

贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1942–1951.

HE Mei, WANG Li-gang, WANG Ying-chun, et al. Response of the active carbon pool and enzymatic activity of soils to maize straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1942–1951.

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美¹, 王立刚^{1*}, 王迎春¹, 朱平², 李强², 沈欣³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 吉林省农业科学院农业环境与资源研究所, 长春 130033; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 秸秆还田是培肥地力、控制焚烧导致大气污染的重要途径, 探讨东北春玉米秸秆不同还田量对黑土活性有机碳库和酶活性的影响, 为农业生产中实施秸秆还田措施提供理论基础。本研究设置了对照不施肥(CK)、单施氮磷钾肥(NPK)、化肥配施1/3秸秆还田(NPKS1)、化肥配施1/2秸秆还田(NPKS2)和化肥配施全量秸秆还田(NPKS3)5种处理, 主要分析了不同处理对土壤活性有机碳组分、土壤碳库管理指数、土壤酶活性及春玉米产量的影响。结果表明, 秸秆还田可以明显提高可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)和易氧化有机碳(ROC)的含量, 且提升效果随着还田量增加而增加。不同秸秆还田量下碳库管理指数差异明显, NPKS1、NPKS2和NPKS3处理相对NPK处理分别增加了52.83%、86.92%和114.76%。秸秆还田后土壤木聚糖酶(BXYL)、纤维素酶(CBH)、乙酰基 β -葡萄糖胺酶(NAG)和 β -葡萄糖苷酶(BG)的活性均有不同程度提高, 以NPKS3处理对BXYL酶活性提升效果最显著($P < 0.05$)。秸秆还田明显提高春玉米产量, 但是不同还田量之间差异不显著。相对NPK处理, NPKS2和NPKS3处理显著提高了活性碳组分DOC和POC含量、碳库活性、碳库活性指数及碳库管理指数、土壤CBH、BG和BXYL酶活性($P < 0.05$)。综合来看, 在本试验地区, 玉米秸秆为4500~9000 kg·hm⁻²是比较适宜的还田量。

关键词: 秸秆还田; 黑土活性碳库; 碳库管理指数; 土壤酶活性; 春玉米产量

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1942-10 doi:10.11654/jaes.2017-1725

Response of the active carbon pool and enzymatic activity of soils to maize straw returning

HE Mei¹, WANG Li-gang^{1*}, WANG Ying-chun¹, ZHU Ping², LI Qiang², SHEN Xin³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 3. The National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: Straw returning is important for enhancing soil fertility and controlling air pollution. Understanding the effects of straw returning on the active carbon pool and enzymatic activities of soils can help the design of better straw returning management strategies. In this study, we set up five treatments with different fertilization and straw returning strategies, including the use of no fertilizers (CK), NPK fertilizer (NPK), fertilizer with 1/3 biomass of straw returned (NPKS1), fertilizer with 1/2 biomass of straw returned (NPKS2), and fertilizer with total straw returned (NPKS3). Then the effects of the different treatments on the active carbon pool, carbon management index, and enzyme

收稿日期: 2017-12-15 录用日期: 2018-03-12

作者简介: 贺美(1990—), 女, 硕士研究生, 从事农田生态系统碳氮循环研究。E-mail: hemei0911@126.com

*通信作者: 王立刚 E-mail: wangligang@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0101100, 2017YFD0201801); 国家自然科学基金项目(31770486); 公益性行业(农业)科研专项(201303126-2); 中国农科院创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016008-02)

Project supported: The National Basic Research Program of China (2016YFE0101100, 2017YFD0201801); The National Natural Science Foundation of China (31770486); The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201303126-2); The Cooperative Innovation Task of the Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-XTCX2016008-02)

activity of soils, and the yields of spring corn were analyzed. The results showed that the contents of dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC), and readily oxidized organic carbon (ROC) obviously improved after straw returning, and the more the straw returned, the higher were the increases. The soil carbon management indices significantly differed among the treatments with different amounts of straw returned, and compared to that of NPK, the carbon pool management index of NPKS1, NPKS2 and NPKS3 increased by 52.83%, 86.92%, and 114.76%, respectively. Furthermore, straw returning increased β -xylosidase (BXYL), cellulose (CBH), acetyl beta glucosamine enzyme (NAG), and beta glycosidase enzyme (BG) activities by varying degrees. Compared with NPK, the DOC and POC contents, soil carbon pool activity, soil carbon pool activity index, soil carbon pool management index, and soil CBH, BG, and BXYL enzyme activities of NPKS2 and NPKS3 were significantly improved ($P < 0.05$). The yields of spring corn increased after straw returning, but the differences in yields were not significant among the three straw returning treatments. To sum up, maize straw returning at the rate of 4500~9000 kg·hm⁻² is appropriate for this test area.

Keywords: straw application; soil active carbon pool; carbon pool management index; soil enzyme activities; spring maize yield

东北黑土面积约1000万hm²,是中国最肥沃和极具生产力的土壤,从二十世纪开垦以来特别是八十年代至今,在不合理施用化肥的集约化大规模种植条件下,黑土耕地土壤肥力不断减退,土壤有机质明显下降^[1-2],与此同时,随着高秆玉米密植栽培技术的广泛应用,玉米秸秆生物量不断增加,玉米秸秆“去往何处”成了一个亟待解决的环境问题。在农业环境“一控、两减、三基本”的政策背景下,控制秸秆焚烧、实施秸秆有效还田成为保持土壤肥力、减少大气污染与农田化肥投入的重要措施。玉米秸秆中富含有机碳、氮、磷、钾、硅和植物生长的其他必需营养元素^[3],适量还田后可以改善土壤结构、提高土壤碳库容量及促进土壤氮循环,对土壤生态系统养分循环和农业生产有重要意义^[4-5]。但是秸秆过量还田也会带来一些负面影响,比如分解秸秆的微生物会与作物争夺土壤或者肥料中的养分尤其是矿质氮、造成有机酸的积累和成为一些病原菌或虫害的庇护所等^[6-9]。因此,如何合理有效利用秸秆对资源、环境和农业的可持续发展是十分重要的命题^[10]。

