

不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响

王旭东¹ 张霞¹ 王彦丽¹ 李军²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:以黄土高原黑垆土 8 年(2008—2015 年)的不同耕作定位试验为对象,研究了在秸秆还田条件下 3 种连年单一耕作(翻耕(CC)、免耕(NN)、深松(SS))和 3 种轮耕措施(免耕-深松(NS)、深松-翻耕(SC)、翻耕-免耕(CN))对农田土壤有机碳库、玉米产量和秸秆还田后表观腐殖化系数的影响。结果表明:与翻耕相比,深松、免耕和轮耕措施主要增加了 0~10 cm 表层土壤有机碳(SOC)、微生物量碳(MBC)、水溶性碳(WSOC)的含量和储量,且提高了 MBC/SOC 和 WSOC/SOC 质量比。在 0~10 cm 表层土壤中,各耕作处理间难氧化有机碳(HOC)含量无明显差异,但深松、免耕和轮耕措施分别增加了 10~20 cm、35~50 cm 和 20~35 cm 土层的 HOC/SOC 质量比;免耕处理显著增加了 0~50 cm 土层的 HOC 总储量。与翻耕处理相比,深松、免耕和轮耕处理提高了玉米产量和玉米秸秆量,其中 NS 处理增加幅度最大,分别达到 13.79%(籽粒)和 12.04%(秸秆);进行 8 年玉米秸秆还田,在翻耕措施下其表观腐殖化系数为 8.94%,免耕、深松和轮耕措施提高了还田玉米秸秆的表观腐殖化系数,其中 NS 处理达到 14.09%,显著高于翻耕处理。从土壤碳库和玉米产量角度考虑,免耕与深松相结合的轮耕措施是适合当地土壤条件的耕作模式。

关键词:黑垆土;耕作方式;有机碳库构成;表观腐殖化系数

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2017)11-0229-09

Effects of Different Tillage Methods on Soil Organic Carbon Pool Composition in Dark Loessial Soil on Loess Plateau

WANG Xudong¹ ZHANG Xia¹ WANG Yanli¹ LI Jun²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To investigate the effect of different tillage methods on soil organic carbon pool, straw returning apparent humification coefficient and maize yield, an eight-year(2008—2015) field experiment with six tillage measures under straw returning in dark loessial soil on Loess Plateau was conducted. The tillage measures included three single continuous tillages (no-tillage (NN), subsoiling (SS) and conventional tillage (CC)), and three rotational tillages (no-tillage-subsoiling (NS), subsoiling-conventional tillage (SC) and conventional tillage-no-tillage (CN)). The results showed that compared with the conventional tillage, the measures of NN, SS and rotational tillage increased the content of soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), water-soluble organic carbon (WSOC) in 0~10 cm soil layer, improved the ratios of MBC to SOC and WSOC to SOC. Although there was no significant difference in the hardly oxidized carbon (HOC) content for different treatments in 0~10 cm soil layer, the ratio of HOC to SOC was increased by SS, NN and rotational tillage in the soil layer of 10~20 cm, 35~50 cm and 20~35 cm, respectively. The store of HOC was increased significantly in the NN treatment in 0~50 cm soil layer. Compared with conventional tillage, the yield of corn and the dry mass of corn straw were increased in the treatments of SS, NN and rotational tillage, the maximum increment was found to be in the treatment of NS, by 13.79% for grain yield and 12.04% for straw dry mass, respectively. After eight-year straw returning, the apparent humification coefficient of straw in conventional tillage treatment was 8.94%, which was lower than those in the treatments of NN, SS and rotational tillage. The apparent humification coefficient of returning straw was 14.09% in the NS treatment, which was the highest among all the treatments. Based on soil carbon pool and corn yield, the tillage of NS was the most suitable measure for the local soil conditions.

Key words: dark loessial soil; tillage practices; organic carbon pool composition; apparent humification coefficient

引言

土壤有机碳既是土壤肥力的重要指标,直接关系到土壤质量和作物生长,又是大气中 CO₂ 的源和汇,影响全球碳循环和气候变化^[1-3]。在农田生态系统中,耕作是促进土壤有机碳矿化的重要人为因素,其强度和频率影响土壤有机碳库的周转速率,从而影响有机碳含量^[4]。研究表明,以少耕、免耕和秸秆还田为主要模式的保护性耕作对提高土壤碳库水平、减少温室气体排放等有重要的作用^[5-7]。耕作不仅影响土壤有机碳含量,还影响其组成。王丹丹等^[8]在研究耕作方式与秸秆还田对土壤活性有机碳组分的影响中发现,与翻耕相比,免耕能显著提高活性有机碳(水溶性、微生物量、易氧化有机碳等)的含量。宋明伟等^[9]研究表明,免耕结合秸秆覆盖能有效提高微生物量碳的含量。吕瑞珍等^[10]研究了深松等方式对土壤有机碳的影响,与翻耕相比,深松结合秸秆覆盖能提高 0~40 cm 土壤总有机碳和活性有机碳含量,且能够显著提高耕层活性有机碳占总有机碳比率。但也有一些研究认为,免耕、浅耕等措施虽能提高土壤有机质含量,但只局限于表层,而对深层土壤有机质含量影响不大^[11-12],陈学文等^[13]研究发现,免耕虽然使 0~5 cm 表层土壤中的有机碳含量显著提高,但在下层含量有所下降,0~30 cm 土层整体表现并没有增加土壤有机碳储量。不同耕作方式下作物生长状况有差异^[14-16],导致作物秸秆和根茬量的不同,秸秆就地还田量的不同可能也是引起土壤有机质含量差异的另外一个原因。

