

不同施肥处理土壤水溶性有机碳含量特征及动态变化

李 森, 张世熔*, 罗洪华, 周 玲, 王贵胤, 沈义畅

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘 要: 采用田间小区试验, 研究了不施肥(CK)、化肥(NPK)、鸡粪(M)和分别基于鸡粪、猪粪制造的有机无机复混肥(NPKM1、NPKM2) 5种施肥处理土壤水溶性有机碳(WSOC)的含量及其随小麦生育期的动态变化特征。结果表明, 表层(0~20 cm)不同施肥处理的冷、热两种水溶性有机碳随生育期推移呈先增后减, 随后再增加的动态变化; 它们的含量在 NPKM1、NPKM2 处理下均显著高于 CK 和 NPK 处理($P<0.05$), 而低于 M 处理。各处理心土层(20~40 cm)水溶性有机碳的动态变化趋势则表现出先增加后减少的变化趋势, 而处理间水溶性有机碳含量高低顺序与表层相似。此外, 表层两种水溶性有机碳与土壤养分、小麦产量的相关性比总有机碳高, 因而能更灵敏地反映土壤养分供应状况和生产能力。

关键词: 施肥; 畜禽粪便; 水溶性有机碳; 生育期; 动态变化

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)02-0314-06 doi:10.11654/jaes.2013.02.015

Concentration Characteristics and Dynamic Changes of Water Soluble Organic Carbon in Soil Under Different Fertilization Treatments

LI Sen, ZHANG Shi-rong*, LUO Hong-hua, ZHOU Ling, WANG Gui-yin, SHEN Yi-chang

(College of Resources and Environmental, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A field plot experiment was conducted to study the water soil organic carbon (WSOC) dynamics with the growth of wheat under different fertilization treatments including no fertilizer (CK), chemical fertilizer only (NPK), chicken manure (M), organic-inorganic compound fertilizer based on chicken manure (NPKM1) and pig manure (NPKM2). The results indicated that the cold water soil organic carbon (CWSOC) and hot water soil organic carbon (HWSOC) concentrations of all treatments increased firstly and decreased subsequently and finally increased with the changes of the growth stage at topsoil (0~20 cm). Their concentrations under NPKM1 and NPKM2 treatments were significantly higher than CK and NPK treatments ($P<0.05$), but lower than the M treatment. The CWSOC and HWSOC concentrations in 20~40 cm soil layer presented a single-peak curve with the changes of the growth stage which the peak appeared at heading stage, and the order from high to low was similar to the topsoil. In addition, the correlation of the two kinds of WSOC with wheat yield and soil nutrients was higher than soil total organic carbon at topsoil.

Keywords: fertilization; livestock and poultry manure; water soluble organic carbon; growth stage; dynamic change

土壤水溶性有机碳(WSOC)是指能溶解于土壤水的那部分活性较高的土壤有机碳素^[1-2]。WSOC 直接参与土壤生物化学转化过程, 在保持土壤肥力、改善土壤质量、维持土壤碳库平衡方面具有重要的意义^[3-4], 并被认为是反映因农业管理措施改变而引起土壤质量变化的敏感指标^[5-6]。根据其浸提温度不同, 可分为冷水溶性有机碳(CWSOC)和热水溶性有机碳(HWSOC)^[7-8]。

施肥能直接或间接地调控土壤有机质的输入, 在不同程度上影响土壤有机碳的积累和矿化, 从而引起土壤有机碳特别是 WSOC 等活性有机碳含量的变化^[9]。畜禽粪便肥料化利用是实现畜禽粪便资源化的有效途径, 也可以促进农牧良性循环、维持生态平衡, 对于减少化肥施用、降低农业环境压力等方面具有重要意义^[10]。近年来有关畜禽粪便肥料化利用的研究报道主要集中于其施用后对土壤理化性质、土壤团聚体结构影响等方面^[10-12], 对 WSOC 含量的影响也时有报道, 但只是对 CWSOC 的单次观测分析^[13-14], 关于畜禽粪便施用后 WSOC 的生育期动态变化及其对 HWSOC 的影响却鲜见报道。

收稿日期: 2012-07-12

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(NC2010RE0057, 2012BAD14B18-02); 四川农业大学创新性实验计划项目(111062654)