研究表明^[11],秸秆还田不单意味着土壤碳投入的直接提高,对土壤的影响还表现在还田后土壤理化性质以及作物生长的变化上,可用来判断秸秆还田后农田土壤有机碳(SOC)固存的利益有没有实现。Stewart等^[12]和Wang等^[13]研究认为土壤有机碳固存潜力存在饱和上限,与秸秆还田碳投入量并非非线性递增关系,并且黑土区耕层土壤碳氮含量有较强的空间异质性^[14],不同田块微生物矿化秸秆的数量与能力迥然不同,加上东北属于高纬度地区,冷凉的气候下秸秆腐解十分缓慢,过量的秸秆不仅会增加土壤碳排放而且不利于作物出苗及生长,因此,明确合适的秸秆还田量对于黑土区秸秆资源的有效利用及农田土壤管理

有重要意义。本研究针对东北地区土壤有机质下降的突出问题,设置不同秸秆还田量梯度,探讨不同秸秆还田量下土壤有机碳及其组分含量与有效性变化、土壤碳库活度与碳库管理指数特征、土壤酶活性变化和作物产量差异,对不同秸秆还田量下的土壤碳响应情况进行综合评估,以期为东北地区合适的秸秆还田数量提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究地点位于吉林省公主岭市郊区(43°30'23"N, 124°48'34"E),年平均气温5~6℃,有效积温范围2600~3000℃。降水主要集中在5—10月份,年降水量450~650mm,属于一年一季雨养农业区。种植模式为春玉米(*Zea mays* L.)连作,种植密度大约6万株每公顷。0~120cm土壤初始理化性质见表1。

1.2 试验设计

本试验始于2013年,试验开始前试验地种植模式为春玉米连作,且未经过有机物料还田等处理,化肥用量即当地农民习惯施肥量。试验共设5个处理,每处理3个重复,共15个试验小区,小区面积50m²(5m×10m),随机区组排列。于每年四月中下旬进行田间起垄,然后拉样方划小区,每小区含6条垄,垄宽70cm,在小区与小区之间留1m宽的空地作为过道。各施肥处理磷钾肥播种前作为底肥一次性施入,氮肥1/3播种前用作底肥,2/3于拔节期追肥,底肥于起垄当天人工撒施于垄沟中然后覆土。秸秆还田量根据当地秸秆年均产量设置三个梯度:1/3秸秆还田(NPKS1)、1/2秸秆还田(NPKS2)和全量还田(NPKS3),每年收获后将秸秆移出大田,经自然风干后人工粉碎成2cm左右小段。为不影响出苗,均于

表1 试验地土壤基础理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties of the experimental site

土层 Soil layer/cm	pH	有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Soil total nitrogen/ g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkeline nitrogen/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available phosphorous/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹
0~20	6.35	24.83	1.48	0.62	19.60	144.21	35.21	133.01
20~40	6.79	20.67	1.13	0.43	18.84	94.64	24.17	187.00
40~60	6.90	10.12	0.62	0.40	19.09	51.07	21.36	199.00
60~80	7.45	7.76	0.50	0.30	19.13	30.04	20.42	186.00
80~100	7.14	6.01	0.41	0.33	18.68	29.29	17.06	197.00
100~120	6.83	3.69	0.33	0.35	20.85	32.30	11.73	170.50

第二年追肥时进行还田,还田前先称取各小区每垄还田量及追肥的尿素用量,装袋后运入大田,借助马犁于两垄间开沟,将追施的氮肥和秸秆均撒施于垄沟中然后人工覆土。各处理化肥与秸秆施用量见表2。

表2 不同处理下的施肥量

Table 2 The different amount of straw application treatments

处理 Treatment	施肥量 Application rate			
	N/kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²	秸秆 Straw/t·hm ⁻²
CK	0	0	0	0
NPK	160	90	90	0
NPKS1	160	90	90	3
NPKS2	160	90	90	4.5
NPKS3	160	90	90	9

注:玉米秸秆的C:N为66:1,含氮量是7.0 g·kg⁻¹。

Note: The C:N ratio of maize straw in dry matter is 66:1, and the N concentrations in maize straw is 7.0 g·kg⁻¹.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分测定方法

2015年作物收获后,采集0~20 cm土层土样,在每个小区按梅花形5点法采样后混匀作为一个样本,各处理的土壤样本均重复3次。将采集完的土壤立即用冰盒带回实验室,分装成两部分,一部分风干后挑出碎石、植物根系残渣并过2 mm筛,测定土壤pH值、有机质、全氮、颗粒有机碳与易氧化有机碳含量;另一部分过2 mm筛并保存于4℃冰箱用于鲜样的测定,各指标测定均在24 h内完成。土壤基本理化性质参考文献[15];可溶性有机碳(DOC)采用硫酸钾浸提后用TOC仪测定^[16];颗粒有机碳(POC)测定采用六偏磷酸钠分散法^[17];微生物量碳(MBC)分析采用氯仿熏蒸浸提法^[18];易氧化有机碳(ROC)测定采用高锰酸钾氧化法^[19]。

1.3.2 碳库管理指数(CMPI)的计算方法

本研究以不施肥CK处理为参照土壤进行计算。

碳库指数(CPI)=农田土壤有机碳/参考土壤有机碳;碳库活度(A)=活性碳/稳态碳;碳库活度指数(AI)=农田碳库活度/参考土壤碳库活度;碳库管理指数(CMPI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100^[20]。