在黄土高原一年一熟的种植区,目前存在翻耕、免耕、深松等多种耕作方式,或者进行年际间耕作的变化(轮耕)。不同耕作措施下的有机碳含量、储量及其组成变化虽然有一定研究报道^[17-18],但缺乏系统性;而有些研究因存在土壤类型、质地以及不同区域小气候的差异,缺乏可比性。因此,需要在同一地区、同一种土壤上开展定位试验,进行系统研究。另外,秸秆还田在同一块农田不同耕作方式下的表观腐殖化系数的差异性也值得研究。基于此,本文以陕西渭北高原不同耕作(翻耕、免耕、深松或两两相互配合的轮耕)长期定位试验(2007 年开始)为对象,研究秸秆还田条件下不同耕作方式对土壤有机碳库及组成在土壤各层次分配比例的影响,探讨秸秆还田在不同耕作方式下的表观腐殖化系数差异,以期为农田土壤碳库调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

不同耕作长期定位试验位于陕西省渭南市合阳县甘井镇,属于黄土高原渭北旱塬沟壑的暖温带半湿润偏旱区,海拔高度 850 m,年平均气温 10℃左右,年平均降水量 520 mm 左右,试验地土壤为黑垆土,属于中壤土,质地疏松。试验前土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 2007 年试验开始前供试土壤理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of tested soil before beginning of experiment in 2007

土层深度/cm	有机碳质量比/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)
0~10	7.4	1.35
10~20	7.2	1.35
20~35	5.8	1.48
35~50	4.3	1.45

1.2 试验设计

于 2008 年开始进行春玉米连作定位试验,试验共设置 6 种耕作处理:免耕-深松(NS)、深松-翻耕(SC)、翻耕-免耕(CN)、连年免耕(NN)、连年深松(SS)、连年翻耕(CC)。免耕(N)是指在玉米收获后全部秸秆粉碎覆盖地表,无其他措施,保持秸秆覆盖地表越过冬闲期;深松(S)即在玉米收获后全部秸秆粉碎覆盖地表,利用深松机进行耕作,深度为 30~35 cm,深松铲间距为 50 cm,保持秸秆覆盖地表越过冬闲期;翻耕(CC)即在玉米收获后全部秸秆粉碎覆盖地表,用犁铧全面深翻 20~25 cm,且秸秆全部翻埋,地表裸露越过冬闲期。2007—2015 年土壤耕作顺序如表 2 所示。

试验田种植制度为春玉米一年一熟制。小区面积 112.5 m²(5 m×22.5 m),每种耕作处理设 3 个重复,共 18 个小区。供试春玉米品种为郑单 958,播种量为 37.5 kg/hm²,不同处理间的种植密度和施肥状况均一致。春玉米播种时间为 4 月下旬,9 月下旬收获。播种时尿素、磷酸二铵和氯化钾作为基肥,N 施用量为 75 kg/hm²,P₂O₅施用量为 120 kg/hm²,K₂O 施用量为 90 kg/hm²;大喇叭口期只追施尿素,用量与基肥一致,试验期间田间管理措施与当地大田管理一致。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样品采集和有机碳及其组分的测定

于 2015 年玉米收获后采集各土层(0~10 cm、10~20 cm、20~35 cm、35~50 cm)土样,拣出土样中的石砾和植物残根后过 2 mm 筛,将土样分为 2 份,一份鲜样密封冷藏保存,一份放于通风处自然风干。

表 2 2007—2015 年土壤耕作次序
Tab.2 Sequence of soil tillage systems from 2007 to 2015

耕作处理	试验前 (2007 年)	试验年度							
		2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
NS	C	N	S	N	S	N	S	N	S
SC	C	S	C	S	C	S	C	S	C
CN	C	C	N	C	N	C	N	C	N
NN	C	N	N	N	N	N	N	N	N
SS	C	S	S	S	S	S	S	S	S
CC	C	C	C	C	C	C	C	C	C

土壤总有机碳用重铬酸钾-外加热法测定^[19]；微生物量碳用氯仿熏蒸浸提法测定^[20]；水溶性碳的测定参照去离子水浸提法^[21]；难氧化有机碳含量为总有机碳含量与易氧化有机碳含量的差值，易氧化有机碳的测定参考袁可能^[22]提出的 K₂Cr₂O₇ 氧化法。

有机碳储量计算公式为

$$S_{oc_s}=0.1C_iP_iT_i \tag{1}$$

式中 S_{oc_s} ——某一土层土壤有机碳储量,t/hm²
 C_i ——第 i 层土壤的有机碳含量,g/kg
 P_i ——第 i 层土壤容重,g/cm³
 T_i ——第 i 层土壤厚度,cm

1.3.2 玉米产量和秸秆生物量的测定

在玉米成熟时每小区沿对角线方向选取长势均匀的 3 行,每行取 20 株玉米测籽粒产量、秸秆的生物量(质量),并将秸秆干燥粉碎,用重铬酸钾-外加热法测秸秆含碳量。

玉米秸秆碳质量计算公式为

$$O_{c_{cs}}=D_{m_{cs}}O_{c_s} \tag{2}$$

式中 $O_{c_{cs}}$ ——玉米秸秆碳质量,g
 $D_{m_{cs}}$ ——秸秆生物量,kg
 O_{c_s} ——秸秆含碳量,g/kg

表观腐殖化系数计算公式为

$$A_{hc}=\frac{S_{oc_{s1}}-S_{oc_{s2}}}{O_{c_{scs}}}\times 100\% \tag{3}$$

式中 $S_{oc_{s1}}$ ——试验后 0~50 cm 土层土壤碳储量,t/hm²
 $S_{oc_{s2}}$ ——试验前 0~50 cm 土层土壤碳储量,t/hm²
 $O_{c_{scs}}$ ——试验期间(8 年)投入的秸秆碳总量,t/hm²

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2007 进行相关数据的计算与处理,并作图。用 SAS 8.0 软件进行相关性分析和单因素方差分析,显著性检验为 Duncan 新复极差法($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤有机碳含量及储量变化