作者简介: 李 森(1989—), 男, 四川宜宾人, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: lisen0221@yahoo.cn

* 通信作者: 张世熔 E-mail: rsz01@163.com

为此,本文选择不施肥和施用化肥、鸡粪、有机无机复混肥的麦作土壤为供试土壤,监测和分析不同肥料施用后 CWSOC 和 HWSOC 的含量水平及其随生育期的动态变化趋势,并探讨了 WSOC 与作物产量的关系,以期农业合理培肥和畜禽粪便的肥料化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验地点位于四川农业大学雅安校区教学科研基地,供试土壤为白垩系灌口组粉砂岩发育而来的紫色土。试验开始时耕层土壤理化性状为:壤质粘土,pH 6.68,有机质 $25.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 N $1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 P $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 K $24.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 P $35.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 K $39.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验于 2010 年 10 月至 2011 年 5 月进行,设置不施肥对照(CK)、化肥(NPK)、鸡粪(M)、基于鸡粪、猪粪制造的有机无机复混肥(NPKM1、NPKM2)共 5 个处理。NPK 处理施 N $117.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $74.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $113.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;M 处理施风干鸡粪 $6.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (折合施 N $114.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $67.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $57.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、有机质 $1.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);NPKM1、NPKM2 处理分别施基于鸡粪、猪粪制造的有机无机复混肥 $1.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (折合施 N $128.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $96.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $128.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、有机质 $249.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。其中化肥、腐熟鸡粪和有机无机复混肥分别于小麦播种前随翻耕拌入土壤作基肥。化肥处理氮、磷、钾肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,供试作物为内麦 9 号。

1.3 样品采集与测定

分别于 2010 年 10 月下旬小麦播种前(SP)、2010 年 12 月上旬幼苗期(SS)、2011 年 1 月上旬分蘖期(TS)、2011 年 3 月中旬拔节期(JS)、2011 年 4 月上旬抽穗期(HS)、2011 年 5 月中旬成熟期(MS)采用多点混合采样方法采集各小区 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤,用塑料带封装后带回实验室,去除土样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。

WSOC 浸提参考 Chantigny^[7]和 Ghani^[8]等的方法并稍作修改。CWSOC 的浸提:准确称取过 2 mm 筛的风干土 5.00 g,按水土比为 5:1 加入 25 ℃蒸馏水 25.00 mL,在 25 ℃恒温振荡机上以 $170 \sim 180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

振荡 0.5 h,以 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取其上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜后保存于 4 ℃条件下待测;HWSOC 的浸提则用 70 ℃的热水作为浸提剂,然后在 70 ℃下水浴保温 10 h,其他步骤同上;浸提液中的 CWSOC 和 HWSOC 采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定^[15]。土壤总有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、土壤质地、pH 的测定均采用常规方法^[15]。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2003 进行数据处理,用 SPSS17.0 软件进行方差分析(ANOV)、显著性检验(LSD)及相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥处理对水溶性有机碳的影响

2.1.1 水溶性有机碳含量

不同施肥处理 0~40 cm 土层 CWSOC 的含量在整个生长季为 $11.17 \sim 79.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变幅为 $68.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;HWSOC 的含量为 $14.42 \sim 95.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变幅为 $81.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,HWSOC 含量为 CWSOC 的 1.05~1.30 倍(图 1)。各生育期不同施肥处理 0~20 cm 土层 CWSOC、HWSOC 含量的高低顺序均为 $M > \text{NPKM1} \approx \text{NPKM2} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。整体上看,M、NPKM1 及 NPKM2 处理的 CWSOC、HWSOC 含量均显著高于 NPK 和 CK 处理($P < 0.05$),但前三者间差异不显著($P > 0.05$),而 NPK 处理又显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。其中,从播种前到拔节期,各处理 CWSOC、HWSOC 的含量逐渐增加,尤以 M 处理增加最为显著。在拔节期,M 处理 CWSOC、HWSOC 的含量分别为 79.85 、 $95.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是 NPK 处理的 1.36 倍和 1.42 倍,并显著高于 NPKM1 和 NPKM2 处理($P < 0.05$)。进入抽穗期,各处理 WSOC 含量均出现降低,但处理间的差异性与拔节期保持一致。与播种前相比,成熟期后各处理 CWSOC、HWSOC 含量均有不同程度增加,其中 M、NPKM1 及 NPKM2 处理 CWSOC 增量分别为 41.22、36.37、35.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,HWSOC 增量分别为 41.92、36.23、38.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,含量均显著高于 NPK 和 CK 处理($P < 0.05$)。