1.3.3 土壤酶活性的测定

本研究中所涉及的四种土壤酶[包括木聚糖酶(BXYL)、纤维素酶(CBH)、乙酰基β-葡萄糖胺酶(NAG)和β-葡萄糖苷酶(BG)]活性的测定均采用荧光微型板检测技术^[21],称取相当于1 g干土的鲜土,置于200 mL塑料瓶,加入50 mmol·L⁻¹醋酸缓冲液120 mL(pH和待测土壤基本一致),振荡制备成土壤悬浊液;然后用8通道移液器依照次序加试剂于微型板中,将加好待测液、标准底物、荧光底物的微型板放入25℃的培养箱培养,培养4 h后用多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL 3001, Thermo)测定。

1.3.4 春玉米产量及植株不同器官干物质质量测定

春玉米成熟后,在每个小区选3个10 m²的样方,将样方内所有玉米棒装袋,晒干后脱粒称重,并测试计算含水量后,折算成公顷产量。收获时在各小区随机选2株长势一致的玉米植株,连根拔起整株带回实验室,将根、茎、叶、穗轴和籽粒5部分分别装袋,于105℃下杀青0.5 h,后在80℃下烘干至恒质量。

1.4 数据处理

本文试验数据测定均来自2015年样品采集的测定值,采用Microsoft Excel 2010、OriginPro 9.1和SAS 9.1软件进行处理和统计分析,基于最小显著差数法(Least significant difference)和皮尔逊相关系数法(Pearson correlation coefficient)进行方差检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量对黑土活性碳库组分的影响

秸秆还田后土壤DOC、MBC、POC和ROC含量有明显的上升,且提升效果随着秸秆还田量的增加而增加,各处理中以NPKS3处理提升碳组分的效果最好(图1)。与NPK处理相比,不同秸秆还田量对DOC、MBC、POC和ROC增加幅度分别为18.40%~28.52%、11.28%~30.84%、24.49%~92.13%和53.43%~113.68%,各处理对土壤ROC含量的提升效果最为显著。NPKS1、NPKS2和NPKS3处理的DOC、MBC和ROC之间均无显著性差异,NPKS2和NPKS3处理的POC分别显著高于NPKS1处理54.33%和42.45%。

NPKS1、NPKS2和NPKS3处理间土壤有机碳含量无显著差异,NPKS3处理的土壤有机碳含量显著高于

NPK处理16.56%(表3)。不同秸秆还田量下碳组分分配比率不同,四种碳组分以POC占SOC百分含量最高(11.72%~36.97%),MBC的分配比率最低(0.51%~0.93%)。DOC/SOC、MBC/SOC和POC/SOC三种碳组分分配率均以NPKS2处理最高。NPKS2和NPKS3处理POC/SOC分别显著高于NPKS1处理42.03%和39.76%,其余三种碳组分分配比率不同秸秆还田量下均无显著差异。

2.2 不同秸秆还田量对黑土碳库管理指数的影响

碳库管理指数可以反映土壤质量状况及其肥力水平。以CK处理为对照,对单施化肥与化肥配施秸秆还田下的各处理的碳库参数进行分析(表4),结果

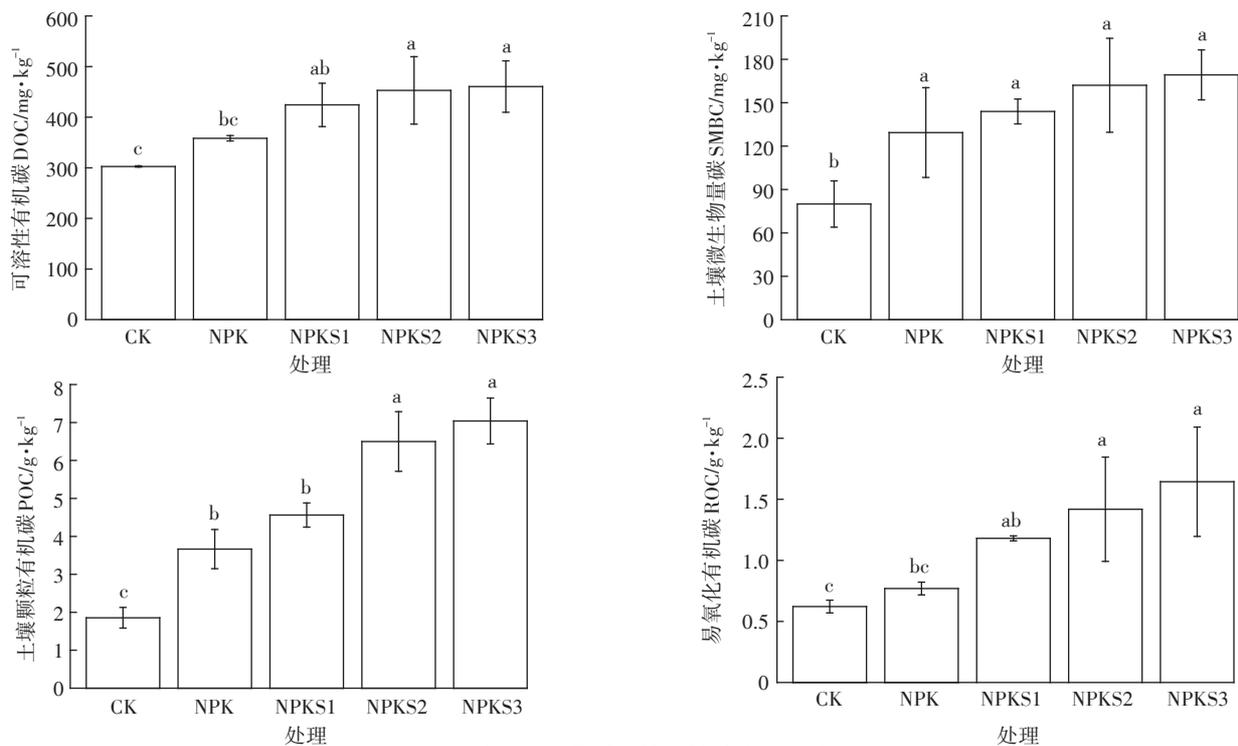


图1 不同秸秆还田量对土壤活性碳库组分的影响

Figure 1 Effects of different straw returning amount on soil active carbon components