2.1.1 土壤有机碳含量变化

不同耕作方式下土壤剖面(0~50 cm)有机碳含量(SOC)如图 1 所示。在表层(0~10 cm),不同耕作处理的土壤有机碳含量(质量比)由高到低顺序为:NS、NN、SS、CN、SC、CC,与 CC 处理相比,其他耕作处理 SOC 含量均有所增加,其中 NS、CN、NN 和 SS 处理增加显著。随着土层加深,各耕作处理 SOC 含量下降,其中 3 种单一耕作处理(即 SS、NN 和 CC)下降了 47.86%~58.71%,而 3 种轮耕处理(即 CN、SC 和 NS)的下降幅度相对较小,为 27.54%~39.12%。在 10~20 cm 土层,与 CC 处理相比,NN 和 SS 处理的 SOC 含量显著减少,NS 和 CN 处理显著增加,SC 处理无明显变化。在 20~35 cm 土层,与 CC 处理相比,NS、SC 和 CN 处理的 SOC 含量显著增加,NN 和 SS 处理则显著减少。在 35~50 cm 土层,除 NN 处理以外,其他耕作处理的 SOC 含量均比 CC 处理显著增加。

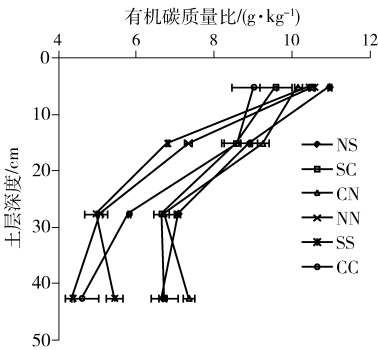


图 1 各土层有机碳含量的变化

Fig.1 Changes of soil organic carbon content in different soil layers

2.1.2 土壤有机碳储量变化

从 0~50 cm 土层有机碳的总储量来看(表 3),与 CC 处理相比,无论是单一的深松(SS)、免耕(NN)处理,还是轮耕(NS、SC、CN)处理,土壤有机碳储量均显著增加,其中以 NS、NN 处理增加幅度相

对较大,分别达到4.6%、3.43%。但在不同层次土壤中,与CC处理相比,各处理有机碳的储量变化不同。在0~10 cm表层土壤,不同耕作处理有机碳储量由高到低顺序为:NN、NS、SS、CN、SC、CC,与CC处理相比,NN、NS、SS和CN处理增加幅度为14.01%~45.55%,差异达到显著水平,表现出增加现象。而在10~20 cm、20~35 cm土层,均以CC处理的有机碳储量最高,其他处理则表现出降低趋势,其中,10~20 cm土层的SS处理以及20~35 cm土层的CN、NS、NN和SS处理,减少达到显著水平。在35~50 cm土层,与CC处理相比,CN和SS处理的SOC储量显著增加,其他处理无显著差异。

表 3 土壤有机碳储量

Tab.3 Soil organic carbon storage t/hm²

土层 深度/cm	NS	SC	CN	NN	SS	CC
0~10	14.51 ^b	11.67 ^d	12.94 ^c	16.52 ^a	14.14 ^b	11.35 ^d
10~20	11.90 ^a	11.78 ^a	11.96 ^a	11.92 ^a	10.88 ^b	12.22 ^a
20~35	12.13 ^b	13.39 ^a	11.92 ^b	11.39 ^b	11.77 ^b	13.60 ^a
35~50	11.67 ^{ab}	12.09 ^{ab}	12.59 ^a	9.82 ^c	12.49 ^a	10.84 ^{bc}
总和	50.21 ^a	48.93 ^c	49.41 ^{bc}	49.65 ^{ab}	49.28 ^{bc}	48.01 ^d

注:同行不同小写字母表示同一土层不同耕作处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.2 耕作方式对土壤有机碳组分含量的影响

2.2.1 土壤活性有机碳含量变化

微生物量碳(MBC)和水溶性有机碳(WSOC)是土壤有机碳的活性成分。土壤MBC含量(质量比)随着土层的加深呈明显的下降趋势(图2)。不同耕作措施下引起土壤不同层次微生物量碳的变化有一定差异。在0~10 cm表层土壤,MBC含量由大到小顺序是:NN、NS、SS、CN、SC、CC,其他耕作处理均显著高于CC处理,表现出增加现象。在10~20 cm和20~35 cm土层,与处理CC相比,SC和CN处理的MBC含量显著增加;NS处理虽有增加,差异不显著;NN和SS处理显著减少;在35~50 cm土层中,除NN处理的MBC含量比处理CC显著减少外,其他耕作处理均显著增加。说明在表层(0~10 cm)以下,单一的深松或免耕措施容易引起微生物碳的下降。不同耕作处理间土壤WSOC含量(质量比)变化以及随着土层深度的变化趋势基本与MBC含量变化趋势保持一致,只是在10~20 cm、20~35 cm土层,NS处理增加幅度加大,达到显著水平。

2.2.2 土壤难氧化有机碳(HOC)含量变化

不同耕作措施下土壤难氧化有机碳(HOC)的变化如图4所示,在0~10 cm土壤中,各耕作处理的HOC含量(质量比)无明显差异。在10~20 cm土层,与CC处理相比,NS和CN处理的HOC含量