20~40 cm 土层 WSOC 含量差异与 0~20 cm 土层有所不同(图 1)。整个生育期除 M 处理 WSOC 含量显著高于 NPK 处理外($P < 0.05$),其他施肥处理间差异均不显著($P > 0.05$),表明施肥对 WSOC 的影响随着土壤深度的增加在减小。同时,WSOC 具有明显的剖面变化特征,其 20~40 cm 土层 CWSOC 和 HWSOC 的

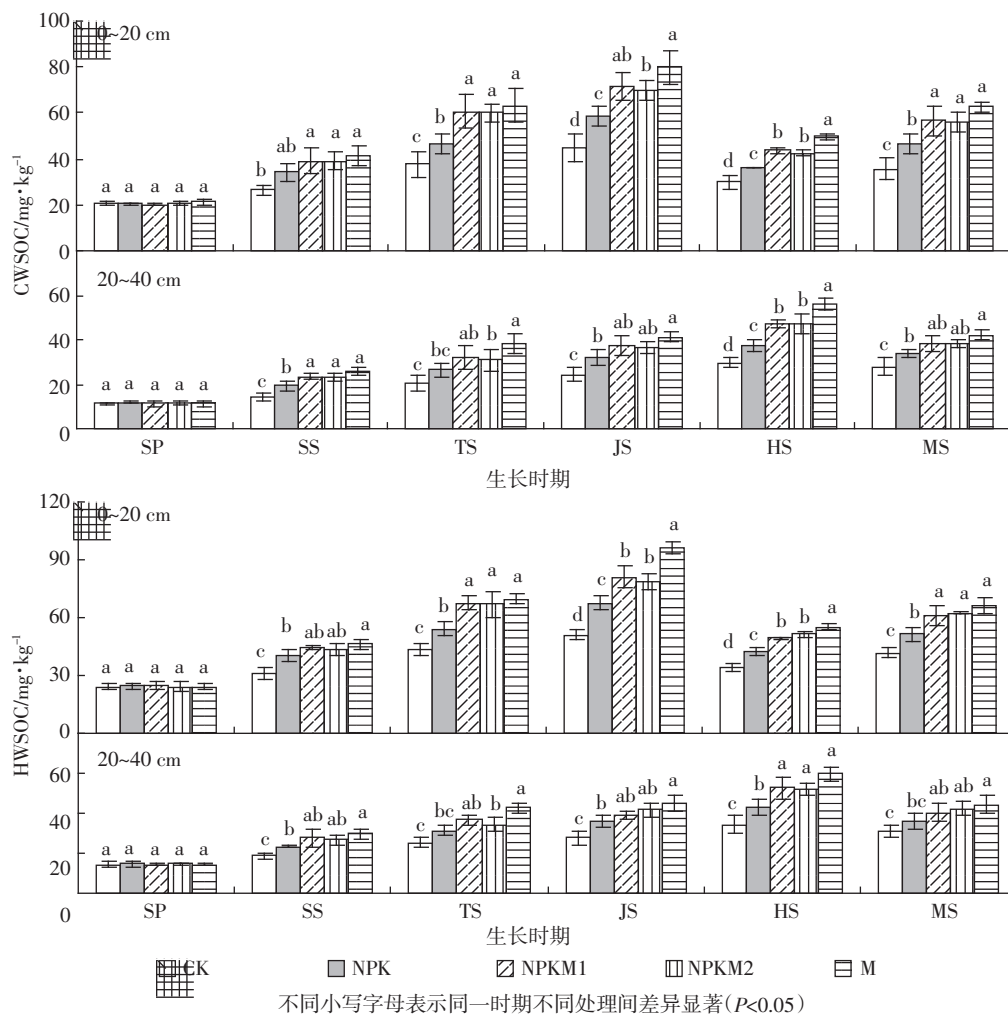


图1 不同施肥处理土壤水溶性有机碳的生育期动态变化

Figure 1 Growth stage dynamic changes of water soluble organic carbon in soil with different fertilization