表3 不同秸秆还田量对土壤活性碳组分分配比率的影响

Table 3 Fractions of soil active carbon in soil total organic carbon under different amounts of straw returning

处理 Treatment	SOC/g·kg ⁻¹	(DOC/SOC)/%	(MBC/SOC)/%	(POC/SOC)/%	(ROC/SOC)/%
CK	15.85±0.34b	1.91±0.05b	0.51±0.11b	11.72±1.89c	3.92±0.26c
NPK	16.72±2.10b	2.16±0.25ab	0.78±0.22a	22.31±5.11b	4.62±0.29bc
NPKS1	17.54±0.79ab	2.42±0.31ab	0.82±0.02a	26.03±2.14b	6.74±0.29ab
NPKS2	17.57±0.55ab	2.59±0.45a	0.93±0.21a	36.97±4.03a	8.13±2.68a
NPKS3	19.49±1.36a	2.37±0.34ab	0.87±0.03a	36.38±5.76a	8.35±1.79a

注:数值均为平均值±标准差(n=3)。同列不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。SOC:土壤有机碳;DOC:可溶性有机碳;MBC:微生物量碳;POC:颗粒有机碳;ROC:易氧化有机碳。

Note: The numeric values represent mean±standard deviation (n=3). Different lowercase letters in a column mean significant different at the 5% level. The same below. SOC: Soil organic carbon; DOC: Dissolved organic carbon; MBC: Microbial biomass carbon; POC: Particulate organic carbon; ROC: Readily oxidized carbon.

表4 不同秸秆还田量对黑土碳库指数、碳库活性、碳库活度指数和碳库管理指数的影响(0~20 cm)
Table 4 The effect of different straw returning amounts on CPI, A, AI and CMPI of black soil(0~20 cm)

处理 Treatment	碳库参数 Carbon parameter			
	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CMPI
CK	0.039±0.003c	1.00±0.00b	1.00±0.00b	100.0±0.00b
NPK	0.046±0.003bc	1.18±0.05b	1.06±0.16b	124.9±19.86b
NPKS1	0.067±0.003ab	1.72±0.05ab	1.11±0.07ab	190.87±17.18ab
NPKS2	0.081±0.027a	2.11±0.85a	1.11±0.03ab	233.46±92.60a
NPKS3	0.084±0.018a	2.15±0.53a	1.23±0.11a	268.24±87.30a

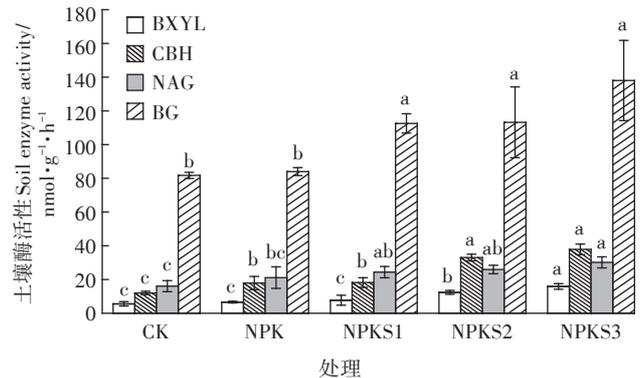
表明,各施肥处理土壤碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)、碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CMPI)均有不同程度的增加,且增加规律一致,均以NPKS3处理最高。NPKS2和NPKS3处理土壤碳库活度显著高于NPK处理76.08%和82.61%。各秸秆还田处理下碳库活度指数无显著差异,但是NPKS2和NPKS3处理的碳库活度指数显著高于NPK处理78.81%和82.80%。NPKS1、NPKS2与NPK处理碳库指数之间无显著差异,NPKS3的碳库指数显著高于NPK处理16.04%。各处理碳库管理指数以NPKS3处理最高,其中NPKS2和NPKS3处理碳库管理指数显著高于NPK处理86.91%和114.76%,表明秸秆半量及全量还田明显提高黑土土壤质量,使得土壤活性有机质的相对数量增加。

2.3 不同秸秆还田量对黑土酶活性的影响

不同处理对木聚糖酶(BXYL)、纤维素酶(CBH)、乙酰基β-葡萄糖胺酶(NAG)和β-葡萄糖苷酶(BG)的活性影响明显(图2),本试验中BXYL、CBH、NAG和BG的活性变化范围分别是5.50~17.58、11.16~40.99、12.43~33.36 nmol·g⁻¹·h⁻¹和80.40~164.81 nmol·g⁻¹·h⁻¹。各处理四种酶活性表现一致,均以CK处理最低,NPKS3处理最高。相对NPK处理,化肥配施秸秆还田后BXYL、CBH、NAG和BG的活性提高了17.18%~140.53%、1.69%~111.40%、15.37%~42.72%和34.03%~64.32%。其中BXYL活性对秸秆还田响应较为敏感,NPKS3处理BXYL活性显著高于NPKS1和NPKS2处理105.27%和28.22%,NPKS2处理BXYL活性显著高于NPKS1处理60.08%。NPKS2和NPKS3处理的CBH活性显著高于NPKS1处理81.31%和107.87%,NPKS2和NPKS3处理之间无显著性差异。而NAG和BG活性不同秸秆还田量处理之间则没有显著性差异。