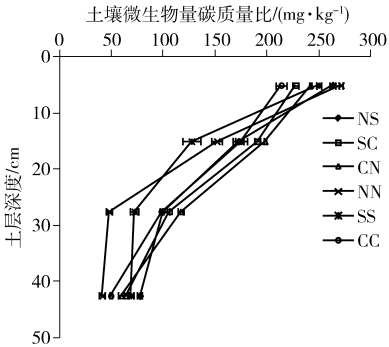


图 2 各土层微生物量碳含量的变化

Fig.2 Changes of soil MBC content in different soil layers

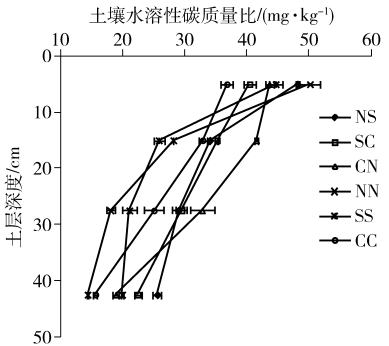


图 3 各土层水溶性碳含量的变化

Fig.3 Changes of soil WSOC content in different soil layers

显著增加,SC、NN和SS处理则略有减少;在20~30 cm和35~50 cm土层,与CC处理相比,多数处理(除SS处理外)的HOC含量均有所增加,且差异达到显著水平。总体看来,随着土层的加深,HOC含量呈下降趋势;不同耕作之间引起的HOC含量差异有增大趋势,且多数处理比对照低。

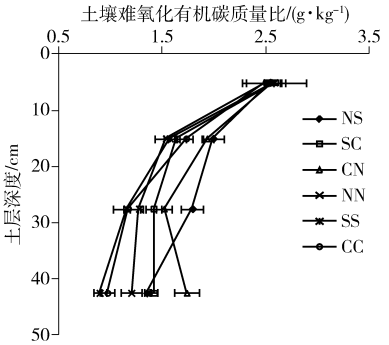


图 4 各土层难氧化有机碳含量的变化

Fig.4 Changes of soil HOC content in different soil layers

2.2.3 耕作方式对土壤有机碳组分占总有机碳比例的影响

土壤的MBC/SOC质量比随着土层的加深呈逐渐减小趋势(表4)。在0~10 cm土层,与处理CC相比,NN处理的MBC/SOC质量比显著增加,其他处理也有增加,但差异不显著;MBC/SOC质量比总体表现出增加的趋势。在10~20 cm土层,不同耕作处理的MBC/SOC质量比由高到低顺序为:SC、CN、NN、CC、NS、SS,与CC处理相比,SC和CN处理

表 4 土壤各有机碳组分占总有机碳的质量比

Tab.4 Proportions of SOC fraction contentsto total SOC

土层深度/ cm	耕作 处理	MBC 与 SOC 质量比/%	WSOC 与 SOC 质量比/%	HOC 与 SOC 质量比/%
0 ~ 10	NS	2. 41 ^{Ab}	0. 44 ^{Ab}	23. 22 ^{ABbc}
	SC	2. 38 ^{Ab}	0. 42 ^{Bcd}	27. 08 ^{Aab}
	CN	2. 39 ^{Ab}	0. 430 ^{Che}	25. 32 ^{Aabc}
	NN	2. 57 ^{Aa}	0. 475 ^{Aa}	21. 83 ^{Bc}
	SS	2. 40 ^{Ab}	0. 428 ^{Abc}	24. 77 ^{Aabc}
	CC	2. 37 ^{Ab}	0. 408 ^{Ad}	27. 72 ^{Aa}
10 ~ 20	NS	1. 94 ^{Bd}	0. 383 ^{Cc}	22. 41 ^{BCab}
	SC	2. 23 ^{Ba}	0. 411 ^{Bb}	19. 18 ^{Bc}
	CN	2. 14 ^{Bb}	0. 450 ^{Ba}	20. 91 ^{Babc}
	NN	2. 07 ^{Bc}	0. 384 ^{Bc}	20. 97 ^{Babc}
	SS	1. 87 ^{Be}	0. 380 ^{Bc}	23. 12 ^{Aa}
	CC	2. 03 ^{Bc}	0. 382 ^{Bc}	20. 13 ^{Bbc}
20 ~ 35	NS	1. 40 ^{Cc}	0. 409 ^{Bd}	25. 34 ^{Aa}
	SC	1. 59 ^{Cb}	0. 443 ^{Ab}	21. 31 ^{Bb}
	CN	1. 74 ^{Ca}	0. 489 ^{Aa}	22. 63 ^{ABab}
	NN	0. 94 ^{Cd}	0. 355 ^{Cc}	25. 15 ^{ABa}
	SS	1. 46 ^{Cc}	0. 425 ^{Acd}	23. 31 ^{Aab}
	CC	1. 69 ^{Ca}	0. 431 ^{Abc}	20. 16 ^{Bb}
35 ~ 50	NS	1. 16 ^{Db}	0. 383 ^{Ca}	20. 27 ^{Cb}
	SC	0. 98 ^{Dd}	0. 334 ^{Cc}	21. 18 ^{Bb}
	CN	0. 81 ^{De}	0. 257 ^{Dd}	23. 64 ^{ABb}
	NN	0. 95 ^{Cd}	0. 328 ^{Dc}	27. 52 ^{Aa}
	SS	1. 27 ^{Da}	0. 366 ^{Bc}	16. 48 ^{Bc}
	CC	1. 08 ^{Dc}	0. 339 ^{Cb}	21. 11 ^{Bb}

注：同列不同小写字母表示相同土层不同耕作处理之间差异显著($P < 0.05$)，同列不同大写字母表示相同耕作处理不同深度土层间差异显著($P < 0.05$)，下同。

的 MBC/SOC 质量比显著增大,NS 和 SS 处理显著减小,NN 处理无显著差异。在 20 ~ 35 cm 土层,与 CC 处理相比,其他耕作处理的 MBC/SOC 质量比呈现减小趋势(CN 处理比 CC 处理略有增加,但差异不显著);在 35 ~ 50 cm 土层,与处理 CC 相比,NS 和 SS 处理的 MBC/SOC 质量比显著增加,SC、CN 和 NN 处理则显著减小。总体来看,免耕处理(NN)主要提高表层 0 ~ 10 cm 土壤的 MBC/SOC 质量比,免耕与翻耕结合(CN)或者深松与翻耕结合(SC)则可以提高 10 ~ 20 cm 土层 MBC/SOC 质量比。

