在玉米拔节期达到最大。基于灰渣和猪粪制造的有机物复混肥的施入增加了土壤中的有机质，使 CF1、CF2 和 CF3 处理的溶解性有机碳含量高于 CK 和 NPK 处理。淋失是溶解性有机碳重要的消耗部分[25]，当进入孕穗期时高温和强降雨引起土壤中溶解性有机碳淋失，所以土壤溶解性有机碳含量较低。在玉米各生育期内 CK 与 NPK 处理 0~60 cm 土壤的溶解性有机碳含量均显著低于 CF1、CF2、CF3 处理（$P<0.05$）；到成熟期时 CK、NPK、CF1、CF2、CF3 处理 0~20 cm 土壤溶解性有机碳含量相对于种植前分

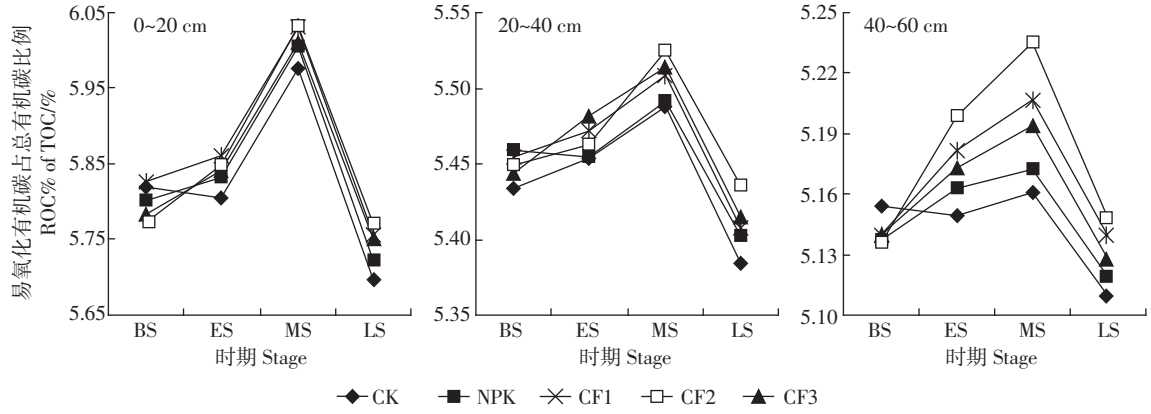

图 2 易氧化有机碳占总有机碳比例

Figure 2 ROC% of TOC

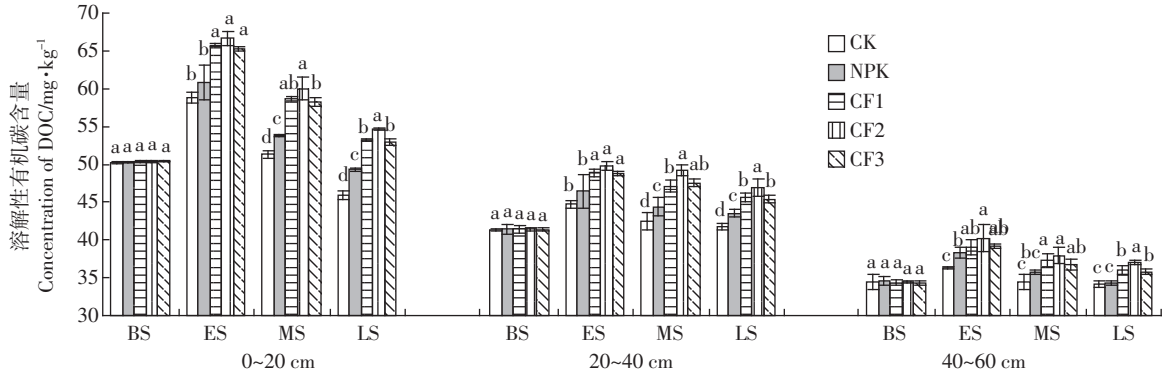

图 3 溶解性有机碳短期动态变化

Figure 3 Short-term dynamics of DOC

别增加-8.67%、-1.92%、5.83%、8.58%、5.08%。随着土层深度增加,溶解性有机碳含量增加幅度减小,这与土壤总有机碳含量变化有一定的相关性。

溶解性有机碳占总有机碳比例(DOC/TOC)与溶解性有机碳含量变化情况相同,随玉米的生长先升高,在玉米拔节期达到最高后逐渐降低(图 4);成熟期时 0~20 cm 土层 CK 和 NPK 处理的溶解性有机碳占总有机碳比例略低于玉米种植前,CF1、CF2 和 CF3 处理的溶解性有机碳占总有机碳比例不变或略高于玉米种植前,CF1、CF2 和 CF3 处理溶解性有机碳占总有机碳比例比 CK 分别高 11.28%、12.87%、11.78%,比 NPK 分别高 4.33%、5.82%、4.80%;20~40 cm 和 40~60 cm 土壤溶解性有机碳占总有机碳比例变化情况与 0~20 cm 相似,表明基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能提高或维持土壤溶解性有机碳占总有机碳的比例。玉米种植前与成熟期 0~60 cm 土壤溶解性有机碳占总有机碳比例虽然较小,变化范围为 0.44%~0.61%,但溶解性有机碳能在拔节期达到最大,且占总有机碳的比例也达到最大,表明溶解性有机碳比总有机碳受施肥的影响更敏感。

2.4 土壤水溶性有机碳动态变化

水溶性有机碳含量与溶解性有机碳含量均低于 100 mg·kg^{-1},但水溶性有机碳的波动范围较溶解性有机碳大,其变化趋势与溶解性有机碳变化相同,均是随玉米的生长先升高、在玉米拔节期达到最大后逐渐降低(图 5)。这可能是由于玉米在拔节期根系分泌物增加导致土壤中水溶性有机碳含量增加,而当玉米进入孕穗期降雨量大,使水溶性有机碳含量减少[26]。整个生长期内 0~60 cm 土层 CF1、CF2 和 CF3 处理的水溶性有机碳含量均显著高于 CK 和 NPK 处理,且在成熟期时 CK 和 NPK 处理的水溶性有机碳含量均低于种植前,CF1、CF2 和 CF3 处理则高于种植前。0~20 cm 土层 CK 和 NPK 处理的水溶性有机碳含量相对于种植前分别降低了 30.85%、25.46%,而 CF1、CF2 和 CF3 处理则分别增加了0.24%、3.61%、-1.14%,20~40 cm 和 40~60 cm 水溶性有机碳含量变化情况与 0~

