

张莉, 李玉义, 逢焕成, 等. 玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 160-168.

ZHANG Li, LI Yu-yi, PANG Huan-cheng, et al. Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 160-168.

玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响

张莉^{1,2}, 李玉义¹, 逢焕成^{1*}, 王婧¹, 丛萍¹, 张珺¹, 郭建军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. 信阳农林学院农学院, 河南 信阳 464001; 3. 德州市农业科学研究院, 山东 德州 253000)

摘要:为改进麦玉轮作区秸秆还田方式, 推进秸秆资源高效利用, 快速提升土壤质量, 以秸秆不还田为对照(CK), 通过连续3年田间微区试验, 研究了等量玉米秸秆粉碎还田(CCSI)和颗粒化还田(GSI)对0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)和作物产量的影响。结果表明:与CK相比, GSI和CCSI两种秸秆还田方式均能提高SOC和DOC含量, 但主要集中在还田后1.5年内, 还田后1.5~3年处理间无显著差异。在秸秆还田处理中, GSI处理能快速提高SOC和DOC含量。在还田当年, GSI处理0~20 cm土层SOC和DOC的平均含量较CCSI处理提高6.59%和3.00%, 20~40 cm土层分别提高17.36%和12.65%, 且两土层DOC/SOC也显著高于CCSI处理, 但随着还田后时间延长, CCSI和GSI处理间差异逐渐缩小, 还田后1.5年两者无显著差异。此外, GSI处理利于提高作物产量, 且在还田当年增产效应更加突出。与CK和CCSI处理相比, GSI处理还田当年小麦产量分别提高9.80%和10.82%, 玉米产量分别提高9.54%和3.45%。进一步分析发现, 2013—2016年GSI处理虽然增加了经济投入, 但由于具有更高的籽粒产量, 最终获得较高的年均净利润, 分别比CK和CCSI处理提高10.09%和3.24%。研究表明, 秸秆颗粒还田较常规粉碎还田能快速提高SOC和DOC含量, 促进当季作物增产, 获得较高的经济效益。

关键词:秸秆还田; 土壤有机碳; 可溶性有机碳; 作物产量

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)02-0160-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0137

Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield

ZHANG Li^{1,2}, LI Yu-yi¹, PANG Huan-cheng^{1*}, WANG Jing¹, CONG Ping¹, ZHANG Jun-tong¹, GUO Jian-jun³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2. School of Agriculture, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464001, China; 3. The Institute of Agricultural Science of Dezhou, Dezhou 253000, China)

Abstract: In order to improve straw incorporation method, promote the efficient utilization of straw resources and improve soil quality in the short time, a 3-year micro-field plot experiment was carried out at a modern agriculture research station in Dezhou City, Shandong Province, China. The treatments included no straw incorporation (CK), conventional chopped straw incorporation into the 0~15 cm depth (CCSI) and granulated straw incorporation into the 0~15 cm depth (GSI). And then the soil organic carbon (SOC), soil dissolved organic carbon (DOC), DOC/SOC at 0~20 cm and 20~40 cm soil layers and grain yields at maturity of 2013—2016 were measured. The results showed that the GSI treatment and CCSI treatment significantly increased SOC and DOC concentrations in the 0~40 cm layers in relative to CK, but the increases were mainly in the 1~1.5 years after straw returning, there was no significant difference among treatments at other times. Compared with the CCSI treatment, the average increase of SOC and DOC contents in the 0~20 cm layers during 1 years of straw incorporation under the GSI treatment were significantly increased by 6.59% and 3.00%, and those increase in the 20~40 cm layers increased by 17.36%

收稿日期:2018-05-26 录用日期:2018-08-15

作者简介:张莉(1987—),女,河南信阳人,博士,主要从事土壤耕作与培肥研究。E-mail: dazhang0376@163.com

*通信作者:逢焕成 E-mail: panghuancheng@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300800);公益性行业(农业)科研专项(201303130);国家自然科学基金项目(41501314)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300800); The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201303130); The National Natural Science Foundation of China (41501314)

and 12.65%, respectively. Meanwhile, the ratio of DOC/SOC in the two layers under the GSI treatment was much higher than that under the CCSI treatment, but the increasing amplitude reduced gradually with time. The grain yield under the GSI treatment was highest among the three treatments, especially in the first year after straw returning. Compared with CK and CCSI treatment, the wheat yield under the GSI treatment was increased by 9.80% and 10.82%, and the maize yield increased by 9.54% and 3.45% during the first year. Further analysis found that, GSI treatment significantly increased cost, but higher grain yields had finally got much higher net profit than other treatments. Thus, granulated straw incorporation can improve soil fertility in the short time and increase grain yield in the first year after application.