土壤 WSOC/SOC 质量比变化(表 4)显示,与 CC 处理相比,在 0 ~ 10 cm 表层,NS、CN、NN 和 SS 处理显著增加了 WSOC/SOC 质量比;在 10 ~ 20 cm、20 ~ 35 cm 土层,SC 和 CN 处理的 WSOC/SOC 质量比显著增加,其他处理无明显增加甚至略有降低;在 35 ~ 50 cm 土层,除 NS 处理外,其他耕作处理的 WSOC/SOC 质量比均比 CC 处理显著减小。随着土层的加深,各耕作处理的 WSOC/SOC 质量比以 35 ~ 50 cm 土层相对最低。总体来看,免耕(NN)、

深松(SS)措施主要提高了 0 ~ 10 cm 表层土壤的 WSOC/SOC 质量比,而轮耕措施(NS、CN)不仅可以提高表层土壤的 WSOC/SOC 质量比,还可以提高 10 ~ 35 cm 土层的 WSOC/SOC 质量比(NS 处理)。

表 4 中 HOC/SOC 质量比变化显示,在 0 ~ 10 cm 表层,CC 处理的 HOC/SOC 质量比最大,其他处理均小于 CC 处理,其中 NS 和 NN 处理达到差异显著水平;在 10 ~ 20 cm 土层,与 CC 处理相比,SS 处理的 HOC/SOC 质量比显著增加,其他处理无明显差异;在 20 ~ 35 cm 土层,NS 处理的 HOC/SOC 质量比比 CC 处理显著增加,其他处理无明显差异;在 35 ~ 50 cm 土层,与 CC 处理相比,NN 处理的 HOC/SOC 质量比显著增加,SS 处理的显著减小。总体来看,与传统翻耕相比,免耕、深松以及轮耕在 0 ~ 10 cm 表层一定程度降低了 HOC/SOC 质量比,但 NS、NN 处理 10 cm 以下土层的 HOC/SOC 质量比有一定增加。

2.3 不同耕作方式下土壤各有机碳组分的储量变化

对于不同层次土壤,各处理对 MBC 储量的影响不同(表 5)。与 CC 处理相比,在 0 ~ 10 cm 表层土壤,各处理均显著增加了 MBC 储量,由大到小顺序为:NN、NS、SS、CN、SC、CC;在 10 ~ 20 cm 土层,SC 和 CN 处理的 MBC 储量显著增加,其他处理则有所减少。在 20 ~ 35 cm 土层,各耕作处理的 MBC 储量均比处理 CC 显著减少;在 35 ~ 50 cm 土层,NS 和 SS 处理的 MBC 储量显著增加,其他处理则有所减少。总体来看,免耕、深松以及轮耕处理主要增加了表层储量,降低了 20 ~ 35 cm 土层微生物碳的储量。从 0 ~ 50 cm 土层 MBC 的总储量看出,与 CC 处理相比,其他耕作处理均有不同程度增加,其中 NS 处理的增加幅度达到显著水平。

同样,不同处理对 0 ~ 50 cm 土层 WSOC 总储量的影响与对 MBC 总储量的影响一致,也以 NS 处理的增加幅度最大(表 5)。与 CC 处理相比,在 0 ~ 10 cm 表层,各处理均显著增加了 WSOC 储量,其中 NN 处理增加幅度最大;在 10 ~ 20 cm 土层,CN 处理的 WSOC 储量显著增加,NS 处理显著下降,其他处理无显著差异。在 20 ~ 35 cm 土层,其他处理的 WSOC 储量均比 CC 处理有所减少。在 35 ~ 50 cm 土层,与 CC 处理相比,NS、SC 和 SS 处理的 WSOC 储量显著增加,CN 和 NN 处理则显著减少。

从 0 ~ 50 cm 土层的 HOC 总储量上看,与 CC 处理相比,NN 处理显著增加了 HOC 总储量,其他耕作处理虽有增加,但差异不显著。在 0 ~ 10 cm 土壤表层,各耕作处理间的 HOC 储量无明显差异。在 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 35 cm 土层,各处理与 CC 处理的