含量相对表层均明显减小。这与 Angers^[13]、焦坤^[16]等的研究结果相似,可能是由于下层土壤有机物的输入减少所致。

农业管理措施是影响土壤 WSOC 含量的主要因素之一^[17],尤其是表层土壤^[1]。本研究中,小麦收获后,与不施肥相比,化肥处理 0~20 cm 土层 WSOC 含量显著增加,但又显著低于纯有机肥和复混肥处理。可能是因为化肥施用主要促进作物生长,从而使作物根系分泌物和残体凋落物相应增多,但作物代谢产物毕竟有限,因而其 WSOC 的增加不多。相比播种前,鸡粪处理 CWSOC、HWSOC 的增量最高,分别为 41.22、41.92 mg·kg⁻¹,有机无机复混肥处理次之,其原因可能主要有:(1)有机肥的施用增加了土壤有机碳源,在微生物作用下分解释放出更多的水溶性有机碳^[18];(2)有机肥能改善土壤物理结构,提高土壤微生物学特性,进而影响土壤有机碳的生物降解过程^[19-20];(3)

有机肥能改善土壤的速效养分状况,提高土壤肥力,进而促进作物根系和地上部分的生长,从而增加根系分泌物、有机残体等作物归还量^[10,21-22]。此外,随着生育期推移,有机肥处理作物生长最为旺盛,作物归还量也最多;加之随着气温逐渐升高,微生物繁殖增强,有机肥自身含有的有机碳被大量分解^[23-24]。因此,从幼苗期到拔节期,有机肥处理 WSOC 含量与 NPK、CK 处理间的差异在不断增大。至于在拔节期和抽穗期,鸡粪处理 WSOC 含量显著高于有机无机复混肥处理,可能是因为鸡粪用量大,微生物可利用有机碳含量相对较高,微生物分解代谢以及有机质腐解产生的 WSOC 相应较多,因而其 WSOC 含量显著高于 2 个复混肥处理。

此外,整个生育期各处理 0~40 cm 土层 HWSOC 含量为 CWSOC 的 1.05~1.30 倍,这是因为高温可以水解土壤中一些有机结构、溶酶细胞,还能杀死营养

微生物细胞,使微生物组分变成可提取态^[3]。

2.1.2 水溶性有机碳含量的生育期动态变化

由图 1 还可看出,尽管各处理间 WSOC 含量有明显的大小差异,但相同土层不同处理 WSOC 却表现出相同的生育期动态变化特征。其中 0~20 cm 土层各处理 WSOC 含量随着生育期的变化均表现出先增加后减小、然后再增加的变化特征,在拔节期达最大值,在抽穗期却明显下降,CWSOC、HWSOC 的降幅分别达到 33.39%~38.98%、33.09%~42.55%;而 20~40 cm 土层各处理 WSOC 含量则都表现出先增加后减少的变化趋势,其峰值出现在抽穗期。可见,施肥对 WSOC 含量影响较大,但却对 WSOC 的生育期整体变化趋势影响较小。

从幼苗期到拔节期,作物生长逐渐旺盛,作物残落物和根系分泌物随之增加。同时,气温逐渐升高,微生物繁殖能力增强,促进了土壤有机质的分解^[23-24]。因此,WSOC 含量随气温升高呈逐渐增加趋势,这与 Angers^[13]、张金波^[24]等的研究结果相似。但在抽穗期,表层 WSOC 含量明显下降,而下层 WSOC 含量却大幅增加,这大概是由于在抽穗期采样前降雨量较大(图 2),导致表层 WSOC 随雨水淋溶流失或渗透进入深层土壤,使 0~20 cm 层 WSOC 含量减少,而 20~40 cm 土层 WSOC 含量增加。此外,在抽穗期小麦对养分需求量大,而小麦根系主要分布在 0~20 cm 土层,对表层 WSOC 吸收较多,造成 0~20 cm 层 WSOC 含量进一步减少。到成熟期,小麦残落物和根系腐烂也增多,土壤中温度和湿度较高,促进土壤有机质的腐解为碳水化合物、氨基糖等可溶性有机质^[25],因此表层 WSOC 含量有所回升。而 20~40 cm 土层 WSOC 含量略有降低,可能是因为在小麦抽穗期前降水较多,0~20 cm 土层中大量微生物随雨水渗透进入较深土层,分解利用较深土层中的部分 WSOC。