2.4 不同秸秆还田量对作物产量的影响

秸秆还田后春玉米不同分器官干物质质量均有一



BXYL: 木聚糖酶; CBH: 纤维素酶;
NAG: 乙酰基β-葡萄糖胺酶; BG: β-葡萄糖苷酶
BXYL: β-xylosidase; CBH: Cellobiohydrolase;
NAG: N-acetylglucosaminidase; BG: β-glucosidase

图2 不同秸秆还田量对土壤酶活性的影响

Figure 2 Effects of different straw returning amounts on soil enzyme activities

定程度的增加(表5),相对NPK处理,秸秆还田分别提高了玉米单株叶、茎、籽粒、轴和根2.08%~17.14%、22.21%~31.21%、11.74%~16.62%、19.19%~21.02%和25.61%~62.13%。而不同秸秆还田量各分器官干物质质量均无显著差异。相对CK处理,NPK处理显著提高了玉米产量47.66%。相对NPK处理,NPKS1、NPKS2和NPKS3处理的产量提高了2.75%、2.25%和4.55%,NPKS3处理下玉米产量表现最高,但是不同秸秆还田量下玉米产量之间无显著差异,说明化肥在作物增产方面效果显著,而不同秸秆还田量对作物生长的影响在目前的实验阶段没有显著差异。

2.5 作物产量、土壤有机碳与各活性有机碳库及土壤酶活性的相关性分析

综合各处理的春玉米产量,土壤酶活性,土壤活性碳库组分含量进行相关性分析(表6),各处理的作物产量与土壤DOC、MBC和POC含量均呈极显著相关($P<0.01$),与土壤ROC、BG、NAG、CBH、BXYL活性显著相关($P<0.05$);SOC除与作物产量和DOC不相

表5 不同秸秆还田量对春玉米不同器官干物质分配与产量的影响

Table 5 Effects of different amounts of straw return on spring maize yield and its dry matter distribution

处理 Treatment	叶 Leaf/g·株 ⁻¹	茎 Stem/g·株 ⁻¹	籽粒 Grain/g·株 ⁻¹	轴 Spindle/g·株 ⁻¹	根 Root/g·株 ⁻¹	产量 Yield/kg·hm ⁻²
CK	37.14±9.72b	63.81±4.12b	97.48±35.92b	11.08±2.83b	11.78±2.69b	5 016.16±166.36b
NPK	49.43±10.05ab	89.55±22.47ab	147.29±31.93ab	18.08±3.99a	12.65±0.64ab	7 407.04±404.35a
NPKS1	50.46±11.30ab	109.44±37.21a	171.77±39.19a	21.62±5.76a	19.53±7.51ab	7 610.47±737.41a
NPKS2	54.78±6.87a	112.79±2.69a	164.58±11.27a	21.88±2.32a	15.89±5.25ab	7 573.79±394.15a
NPKS3	57.90±9.40a	117.50±25.20a	167.59±14.94a	21.55±1.63a	20.51±2.55a	7 743.87±204.31a

表6 作物产量、土壤有机碳与各活性有机碳库及土壤酶活性之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between spring maize yield, soil organic carbon and soil active organic carbon components as well as soil enzyme activities

指标 Indicators	SMY spring maize yield	SOC Soil organic carbon	DOC Dissolved organic carbon	MBC Microbial biomass carbon	POC Particulate organic carbon	ROC Readily organic carbon	BXYL Beta xylosidase enzyme	CBH Cellulose enzyme	NAG Acetyl beta glucosamine enzyme	BG Beta glycosidase enzyme
SMY	1.000	0.474	0.746**	0.776**	0.792**	0.615*	0.597*	0.628*	0.635*	0.556*
SOC		1.000	0.504	0.566*	0.619*	0.722**	0.574*	0.650**	0.865**	0.686**
DOC			1.000	0.766**	0.795**	0.779**	0.696**	0.716**	0.684**	0.865**
MBC				1.000	0.776**	0.841**	0.614*	0.715**	0.726**	0.765**
POC					1.000	0.723**	0.899**	0.916**	0.781**	0.695**
ROC						1.000	0.677**	0.789**	0.729**	0.914**
BXYL							1.000	0.896**	0.691**	0.699**
CBH								1.000	0.701**	0.715**
NAG									1.000	0.739**
BG										1.000

注:n=15;*表示差异显著(P<0.05);**表示差异极显著(P<0.01)。

Note:n=15;* and ** represent significant difference under P<0.05 and P<0.01 level, respectively.

关,与其他指标均显著(P<0.05)或者极显著相关(P<0.01)。碳组分DOC、MBC、POC、ROC和土壤酶活BXYL、CBH、NAG、BG之间两两相关(P<0.05)。

3 讨论

3.1 秸秆还田对SOC活性组分及其分配比率的影响

SOC是改善土壤功能和性质、维持土壤质量和肥力不可缺少的组分^[22-23]。本试验中SOC随着秸秆还田量比例的增加而增加,但是不同量秸秆还田对土壤SOC没有显著影响,主要原因可能为秸秆还田对SOC含量的改变是一个比较缓慢的过程,在本研究地区高SOC本底值背景下,秸秆还田对SOC细微的提升效果在短期内没有凸显出来。有研究认为土壤SOC对碳输入和其他管理措施的响应取决于土壤初始碳含量,例如Lou等^[24]发现秸秆短期(<5年)还田后并没有显著改变SOC含量,而Liu等^[25]通过meta分析证明持续不断的秸秆还田可以进一步促进农田非碳饱和土壤的碳固存,本研究中不同还田量处理下SOC含量之间