差异不显著;在 35 ~ 50 cm 土层,与 CC 处理相比,CN 和 NN 处理的 HOC 储量显著增加,其他处理无明显差异。

表 5 土壤各有机碳组分的储量

Tab. 5 SOC fractions storage		kg/hm ²		
土层深度/ cm	耕作处理	MBC 储量	WSOC 储量	HOC 储量
0 ~ 10	NS	348.95 ^b	63.85 ^b	3 368.45 ^b
	SC	277.42 ^c	49.32 ^c	3 159.59 ^b
	CN	308.77 ^d	55.69 ^d	3 277.21 ^b
	NN	424.11 ^a	78.46 ^a	3 919.07 ^a
	SS	338.79 ^c	60.57 ^c	3 501.71 ^{ab}
	CC	269.15 ^f	46.35 ^f	3 145.50 ^b
10 ~ 20	NS	230.90 ^d	45.60 ^c	2 667.08 ^a
	SC	262.50 ^a	48.45 ^b	2 258.73 ^b
	CN	256.34 ^b	53.75 ^a	2 500.19 ^{ab}
	NN	247.00 ^c	45.81 ^c	2 499.82 ^{ab}
	SS	203.67 ^e	41.31 ^d	2 515.38 ^{ab}
	CC	248.07 ^c	46.71 ^{bc}	2 459.85 ^{ab}
20 ~ 35	NS	170.32 ^c	49.67 ^b	3 074.00 ^a
	SC	213.27 ^b	59.38 ^a	2 853.84 ^a
	CN	207.43 ^b	58.34 ^a	2 697.54 ^a
	NN	107.37 ^d	40.46 ^c	2 865.59 ^a
	SS	171.68 ^c	49.98 ^b	2 743.64 ^a
	CC	229.66 ^a	58.57 ^a	2 740.64 ^a
35 ~ 50	NS	135.70 ^b	44.75 ^a	2 366.50 ^{bcd}
	SC	115.86 ^c	40.37 ^b	2 560.77 ^{bc}
	CN	102.06 ^d	32.35 ^d	2 975.96 ^a
	NN	92.85 ^e	32.23 ^d	2 702.7 ^{ab}
	SS	158.18 ^a	45.73 ^a	2 058.33 ^d
	CC	116.73 ^c	36.75 ^c	2 288.48 ^{cd}
0 ~ 50	NS	885.86 ^a	203.87 ^a	11 476.02 ^{ab}
	SC	869.06 ^{ab}	197.52 ^b	10 832.93 ^b
	CN	874.59 ^{ab}	200.14 ^{ab}	11 450.89 ^{ab}
	NN	871.33 ^{ab}	196.95 ^b	11 987.19 ^a
	SS	872.32 ^{ab}	197.59 ^b	10 819.06 ^b
	CC	863.60 ^b	188.38 ^c	10 634.47 ^b

2.4 不同耕作方式下玉米产量和秸秆腐殖化系数

图 5 显示了耕作方式对 7 年(2008—2014 年)玉米平均产量和秸秆生物量的影响。玉米平均产量和秸秆生物量由高到低顺序均为: NS、CN、SC、NN、SS、CC。与 CC 处理相比,各处理均增加且差异达到显著水平,其中以 NS 处理的增加幅度最大,籽粒产量和秸秆生物量分别增加了 12.04% 和 13.79%。

以 8 年不同处理土壤有机碳储量的增加量(与试验前相比)和秸秆还田总碳为依据,计算秸秆碳的表观腐殖化系数(图 6)。结果显示,各耕作处理玉米秸秆还田碳的表观腐殖化系数均显著高于 CC 处理,由大到小顺序为: NS、NN、CN、SS、SC、CC,平均为 12.20%。3 种单一耕作间相比,表观腐殖化系

数由大到小顺序为: NS、SS、CC; 3 种轮耕之间相比,由大到小顺序为: NS、CN、SC; 说明免耕(NN)、少耕(SS)或者轮耕(NS、CN 和 SC)均有利于提高腐殖化系数,其中以 NS 处理最高。NS、NN、CN、SS 4 个处理之间表观腐殖化系数差异不显著。

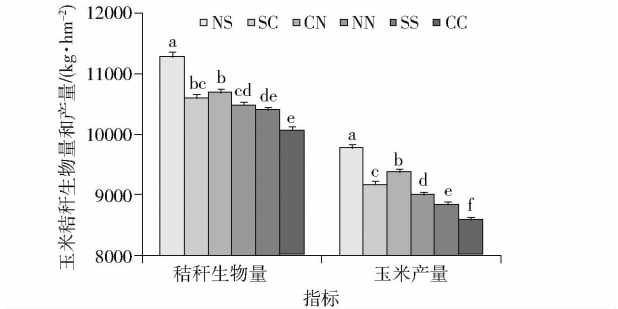


图 5 2008—2014 年平均秸秆生物量和玉米平均产量
Fig. 5 Average dry mass of maize straw and average yield of maize in 2008—2014

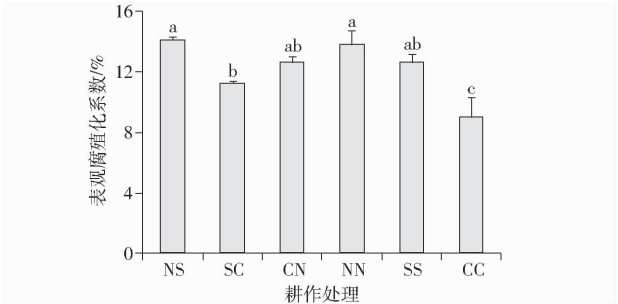


图 6 耕作对玉米秸秆碳的表观腐殖化系数的影响
Fig. 6 Effect of tillage treatment on apparent humification coefficient of maize straw carbon

相关分析(表 6)表明, SOC、MBC、WSOC 的储量与玉米秸秆还田量呈显著正相关; 玉米产量与 SOC、MBC、WSOC 储量呈显著正相关; MBC、WSOC、HOC 储量与 SOC 储量呈显著正相关。

3 讨论

3.1 耕作对土壤碳库及其构成的影响

农田土壤有机碳(SOC)主要来源于土壤微生物、作物根系分泌物、枯枝落叶以及收获后留下的根茬、秸秆等残留物^[23]。土壤有机碳按其活性分为活性有机碳和惰性有机碳,其中活性有机碳组分主要包括 MBC、WSOC 和颗粒有机碳等组分^[24]; 惰性有机碳组分主要指一些抗氧化性高的组分,如难氧化木质素类以及腐殖物质类高分子聚合物等^[25]。比较各耕作处理有机碳(SOC)含量和组成(MBC、WSOC、HOC)发现,土壤 SOC、MBC 和 WSOC 含量受耕作方式影响较大,而 HOC 含量受影响较小。在秸秆还田条件下,与连年翻耕相比,连年免耕措施下秸秆覆盖于地表,增加了 0 ~ 10 cm 表层土壤有机物质输入,因此引起表层土壤的 SOC、MBC、WSOC 含量