Keywords: straw incorporation; soil organic carbon (SOC); dissolved organic carbon (DOC); grain yield

秸秆作为物质、能量和养分的载体,施入土壤能补充土壤有机质,提高土壤微生物活性,增强土壤肥力^[1-2]。黄淮海地区是我国粮食主产区,秸秆年产量为2.4亿t,其中夏玉米秸秆占总量的40%左右,但因茬茬时间紧,玉米收获后,大部分秸秆直接粉碎浅耕还田常造成土秸混合度差、秸秆腐解缓慢和作物幼苗群体质量差等问题,不利于作物增产和稳产^[3-5]。生产中大部分秸秆被就地焚烧或随意堆弃,既造成环境污染和资源浪费,又导致土壤有机质补充不足,影响土壤可持续性利用^[6-7]。亟需优化玉米秸秆还田方式,促进其安全高效还田,提升土壤质量和改善生态环境。

土壤有机碳(SOC)影响着土壤水、肥、气、热条件,调控土壤生物化学过程,在土壤肥力、作物生产和环境保护方面具有重要作用,常作为评价农田管理措施的重要指标^[8-10]。可溶性有机碳(DOC)是土壤碳库最活跃的组分,不仅为作物生长提供所需的养分,又为微生物代谢供给大量碳源,其含量直接影响土壤养分的有效性^[11-12]。生产中可通过改变秸秆形态或土秸混合程度,增加秸秆与土壤的接触面积,促进有机物质的循环转化,提高土壤有机质含量^[13]。窦森等^[14]研究指出,玉米秸秆深层还田能提高单位面积土壤消纳秸秆的能力,改善秸秆还田质量。但由于深层土壤通气性差,微生物活性较低,秸秆不能在还田当年充分腐解,不利于改善当季的土壤肥力状况。Angers等^[15]研究发现,缩短秸秆长度也能加速秸秆分解,同时部分细小的秸秆能被土壤团聚体或土壤黏粒保护,减少碳素损失,利于形成更多的腐殖质。但也有部分学者认为改善秸秆还田性可以刺激土壤原有机碳的矿化分解^[16-17],加速土壤碳排放。为了改善秸秆还田性能,推进秸秆资源的安全还田,王婧等^[18]提出了“秸秆颗粒化还田”的新型还田方式,发现秸秆颗粒能显著提高秸秆腐解速率,促进秸秆中营养元素的释放。另有学者通过大田试验研究发现,秸秆颗粒还田利于土壤与秸秆的均匀混合,减少土壤水分散失,增强土壤蓄水保墒能力^[19]。秸秆颗粒腐解特征和土壤物理

性质的改变势必影响土壤中秸秆的进一步循环转化^[20],但目前关于秸秆颗粒的研究多集中在燃料和饲料方面^[21],关于秸秆颗粒培肥地力的研究较少,且主要集中在室内模拟条件下秸秆中营养元素的转化和环境效应方面。为此,本文通过田间定位试验,研究了秸秆颗粒还田对土壤有机碳、可溶性有机碳、作物产量和经济效益的影响,以期改进秸秆还田方式,推进秸秆资源高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013年10月—2016年10月在山东省德州市黄河涯镇德州农科院现代科学园区(116°18'E、37°27'N)进行,该地区属于暖温带大陆性季风气候,多年平均日照时数2600 h,无霜期208 d,平均气温13.4℃,≥10℃有效积温4621℃,年均降雨量为510 mm左右。试验地种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟复种轮作,土壤为黄潮土,试验前耕层土壤pH值为7.76,有机质和全氮含量为12.96 g·kg⁻¹和0.78 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷和速效钾为40.65、3.68 mg·kg⁻¹和128.38 mg·kg⁻¹,试验期间日降雨量和日均气温如图1所示。

1.2 试验材料

供试材料为夏玉米(品种:郑单958)秸秆。2013年10月玉米收获后,采集地上部秸秆,自然风干后,一部分用9CFZ-680型粉碎机将秸秆制成长度为6~10 cm秸秆段,以模拟常规玉米秸秆机械化还田;另一部分秸秆用HC-2000型粉碎机研磨过2 mm筛,按照30%~35%的比例添加蒸馏水,搅拌均匀后用FTHB-CX350型饲料颗粒机常温挤压,制得直径4 mm、长度为4~6 cm的棒状固体,冷却风干后存放于干燥室作为秸秆颗粒,其性质见表1。