的差异还需较长的实验尺度验证。SOC由于较高的本底值及时间和空间上较大的变异性,它的损耗或者增加在短期很难被监测到^[26],其活性组分如DOC、MBC、POC和ROC对于管理措施反应比SOC更快,被用来作为SOC变化的早期敏感指标^[27]。这些活性碳组分含量远小于SOC总量,易于被分解,是土壤食物网的“燃料”并强烈影响养分循环^[28-29]。本研究发现秸秆还田对土壤活性碳组分的提升随着还田量的增加而增加,主要原因是秸秆作为外源有机物为微生物提供了充足的能量来源,促进微生物的大量繁殖和生长进而释放更多的活性碳组分进入土壤中^[30]。土壤DOC被认为是评价土壤质量和功能的指标,秸秆半量和高量还田显著提高了土壤DOC含量,这与前人^[31]研究相符。相对NPK处理,秸秆全量和半量还田显著提高土壤POC和ROC的分配比例,说明高量秸秆还田可以提高土壤有机碳的有效性,进而改善土壤质量。土壤微生物量作为养分的“源”和“汇”,参与并调节养分循环过程,本研究结果表明秸秆还田明显提高

土壤微生物碳量,这与Zhao等^[32]在中国中北部的研究结果高量秸秆还田可以进一步提高土壤微生物磷脂脂肪酸含量相似,我们的研究还发现土壤微生物量碳与春玉米产量呈极显著相关关系($P<0.01$),这可能与微生物参与植物对营养元素的吸收与循环有关。

3.2 秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响

基于土壤有机碳及其活性组分变化,碳库管理指数逐步成为评估SOC变化的速率和状态的指标,也可用来指示管理措施对土壤质量提升的能力^[33],进而评估农业实践的功效。本研究以不施肥为参考土壤研究碳库管理指数发现,所有施肥处理的碳库管理指数均大于100,且碳库管理指数随着秸秆还田量的增加而升高,这与王晶等^[34]施肥尤其是有机无机配施更有助于黑土活性有机碳的增加和CMPI的提高的研究结果相似。碳库管理指数越大意味着高的SOC储量和ROC含量及高的有机物质中的养分含量,秸秆还田碳库管理指数的增加与土壤SOC和ROC含量升高表现一致,这也与Li等^[35]报道一致。但是徐明岗等^[36]在红壤上发现秸秆还田10年后其碳库管理指数呈先下降后上升趋势,秸秆还田对红壤旱地有机质含量的促进效果比较慢,推测这可能与施肥种类、数量及土壤质地等有关,红壤地区酸化比较严重,速效养分较低,而黑土区域土壤相对肥沃,尽管处于中温带、秸秆腐解较慢,但是土壤条件的差异足以使得不同区域下碳库管理指数对秸秆还田的响应迥异。曾骏等^[37]在灰漠土的研究也发现施肥均可以提高土壤碳库指数,而何翠翠等^[20]发现以撂荒处理为对照,化肥配施秸秆还田后其碳库管理指数低于对照,而本研究中土壤碳本底值稍高于何翠翠等研究地区,且参考土壤处理不一致,撂荒处理下明显降低了对土壤的人为扰动,减少了由于作物秸秆移出带来的土壤碳的输出,其土壤有机质含量背景值高于不施肥、单施化肥及化肥配施秸秆还田处理,这可能是造成土壤活性有机质含量与碳库管理指数差异的重要原因。秸秆还田对碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数的提升效果以全量秸秆还田最好,说明秸秆还田后增大了土壤活性有机组分的比重,有利于土壤碳库活度指数的升高,本研究也充分说明了秸秆还田可以提高黑土碳库管理指数和土壤质量,且以高量秸秆还田效果最佳。

3.3 秸秆还田对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是指示土壤质量最重要的指标之一,与农田管理下SOC变化密切相关,可以用来预测秸秆还田后土壤微生物群落的响应状况及土壤潜在代谢

能力^[38-39]。Bolinder等^[40]认为土壤微生物活性尤其是酶活性比SOC与ROC对土壤质量的变化更敏感。Zhao等^[32]发现长期秸秆还田显著增加土壤酶活性,秸秆还田4年后极大地提高了土壤脲酶和蔗糖酶的活性,并且这些酶均与SOC含量相关。在本文的研究中,BXYL、CBH、NAG、BG四种酶活性的变化趋势在不同处理中是相似的,秸秆进入土壤后各类酶活性均有不同程度的提高,且均随着秸秆还田量的增加而增加,可能与秸秆还田促进了土壤微生物的新陈代谢有关。唐晓雪等^[41]发现化肥配合秸秆直接还田后,土壤速效氮磷含量均有一定程度降低,且脲酶与转化酶的活性均低于化肥配合秸秆堆肥还田处理,而秸秆还田能够直接增加黑土酶活性的重要原因可能与黑土属于偏中性土壤、速效养分含量较高,较好的土壤条件能保证土壤微生物的分解活动有关,这可能是黑土酶活性对秸秆还田的响应区别于酸性土壤的重要原因之一。各类酶活均与SOC及碳组分呈显著相关关系($P<0.05$),可能是由于秸秆还田加速了与碳循环有关的土壤酶活性的刺激作用所致,而存在于酶活性与土壤碳素之间的相关性($P<0.05$)与我们先前的研究结论也相符^[42]。BG和CBH在土壤有机质的分解中扮演重要角色,相对NPK处理,秸秆还田显著提高了BG活性,可能由于秸秆还田后有机物质的降解产生了较多酶解反应的底物,促进酶促反应的进行,但是不同还田量之间没有显著性差异,也有可能由于秸秆还田量过多造成土壤与大气流通不畅,导致缺氧使得微生物活性没有显著增加所致^[43]。董明哲等^[44]研究发现纤维素酶活性在水旱轮作下对秸秆还田的响应更为强烈,各种酶对秸秆还田量响应不一,也可能与土地利用和农田管理方式有关。