表 6 各因子之间的相关系数

Tab.6 Correlation coefficient between different factors

项目	SOC 储量	MBC 储量	WSOC 储量	难氧化有机碳 储量	2008—2014 年 平均玉米产量	2008—2014 年 平均玉米秸秆量
SOC 储量	1					
MBC 储量	0.903 *	1				
WSOC 储量	0.927 **	0.909 *	1			
难氧化有机碳储量	0.814 *	0.632	0.655	1		
2008—2014 年平均玉米产量	0.813 *	0.906 *	0.911 *	0.642	1	
2008—2014 年平均玉米秸秆量	0.816 *	0.942 **	0.898 *	0.552	0.977 **	1

注：* 表示显著性相关($p < 0.05$)，**表示极显著性相关($p < 0.01$)。

增加,但减弱对耕层土壤的上下扰动,降低了 10 cm 以下土层的 SOC、MBC、WSOC 含量,出现了有机质的表聚现象,这与陈文超等^[26]得到的现象一致。连年深松不仅可以增加土壤表层 SOC 含量,而且还提高了 35 ~ 50 cm 土层的 SOC 含量。这是因为在土壤局部深松的方式下,秸秆仍然主要覆盖于土壤表层,从而促进了土壤表层有机碳增加,而且深松的深度为 30 ~ 35 cm,打破了土壤的犁底层,促进了玉米根系向较深层次的发育,玉米收获后留下的根茬量较多,又提高了深层土壤有机碳含量。将免耕、深松、翻耕三者之间两两结合进行年际间的轮耕,既可以减少翻耕引起的有机碳的矿化损失,又可避免因长期免耕导致有机碳的表聚问题。因此与连年翻耕相比,轮耕处理各土层 SOC、MBC 和 WSOC 含量基本上都增加,恰恰是发挥了各自在土壤有机碳调控方面的正效应。

比较各耕作处理对土壤 SOC 及其组分储量的影响时发现,总体上来看,与连年翻耕相比,轮耕、免耕、深松都增加 0 ~ 50 cm 土层 SOC、MBC、WSOC 和 HOC 的总储量,这说明在秸秆还田条件下,免耕、深松和轮耕比翻耕能更好地提高土壤固碳能力。但 SOC 储量在 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 35 cm 2 个土层,尤其是 20 ~ 35 cm 土层出现下降现象。这与其含量变化不相同,是由于土壤容重变小所致。耕作方式不但会影响土壤的有机碳含量的变化,还会改变土壤容重^[27],而储量是由含量和土壤容重决定的,因此有机碳含量的增加,不一定能引起有机碳储量的增加。

在相关性研究中发现,不论是土壤活性有机碳储量(MBC、WSOC 储量)、还是惰性有机碳储量(HOC 储量)都与 SOC 储量呈显著正相关(表 6)。这说明土壤有机碳总量提高,其活性组分和惰性组分也相应得到提高。土壤 SOC 储量、MBC 储量、WSOC 储量与玉米秸秆还田量呈显著正相关性,这表明秸秆还田量也是引起土壤碳库变化的主要因素,且其主要影响土壤有机碳及其活性组分的含量,

而对土壤有机碳的惰性组分无显著作用,两者之间不相关(表 6)。

土壤有机碳各组分占总有机碳的比例可以揭示土壤有机碳库构成,反映土壤碳库数量和质量变化。在秸秆还田条件下,与连年翻耕相比,连年免耕处理和轮耕(NS、SC 和 CN)处理使 MBC/SOC 和 WSOC/SOC 质量比在表层显著增加,HOC/SOC 质量比分别在 35 ~ 50 cm 和 20 ~ 35 cm 土层有所增加,这表明连年免耕和轮耕一方面使表层土壤有机碳的活性组分相对增多,这与表层土壤残留有较多的作物秸秆有关,秸秆在分解过程中增加了活性有机碳组分(翻耕措施不仅使秸秆直接翻埋于 20 cm 深度土层,还加速了新翻的表层土壤中活性有机质的矿化);另一方面提高了深层土壤有机质的稳定性。与连年翻耕相比,连年深松则主要增加了 0 ~ 10 cm 和 35 ~ 50 cm 土层的 MBC/SOC 和 WSOC/SOC 质量比,提高了 10 ~ 20 cm 土层的 HOC/SOC 质量比,这与其耕作特点有关,在深松措施下,玉米秸秆大部分残留在土壤表层,所以增加了 0 ~ 10 cm 表层土壤有机碳的活性组分的比例;在 35 ~ 50 cm 土层 MBC/SOC 质量比和 WSOC/SOC 质量比也增加,可能与深松打破犁底层,促进根系向下生长有关。深松措施下,10 ~ 20 cm 土层的 SOC 含量最小,且 HOC/SOC 质量比较大,可能是因为深松改善了土壤亚表层疏松状况,加速了该土层有机质的矿化有关,从而使难氧化有机碳组分相对增多。

3.2 耕作对作物生长发育及秸秆还田腐殖化系数的影响

本研究发现,与翻耕相比,深松、免耕和轮耕均可以提高玉米秸秆量和玉米籽粒产量,其中免耕与深松相结合的轮耕模式增产幅度最大,这是因为该轮耕模式可以打破犁底层,有利于土壤蓄水保墒,促进作物地下、地上部分的生长,并提高其产量;而且对土壤扰动小,避免有机质过度矿化,进而提高土壤肥力和生产力。

腐殖化系数是指一年时间内土壤有机碳储量的

增加量占有外源输入有机碳的百分比,反映出输入外源碳在土壤中固定特征。在同样的气候、土壤类型和作物种植条件下,腐殖化系数主要受农田耕作和水肥管理的影响。本研究的农田水肥管理措施一致,只有耕作方面的差异。连年免耕(NN)、深松(SS)或者轮耕(NS、SC和CN)处理的表观腐殖化系数都高于连年翻耕,其中以免耕与深松结合的轮耕处理最大,这一方面与免耕与深松结合后,作物产量和秸秆量最大,导致秸秆就地还田量也最大有关;另一方面也与该轮耕方式能减少耕作对土壤的扰动、降低土壤有机碳的矿化、促进外源有机碳在土壤中的残留有关。