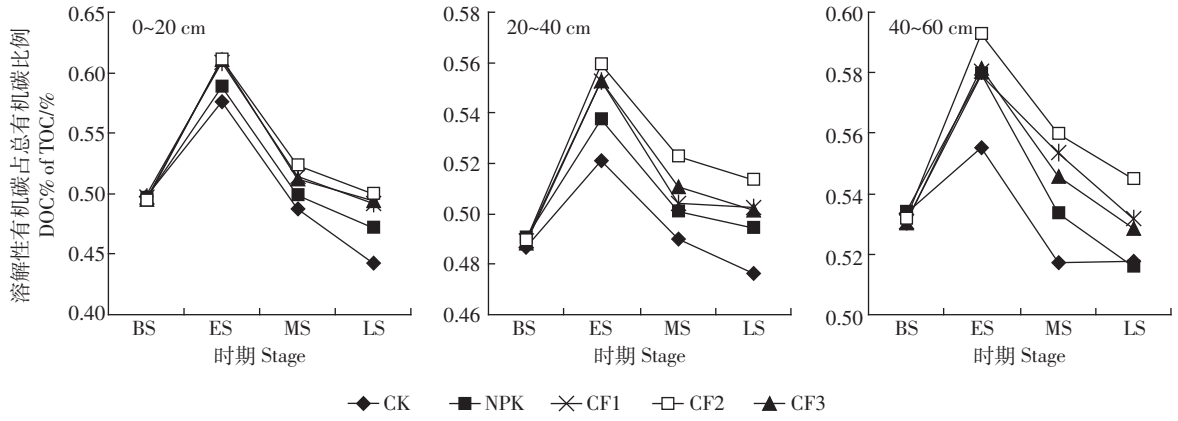

图 4 溶解性有机碳占总有机碳比例

Figure 4 DOC% of TOC

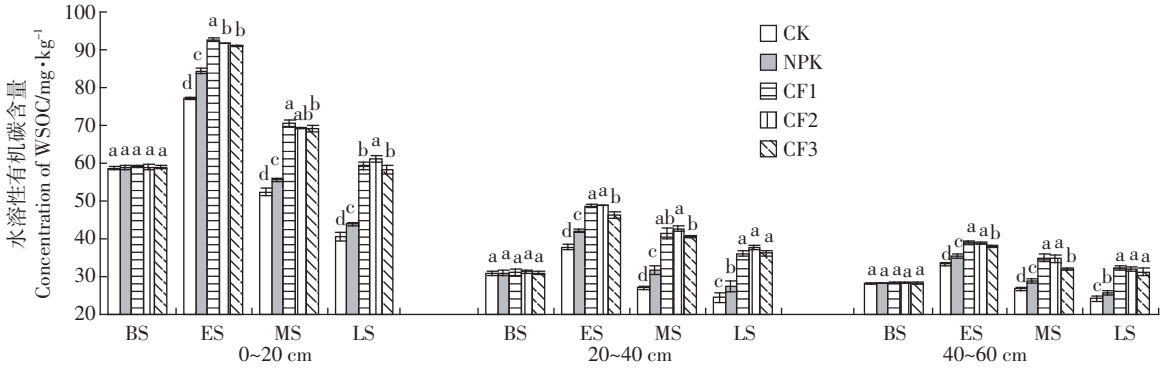

图 5 水溶性有机碳短期动态变化

Figure 5 Short-term dynamics of WSOC

20 cm 相似。这可能是由于基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥提高了微生物活性,从而增加了土壤水溶性有机碳的含量[27]。

水溶性有机碳占总有机碳比例(WSOC/TOC)变化趋势与水溶性有机碳含量变化趋势相同(图 6),随玉米的生长先升高,在玉米拔节期达到最高后逐渐降低。在拔节期 0~60 cm 土层水溶性有机碳占总有机碳比例达到最高后,CK 和 NPK 处理开始急剧下降,降低率为 20.37%~36.59%,到达孕穗期时水溶性有机碳占总有机碳比例已经低于种植前,比种植前低 11.36%~27.59%,孕穗期之后 CK 和 NPK 处理水溶性有机碳占总有机碳比例继续下降;而 CF1、CF2 和 CF3 处理的水溶性有机碳占总有机碳比例在拔节期达到最高后降低幅度较小,最后到成熟期时 0~20 cm 土层水溶性有机碳占总有机碳比例略低于种植前,分别低 6.78%、3.48%、6.90%,20~40 cm 和 40~60 cm 土层水溶性有机碳占总有机碳比例则高于种植前。整个生长期内 0~60 cm 土层 CF1、CF2 和 CF3 处理的水溶性有机碳占总有机碳比例均高于 CK 和 NPK 处理。这表明基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能提高土壤水溶性有机碳占总有机碳比例,并能减缓水溶性有机碳占总有机碳比例的下降和提高水溶性有机碳占总有机碳比例。

2.5 不同施肥处理下玉米产量及有机碳指标间的相关性系数