2.2 水溶性有机碳与土壤养分、小麦产量间的关系

相关分析表明(表 1),在成熟期,0~20 cm 土层 TOC 仅与全氮极显著相关,相关系数 R 为 0.812;而 CWSOC、HWSOC 不仅与全氮极显著相关($P<0.01$),且

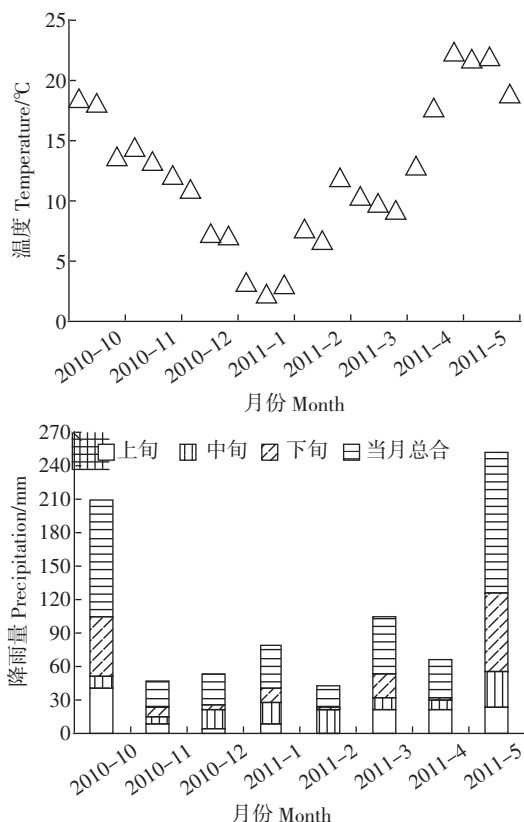


图 2 生长季内气温和降雨变化

Figure 2 Changes of the temperature and precipitation in the growing season

与全磷、速效钾(AK)也达到显著相关($P<0.05$)。此外,尽管各时期表层土壤 CWSOC、HWSOC、TOC 与小麦产量都达到极显著正相关($P<0.01$),但 CWSOC、HWSOC 与小麦产量的相关性却明显高于 TOC 与小麦产量的相关性(图 3)。这表明 CWSOC 和 HWSOC 比 TOC 能更灵敏地反映土壤养分供应状况和生产力水平,能更客观反映土壤质量的变化情况。