3.4 秸秆还田对玉米干物质积累与分配及产量的影响

秸秆还田在提高农田土壤有机碳含量的同时改善土壤结构,秸秆中含有多种有益微量元素可以促进植物生长及对土壤养分的吸收,进而增加作物各器官干物质质量和籽粒产量。目前有关秸秆还田对作物产量的影响研究结论不一,有增加、减少和没有影响,其差异主要取决于气候条件、种植方式、养分和水管理^[45-46]。本试验中秸秆还田虽然提高了作物产量,且均以秸秆全量还田对玉米不同器官干物质和产量的提升效果最好,但是不同秸秆还田量处理对春玉米产量的影响没有显著差异,而王宁等^[47]发现秸秆全量还田并不能提高玉米产量,可能与土壤质地贫瘠且施肥量不足有关,因此,不同还田量之间没有显著差

异的主要原因可能是由于研究地区土壤质地肥沃且化肥的作用在很大程度上掩盖了秸秆还田的功效。徐蒋来等^[48]发现秸秆半量还田对小麦增产效果最好,水稻产量则随着秸秆还田量的增加而增加,但是增幅先快后慢,这可能与秸秆分解矿化过程相关,前期秸秆中易分解物质如单糖、淀粉等被微生物大量转化吸收,促进土壤肥力的提升,后期秸秆中的难分解组分如木质素、纤维素和单宁等分解需要较长的周期,导致对作物产量的提升效果逐渐下降。辛励等^[49]研究表明秸秆配施氮肥处理能够显著增加玉米产量,且随着秸秆用量增加玉米籽粒中淀粉和粗脂肪含量越高,因此,我们推测试验周期较短,土壤肥沃以及化肥增产功效明显,这三方面是导致本研究不同量还田下玉米产量没有显著差异的主要原因。

许多研究^[36,50]表明化肥与有机肥配合是改善土壤质量保证作物稳产高产的重要措施,从目前的实验结果来看,化肥与秸秆还田配施是提高玉米产量、保证土壤碳组分质量的重要措施,但是由于本试验缺乏单施秸秆的处理,使得我们难以估算仅由作物秸秆还田后对作物产量与土壤碳库组分增加的贡献。本研究中作物产量除与SOC相关性未达到显著水平外($P<0.05$),与其他所有碳组分及酶活性均显著相关($P<0.05$),而徐明岗等^[51]研究认为农田土壤有机碳与作物产量的协同效应存在阈值,并且二者之间的关系会受到气候条件及管理措施等的影响,存在一定的不确定性。而本研究中产量与各碳组分、酶活性的显著相关性也间接说明了这一点,土壤有机质与作物产量间的关系可能被掩盖,而活性碳组分可以更加敏感地反映作物产量与土壤有机碳的关系。秸秆还田通过影响土壤微生物的活性及土壤碳组分的有效性同时影响作物产量,这两方面的改善有可能掩盖了土壤有机碳对产量的有效性。土壤是不可再生的重要农业生产资料,需要不断补充新鲜碳源来补充其碳输入维持其生产力,秸秆作为物质、养分和能源的载体可以很好地补充地力,但是不同秸秆还田量下土壤性质与功能变化仍因气候、种植条件等差异较大,不同量秸秆还田后增产增肥的效果仍然需要更长时间的实验来验证。

4 结论

秸秆还田显著增加土壤碳组分含量,相对NPK处理,NPKS1、NPKS2和NPKS3处理对可溶性有机碳、微生物量碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳增加幅度分

别为18.40%~28.52%、11.28%~30.84%、24.49%~92.13%和53.43%~113.68%,且随着秸秆还田量的增加提升效果越明显。秸秆还田显著增加土壤碳库活度和碳库管理指数,同时提高土壤酶活性。秸秆还田后产量有所提升,但是不同还田量之间差异不显著。综合土壤活性碳组分与碳库管理指数响应、土壤酶活性及作物产量等指标情况,秸秆半量还田与全量还田均有利于土壤质量改善和作物生长,即在本试验条件下,秸秆4500~9000 kg·hm⁻²是比较适宜的秸秆还田量。

参考文献:

- [1] 张兴义,隋跃宇,宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物, 2013, 2(1):1-6.
ZHANG Xing-yi, SUI Yue-yu, SONG Chun-yu. Degradation process of arable mollisols[J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(1):1-6.
- [2] Chen Z, Xu Y, Fan J, et al. Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in northeast China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 110:103-115.
- [3] Zhang J, Wen X X, Liao Y C, et al. Effects of different amounts of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):612-619.
- [4] Fei L U, Wang X, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2):281-305.
- [5] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1441-1449.
ZHAO Shi-cheng, CAO Cai-yun, LI Ke-jiang, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in north China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6):1441-1449.
- [6] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3):361-369.
- [7] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1):150-157.
YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1):150-157.
- [8] 马超,周静,刘满强,等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):915-921.
MA Chao, ZHOU Jing, LIU Man-qiang, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang Black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):915-921.
- [9] 闫德智,王德建,张刚,等. ¹⁵N标记秸秆在太湖地区水稻土上的