产量是衡量肥料效果的重要指标,研究表明有机无机复混肥或有机、无机肥配施能够提高作物产量[28-30]。对产量分析表明,施用有机无机复混肥处理(CF1、CF2、CF3)的玉米产量显著高于不施肥(CK)和只施无机化肥(NPK)处理,玉米产量从大到小依次为:CF2(9 832.82 kg·hm^{-2})、CF3(9 577.42 kg·hm^{-2})、CF1(9 531.29 kg·hm^{-2})、NPK(8 243.37 kg·hm^{-2})、CK(7 563.60 kg·hm^{-2})。这表明基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥也能提高作物产量。

有机碳库的敏感指标,各学者有不同的观点。Yang 等[13]认为易氧化有机碳(ROC)是对土壤有机碳库最敏感的指标之一;高忠霞等[12]经过 27 年的长期定位试验表明施肥措施能显著影响溶解性有机碳的含量;Scaglia 和 Adani[31]的研究表明管理措施与 WSOC 有密切关系。各项有机碳指标间相关性分析(表 4)表明:0~20 cm 土层 TOC 与 ROC、DOC、ROC/TOC 有极显著相关关系,ROC 与 DOC 有极显著相关关系,DOC、WSOC、DOC/TOC、WSOC/TOC 两两之间均有极显著相关关系。这说明 DOC 的变化可指示 WSOC 的变化,而 DOC 与 TOC 有极显著相关关系,所以 ROC、DOC、WSOC 中 ROC 和 DOC 可作为有机碳较敏感的指标,在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层也表现出相同的结果。

3 结论

玉米生长期内土壤易变性有机碳的动态变化趋势为:土壤易氧化有机碳(ROC)含量先增加,在玉米孕穗期达到最大后降低;土壤溶解性有机碳(DOC)和水溶性有机碳(WSOC)含量也先增加,在玉米拔节期达到最大后逐渐降低。基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥能在玉米生长期内提高土壤易变性有机碳占总有机碳的比例;5 种处理中 CF2 处理下土壤总有机碳含量和易变性有机碳含量提高最显著,CF2 是提高土壤有机碳较优的复混肥配方;土壤易变性有机碳虽然占总有机碳很小的比例,但是其变化较总有机碳