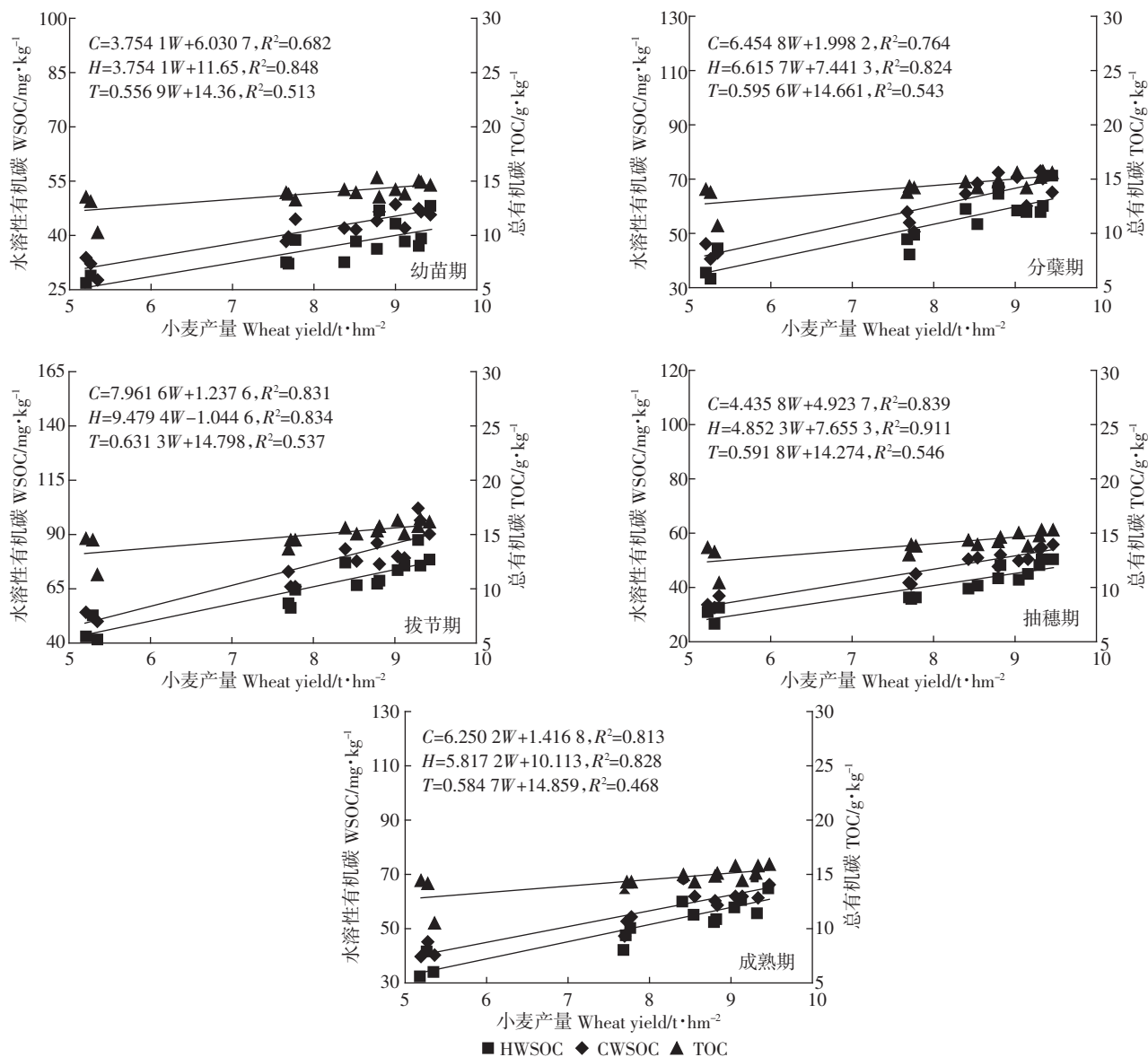
由图 3 还可看出,在抽穗期,CWSOC、HWSOC 与小麦产量的相关系数分别为 0.916、0.955,均高于其他时期。可能是由于在抽穗期小麦正处于孕穗、灌浆阶段,养分需求量大,对土壤养分较为敏感。这或许表明在抽穗期土壤水溶性有机碳能很好地反映小麦对

表 1 成熟期表层土壤水溶性有机碳、总有机碳与土壤养分之间的相关系数(R^2)

Table 1 Correlation coefficient between the topsoil water soluble organic carbon, total organic carbon and soil nutrients at wheat maturing stage(R^2)

	TOC	CWSOC	HWSOC	TN	AP	TP	AK	TK
TOC	—	0.687**	0.693**	0.660**	0.245	0.361	0.249	0.325
CWSOC	0.687**	—	0.982**	0.640**	0.329	0.560*	0.490*	0.391
HWSOC	0.693**	0.982**	—	0.662**	0.328	0.583*	0.505*	0.433

注:* 显著性水平 0.05,** 显著性水平 0.01。



H 表示热水溶性有机碳含量, C 表示冷水溶性有机碳含量, T 表示总有机碳含量, W 表示小麦产量

图3 表层土壤水溶性有机碳、总有机碳与小麦产量间的相关性

Figure 3 The correlation between the topsoil water soluble organic carbon, total organic carbon and wheat yield

土壤养分的需求,如果在抽穗期进行 WSOC 的测定,对指导农业合理培肥可能更具实际意义。

3 结论

(1) 施肥能促进耕层(0~20 cm)土壤 WSOC 的增加,其中化肥处理 WSOC 含量显著高于不施肥处理 ($P < 0.05$),而鸡粪和有机无机复混肥处理则较化肥处理也有显著提高 ($P < 0.05$),且与后者间的差异随着生育期的推移逐渐增大,可见施用有机肥是增加耕层土壤 WSOC 的有效措施。而 20~40 cm 土层土壤 WSOC 含量明显降低,2 个有机无机复混肥与 NPK 处理间 WSOC 的含量差异也不显著 ($P > 0.05$),表明土壤