- 氮素矿化特征研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1):77-85.
- YAN De-zhi, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Nitrogen mineralization of applied ^{15}N labeled straw in paddy soils in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):77-85.
- [10] Cui Y, Jun M, Wang Q, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of north China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5):1064-1074.
- [11] Lal R. Crop residues and soil carbon[R]. Proceedings of the Conservation Agriculture Carbon Offset Consultation, Lafayette, IN, USA, 2008: 2330.
- [12] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19-31.
- [13] Wang J B, Chen Z H, Chen L J et al. Surface soil phosphorus and phosphatase activities affected by tillage and crop residue input amounts[J]. *Plant Soil and Environment*, 2011, 57: 251-257.
- [14] 张兴义, 隋跃宇, 张少良, 等. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 1-5.
ZHANG Xing-yi, SUI Yue-yu, ZHANG Shao-liang, et al. Spatial heterogeneities of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 1-5.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agronomization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 117-141.
WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Qiao-yun, et al. Determination of soil microbial biomass and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 117-141.
- [19] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
TONG Xiao-gang. Change characteristics of soil organic carbon pools in typical cropland of China under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [20] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015(1): 194-202.
HE Cui-cui, WANG Li-gang, WANG Ying-chun, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015(1): 194-202.
- [21] De Forest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1180-1186.
- [22] Johnson J M F, Novak J M, Varvel G E, et al. Crop residue mass needed to maintain soil organic carbon levels: Can it be determined?[J]. *BioEnergy Research*, 2014, 7(2): 481-490.
- [23] Wang Q, Wang Y, Wang Q, et al. Impacts of 9 years of a new conservation agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 1-6.
- [24] Lou Y L, Xu M G, Wang W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil Tillage Research*, 2011, 113: 70-73.
- [25] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [26] Bosatta D A, Ågren G I. Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 143-148.
- [27] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 211-219.
- [28] McLaughlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 26: 821-831.
- [29] Weil R R, Islam K R, Stine M A, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use[J]. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, 18: 3-17.
- [30] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130-135.
LI Xin-hua, GUO Hong-hai, ZHU Zhen-lin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130-135.
- [31] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013(1): 240-246.
TANG Hong, SHEN Jian-lin, ZHANG Yang-zhu, et al. Effects of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in rice paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013(1): 240-246.
- [32] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [33] 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.
- [34] 王晶, 朱平, 张男, 等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 394-397.
WANG Jing, ZHU Ping, ZHANG Nan, et al. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index of black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 394-397.

- [35] Li S, Chen J, Shi J, et al. Impact of straw return on soil carbon indices, enzyme activity, and grain production[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 8(16):1475-1485.
- [36] 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.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):723-729.
- [37] 曾骏, 郭天文, 于显枫, 等. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4):812-815.
ZENG Jun, GUO Tian-wen, YU Xian-feng, et al. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4):812-815.
- [38] Oleszczuk P, Joko L, Futa B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil[J]. *Geoderma*, 2014, 214:10-18.
- [39] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58:216-234.
- [40] Bolinder M A, Angers D A, Gregorich E G, et al. The response of soil quality indicators to conservation management[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(1):37-45.
- [41] 唐晓雪, 刘明, 江春玉, 等. 不同秸秆还田方式对红壤性质及花生生长的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(2):324-328.
TANG Xiao-xue, LIU Ming, JIANG Chun-yu, et al. Effects of different ways of straw returning on red soil properties and peanut growth[J]. *Soils*, 2015, 47(2):324-328.
- [42] 贺美, 王立刚, 朱平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(19):6379-6389.
HE Mei, WANG Li-gang, ZHU Ping, et al. Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization condition of black soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19):6379-6389.
- [43] 徐蒋来, 尹思慧, 胡乃娟, 等. 周年秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分、微生物活性及产量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(6):1100-1105.
XU Jiang-lai, YI Si-hui, HU Nai-juan, et al. Effects of annual straw returning on soil nutrients, microbial activity and yield in a rice-wheat rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(6):1100-1105.
- [44] 董明哲, 陈香碧, 冯书珍, 等. 红壤丘陵区典型农田土壤秸秆还田后纤维素降解特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(7):1834-1841.
DONG Ming-zhe, CHEN Xiang-bi, FENG Shu-zhen, et al. Characteristics of cellulose degradation after straw return and its influence factors in arable lands in red soil hilly region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(7):1834-1841.
- [45] Wilhelm W W, Johnson J M F, Hatfield J L, et al. Crop and soil productivity response to corn residue removal[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1):1-17.
- [46] Pittelkow C M, Liang X, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2015, 517(7534):365-368.
- [47] 王宁, 闫洪奎, 王君, 等. 不同量秸秆还田对玉米生长发育及产量影响的研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(5):100-103.
WANG Ning, YAN Hong-kui, WANG Jun, et al. Research on effects of different amount straws return to field on growth development and yield of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(5):100-103.
- [48] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2):215-222.
XU Jiang-lai, HU Nai-juan, ZHU Li-qun. Effects of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2):215-222.
- [49] 辛励, 刘锦涛, 刘树堂, 等. 小麦-玉米轮作体系下长期定位秸秆还田对籽粒产量及品质的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(6):164-170.
XIN Li, LIU Jin-tao, LIU Shu-tang, et al. Effects of combined application of straw and organic fertilizer on grain yield and quality under wheat maize rotation system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2016, 31(6):164-170.
- [50] 王伯仁, 徐明岗, 黄佳良, 等. 红壤旱地长期施肥下土壤肥力及肥料效益变化研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊):21-28.
WANG Bo-ren, XU Ming-gang, HUANG Jia-liang, et al. Study on change of soil fertility and fertilizer efficiency under long-term fertilization in upland of red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(Suppl):21-28.
- [51] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1441-1449.
XU Ming-gang, ZHANG Xu-bo, SUN Nan, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6):1441-1449.