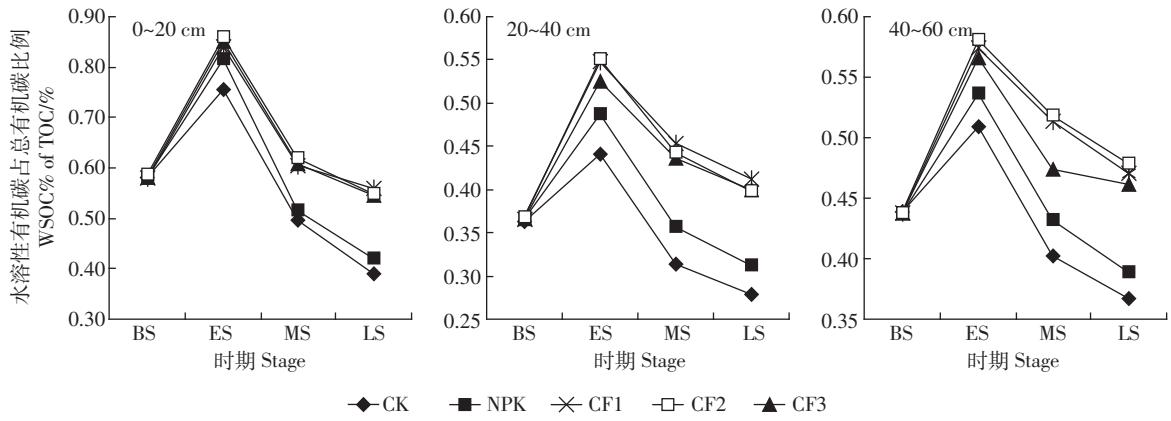

图 6 水溶性有机碳占总有机碳比例

Figure 6 WSOC% of TOC

表 4 有机碳指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among soil organic carbon indicators

土层 Layer/cm	指标 Indicator	TOC	ROC	DOC	WSOC	ROC/TOC	DOC/TOC	WSOC/TOC
0~20	TOC	1						
	ROC	0.967**	1					
	DOC	0.520**	0.518**	1				
	WSOC	0.288	0.300	0.953**	1			
	ROC/TOC	0.660**	0.828**	0.399	0.261	1		
	DOC/TOC	0.580	0.151	0.914**	0.969**	0.170	1	
	WSOC/TOC	0.636	0.133	0.891**	0.984**	0.156	0.980**	1
20~40	TOC	1						
	ROC	0.978**	1					
	DOC	0.730**	0.759**	1				
	WSOC	0.475**	0.541*	0.913**	1			
	ROC/TOC	0.314	0.504*	0.439	0.501*	1		
	DOC/TOC	0.239	0.295	0.836**	0.916**	0.358	1	
	WSOC/TOC	0.308	0.383	0.838**	0.983**	0.470*	0.943**	1
40~60	TOC	1						
	ROC	0.971**	1					
	DOC	0.672**	0.750**	1				
	WSOC	0.575**	0.662**	0.961**	1			
	ROC/TOC	0.503*	0.692**	0.699**	0.686**	1		
	DOC/TOC	0.400	0.506*	0.941**	0.933**	0.633**	1	
	WSOC/TOC	0.456*	0.551*	0.930**	0.990**	0.645**	0.945**	1

注:*,** 分别代表显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)水平。

Note:*,** indicate significant differences at P<0.05 and P<0.01 level, respectively.

变化更敏感,3 种易变性有机碳中易氧化有机碳(ROC)和溶解性有机碳(DOC)可作为指示土壤有机碳库较敏感的指标。

本文的不足之处是只做了短期内基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对易变性有机碳的影响,可用于预测土壤有机碳库的变化趋势,要清楚基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对土壤碳库的影响,还需进行长时间的定位试验。

参考文献:

[1] Sun W, Huang Y, Zhang W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(3):1-12.

[2] Gómez-Rey M X, Madeira M, Coutinho J, et al. Wood ash effects on nutrient dynamics and soil properties under mediterranean climate[J]. *Annals of Forest Science*, 2012, 69(5):569-579.

[3] Väätäinen K, Sirparanta E, Räisänen M, et al. The costs and profitability of using granulated wood ash as a forest fertilizer in drained peatland forests[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(8):3335-3341.

[4] Odlare M, Svensson P K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues[J]. *Waste Management*, 2008, 28(7):1246-1253.

[5] 张　林, 韩振海, 李天忠, 等. 粉煤灰有机肥配施对苹果生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2008(4):20-23.
ZHANG Lin, HAN Zhen-hai, LI Tian-zhong, et al. Effect of combined application of fly ash and organic manures on vegetative growth and fruit quality of apple trees[J]. *Northern Horticulture*, 2008(4):20-23.