WSOC 具有明显的剖面分布特征,且施肥对其影响也随土层深度增加在减弱。

(2) WSOC 含量随生育期的动态变化趋势并未因施肥种类不同而改变,但却因土层不同而异。0~20 cm 土层 WSOC 含量在各生育期的大小顺序为:拔节期>分蘖期>成熟期>抽穗期>幼苗期>播种前;20~40 cm 土层 WSOC 含量在各生育期的大小顺序为:抽穗期>成熟期>拔节期>分蘖期>幼苗期>播种前。

(3) 与 TOC 相比,WSOC 与土壤养分、小麦产量间的相关性更高。表明 WSOC 比 TOC 能更灵敏地反映土壤养分供应状况和生产水平,更能客观反映农业管理措施引起的土壤质量变化情况。

参考文献:

- [1] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165:277-304.
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26:88-94.
- [3] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, et al. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the themineral soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37:1-13.
- [4] Andersson S, Nilsson S I, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in morhumus as affected by temperature and pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1-10.
- [5] Shrestha R K, Ladha J K, Lefroy R D B. Carbon management for sustainability of an intensively managed rice-based cropping system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36:215-223.
- [6] 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.
WANG Dong, LI Hui-xin, LI Xiao-hong, et al. Soil labile organic carbon as affected by non-flooded rice cultivation with straw mulching under different tillages[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1):75-83.
- [7] Chantigny M H, Cumin D, Beare M H, et al. Influence of temperature on water-extractable organic matter and ammonium production in mineral soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74:517-524.
- [8] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35:1231-1243.
- [9] Sanjay K G, Julie G L, John M D. Soil organic carbon and nitrogen stocks in Nepal long-term soil fertility experiments[J]. *Soil Tillage and Research*, 2009, 106:95-103.
- [10] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2837-2845.
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10):2837-2845.
- [11] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124:3-22.
- [12] 李成亮, 孔宏敏, 何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6):116-119.
LI Cheng-liang, KONG Hong-min, HE Yuan-qiu. Effect of fertilization structures on soil organic matter and physical properties of upland field in red soil area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6):116-119.
- [13] Angers D A, Chantigny M H, Rochette P, et al. Dynamics of soil water-extractable organic C following application of dairy cattle manures[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006, 86(5):851-858.
- [14] 高忠霞, 周建斌, 王 祥, 等. 不同施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 organic carbon in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1):115-121.
- [15] 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, 2000.
LU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: Agriculture, Science and Technology Press of China, 2000.
- [16] 焦 坤, 李忠佩. 红壤稻田土壤溶解有机碳含量动态及其生物降解特征[J]. 土壤, 2005, 37(3):272-276.
JIAO Kun, LI Zhong-pei. Dynamics and biodegradation of dissolved organic carbon in paddy soils derived from red clay[J]. *Soils*, 2005, 37(3):272-276.
- [17] Chanigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices [J]. *Geoderma*, 2003, 113:357-380.
- [18] Dormaar J F, Liudwall C W, Kozub G C. Effectiveness of manure and commercial fertilizer in restoring productivity of an artificially eroded Dark Broom Chemozem soil under dryland conditions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 68:669-679.
- [19] 肖伟伟, 范晓辉, 杨林章, 等. 长期施肥对黄土旱塬黑垆土有机氮和有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):672-675.
XIAO Wei-wei, FAN Xiao-hui, YANG Lin-zhang, et al. Response of soil organic nitrogen forms and organic carbon to long-term fertilization in dry highland of loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):672-675.
- [20] 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.
- [21] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Pillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66:906-912.
- [22] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3):364-371.
ZHANG Ji-guang, QIN Jiang-tao, YAO Wen-qian, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils[J]. *Soils*, 2010, 42(3):364-371.
- [23] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6):84-87.
XU Qiu-fang, JIANG Pei-kun. Study on active organic carbon of soils under different types of vegetation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6):84-87.
- [24] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10):1397-1402.
ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun, YANG Wen-yan. Seasonal dynamics of dissolved organic carbon and its impact factors in the *Doyeuxia augustifolia* marsh soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(10):1397-1402.
- [25] 周江敏, 陈华林, 唐东民, 等. 秸秆施用后土壤溶解性有机质的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4):678-684.
ZHOU Jiang-min, CHEN Hua-lin, TANG Dong-min, et al. Dynamic changes of dissolved organic matter in the soils amended with rice straw [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4):678-684.