4 结论

(1)8年的定位试验表明,不同耕作措施对土壤有机碳库有显著影响。在秸秆还田条件下,与翻耕相比,深松、免耕和轮耕(NS、SC、CN)显著提高了0~50 cm土层有机碳及其各组分的储量,其中主要以0~10 cm表层土壤的增加为主;在几种耕作中,以免耕与深松结合的轮耕模式的SOC、MBC、WSOC

储量增加量最大,连年免耕处理的HOC储量最大。与翻耕相比,深松、免耕和轮耕不仅提高了表层土壤的MBC/SOC和WSOC/SOC质量比,还分别增加了10~20 cm、35~50 cm和20~35 cm土层的HOC/SOC质量比;表明在表层土壤中,深松、免耕和轮耕处理既增加有机碳的量,又增加了有机碳的活性,在大于10 cm土壤中,增加了难氧化组分的比例,提高了有机碳的稳定性。

(2)不同耕作措施影响到作物的生长和秸秆还田后的腐殖化系数。相对于翻耕,深松、免耕和轮耕均可提高玉米籽粒产量和秸秆的生物量,其中免耕与深松结合的轮耕模式增产效果较大。长期单一翻耕条件下秸秆还田碳的表观腐殖化系数为8.94%。与翻耕相比,各耕作处理的玉米秸秆还田碳的表观腐殖化系数显著增加,且免耕与深松结合的轮耕处理的表观腐殖化系数最大。

(3)在渭北高原原垆土地地区,免耕-深松相结合的模式不仅能增加土壤有机碳及其组分的含量和储量,促进土壤固碳,而且对提高玉米产量也有显著效果,是该地区较适宜的耕作模式。

参 考 文 献

- 余健,房莉,卞正富,等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.
YU Jian, FANG Li, BIAN Zhengfu, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4829-4838. (in Chinese)
- LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(1-2): 1-22.
- WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon flux from agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture Ecosystems Environment, 2002, 91(1-3): 217-232.
- MARTINEZ E, FUENTES J P, PINO V, et al. Chemical and biological properties as affected by no-tillage and conventional tillage systems in an irrigated Haploxeroll of Central Chile[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 238-245.
- GARCIAFRANCO N, ALBALADEJO J, ALMAGRO M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153: 66-75.
- CHPLOT V, ABDALLA K M, ALEXIS M A, et al. Surface organic carbon enrichment to explain greater CO₂ emissions from short-term no-tilled soils[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 203: 110-118.
- 郑智旗,王树东,何进,等. 耕作措施对京郊冬小麦CO₂、CH₄排放通量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 189-195. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s130&flag=1&journal_id=jesam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.030.
ZHENG Zhiqi, WANG Shudong, HE Jin, et al. Influences of tillage methods on carbon dioxide and methane fluxes from winter wheat fields in Beijing's suburb[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 189-195. (in Chinese)
- 王丹丹,周亮,黄胜奇,等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740.
WANG Dandan, ZHOU Liang, HUANG Shengqi, et al. Short-term effect of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in Central China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(4): 735-740. (in Chinese)
- 宋明伟,李爱宗,蔡立群,等. 耕作方式对土壤有机碳库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 622-626.
SONG Mingwei, LI Aizong, CAI Liqun, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 622-626. (in Chinese)
- 吕瑞珍,熊琰,李友军,等. 保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 206-217.
LÜ Ruizhen, XIONG Ying, LI Youjun, et al. Effect of conservation tillage on soil carbon pool in farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 206-217. (in Chinese)

- 11 KAHN M S, LAL R, ANN-VARUGHESE M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 151 – 158.
- 12 USSIRI D A N, LAL R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 39 – 47.
- 13 陈学文, 王农, 时秀焕, 等. 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2676 – 2683.
- CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al. Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2676 – 2683. (in Chinese)
- 14 MU X Y, ZHAO Y L, LIU K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32 – 43.
- 15 FERRO N D, SARTORI L, SIMONETTI G, et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 140: 55 – 65.
- 16 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特征和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3359 – 3371.
- ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359 – 3371. (in Chinese)
- 17 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 87 – 95.
- WEI Yanhua, ZHAO Xin, ZHAI Yunlong, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 87 – 95. (in Chinese)
- 18 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 246 – 252.
- ZHANG Sai, WANG Longchang, HUANG Zhaojun, et al. Effect of conservation tillage on active soil organic carbon composition [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 246 – 252. (in Chinese)
- 19 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30 – 34.
- 20 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: 228 – 237.
- 21 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 & Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231 – 1243.
- 22 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究: I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. *土壤学报*, 1963, 11(3): 286 – 293.
- YUAN Keneng. Studies on the organo-mineral complex in soil: the oxidation stability of humus from different organo-mineral complexes in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(3): 286 – 293. (in Chinese)
- 23 WHITBREAD A, LEFROY R, BLAIR G. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669 – 682.
- 24 MVON L, KOGELKNABNER I, EKSCHMITT K, et al. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183 – 2207.
- 25 PARTON W J, SCHIMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173 – 1179.
- 26 陈文超, 徐生, 朱安宁, 等. 保护性耕作对潮土碳、氮含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 224 – 230.
- CHEN Wenchao, XU Sheng, ZHU Anning, et al. Effect of conservation tillage on the content of carbon, nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(9): 224 – 230. (in Chinese)
- 27 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785 – 1792.
- ZHAO Yali, GUO Haibin, XUE Zhiwei, et al. Effect of tillage and straw returning on microorganism quantity enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1785 – 1792. (in Chinese)