[6] Hänell B, Magnusson T. An evaluation of land suitability for forest fertilization with biofuel ash on organic soils in Sweden[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 209(1-2):43-55.

[7] Pan G X, Zhou P, Li Z P, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3-4):274-280.

[8] Meade G, Pierce K, O′Doherty J V, et al. Ammonia and nitrous oxide emissions following land application of high and low nitrogen pig manures to winter wheat at three growth stages[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2):208-217.

[9] Needelman B A, Wander M M, Bollero G A, et al. Interaction of tillage and soil texture:Biologically active soil organic matter in Illinois[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5):1326-1334.

[10] Sainju U M, Lenssen A, Caesar-Thonthat T, et al. Dryland plant biomass and soil carbon and nitrogen fractions on transient land as influenced by tillage and crop rotation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007,

93(2):452-461.

[11] Melero S, López-Bellido R J, López-Bellido L, et al. Long-term effect of tillage, rotation and nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 114(2):97-107.

[12] 高忠霞, 周建斌, 王 祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):115-121.
GAO Zhong-xia, ZHOU Jian-bin, WANG Xiang, et al. Effects of different fertilizer treatments on content and characteristics of dissolved oganic carbon in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1):115-121.

[13] Yang X Y, Ren W D, Sun B H, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012(177-178):49-56.

[14] Ding X L, Han X Z, Liang Y, et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a mollisol in China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012(122):36-41.

[15] Zhou G M, Xu J M, Jiang P K, et al. Effect of management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4):525-531.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:30-38.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2000:30-38.

[17] Ray R W, Kandikar R I, Melissa A S, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment:A simplied method for laboratory and field use[J]. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, 1(18):3-17.

[18] Matlou M C, Haynes R J. Soluble organic matter and microbial biomass C and N in soils under pasture and arable management and the leaching of organic C, N and nitrate in a lysimeter study[J]. *Soil Ecology*, 2006, 34(2-3):160-167.

[19] Scaglia B, Adani F. Biodegradability of soil water soluble organic carbon extracted from seven different soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(5):641-646.

[20] 李 琳, 李素娟, 张海林, 等. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):106-109.
LI Lin, LI Su-juan, ZHANG Hai-lin, et al. Study on soil C pool management index of conversation tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):106-109.

[21] 陈小云, 郭菊花, 刘满强, 等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1):125-131.
CHEN Xiao-yun, GUO Ju-hua, LIU Man-qiang, et al. Effects of fertilization on lability and recalcitrancy of organic carbon of red paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(1):125-131.

[22] 韩成卫, 李忠佩, 刘 丽, 等. 去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1):107-113.
HAN Cheng-wei, LI Zhong-pei, LIU Li, et al. Influence on carbon and nitrogen mineralization after dissolved organic matter removal in subtropical Chinese paddy soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1):107-113.

[23] Embacher A, Zsolnay A, Gattinger A, et al. The dynamics of water extractable organic matter(WEOM) in common arable topsoils: Ⅱ. Influence of mineral and combined mineral and manure fertilization in a haplic chernozem[J]. *Geoderma*, 2008, 148(1):63-69.

[24] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, 9(5):2551-2557.
GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao, et al. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 9(5):2551-2557.

[25] 柳 敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. 土壤通报, 2007, 38(4):758-764.
LIU Min, YU Wan-tai, JIANG Zi-shao, et al. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4):758-764.

[26] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, 32(1):290-297.
HOU Cui-cui, SONG Chang-chun, LI Ying-chen, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon and active organic carbon fractions in calamagrostis angustifolia wetlands topsoil under different water conditions[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):290-297.

[27] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4):831-836.
TONG Xiao-gang, HUANG Shao-min, XU Ming-gang, et al. Effects of the different long-term fertilizations on fractions of organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4):831-836.

[28] 张小莉, 孟 琳, 王秋君, 等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):624-630.
ZHANG Xiao-li, MENG Lin, WANG Qiu-jun, et al. Effects of organic-inorganic mixed fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3):624-630.

[29] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. *Field Crops Research*, 2005(93):264-280.

[30] Adrien N D. Soil properties and crop yields in response to mixed paper mill sludges, dairy cattle manure, and inorganic fertilizer application[J]. *Soil Quality & Fertility*, 2009, 101(4):826-835.

[31] Scaglia B, Adani F. Biodegradability of soil water soluble organic carbon extracted from seven different soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009(21):641-646.