1.3 试验设计

试验采用微区试验方法,每个微区面积为9 m²(3 m×3 m)。微区于2013年10月修建,先清除地上所有秸秆和根茬,将每个微区四周挖深40 cm、宽10

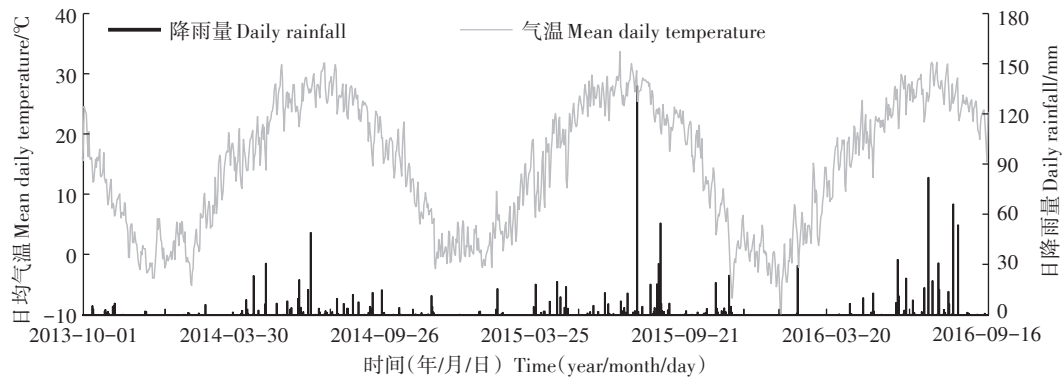


图1 试验期间试验地日降雨量和日均气温

Figure 1 Daily rainfall and mean daily temperature during the experiment period

表1 秸秆材料的养分含量

Table 1 Straw nutrient contents of different maize straw

类型 Type	秸秆含水量 Straw water content/%	全碳 Total C/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	可溶性有机碳 DOC/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	(DOC/SOC)/%
常规粉碎秸秆 Chopped straw	8.74±0.11a	42.00±1.00a	0.65±0.06a	0.073±0.002a	1.34±0.06a	13.41±1.37b	3.19±0.24b
秸秆颗粒 Granulated straw	6.79±0.10b	42.39±0.01a	0.78±0.11a	0.071±0.002a	1.30±0.01a	23.85±0.35a	5.63±0.08a

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

cm的沟槽,用双层塑料膜(长×宽:12.5 m×60 cm)包围四周,塑料膜的外侧用长300 cm、宽6 cm、高55 cm的水泥板围砌(外露15 cm、下埋40 cm),并用“U”钉将塑料膜固定于水泥板上,最后用土填实微区周围的空隙,微区间隔50 cm。

试验设旋耕秸秆不还田(CK,单施化肥)、常规粉碎还田(CCSI,当地农民做法)和秸秆颗粒还田(GSI)共3个处理,每个处理3次重复。CCSI和GSI处理于2013年10月在地表均匀撒施6000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (烘干秸秆的质量)自制的粉碎秸秆和秸秆颗粒;随后每个微区撒施等量基肥,人工用铁锨把秸秆、基肥与0~15 cm土层混和均匀,耙平地表。

2013年10月—2016年6月均采用冬小麦—夏玉米一年两熟种植方式。每季作物收获后,用镰刀贴近地面清除地上所有秸秆,移出试验田。供试小麦品种为济麦22,分别于2013年11月7日、2014年10月10日、2015年10月20日人工条播,每个微区15行,行距20 cm,播量为225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,并于2014年6月7日、2015年6月9日、2016年6月11日收获;供试玉米品种为郑单958,分别于2014年6月25日、2015年6月15日、2016年6月16日人工免耕点播,每个微区5行,行距60 cm,密度为75 000株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,并于2014年9月27日、2015年9月30日、2016年9月30日收获。冬小

麦生育期内,表施基肥,纯N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为105、120、105 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期追施,纯N 69 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;夏玉米生育期内,沟施基肥,纯N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为135、120、100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,孕穗期追施,纯N 69 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验期间,作物播种期和追肥后均用水表定量灌水750 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,其他管理措施与当地常规管理一致。

1.4 样品采集与指标测定

1.4.1 土壤有机碳

于2014年6月第1季小麦成熟期(还田后0.5 a)、2014年10月第1季玉米成熟期(还田后1 a)、2015年6月第2季小麦成熟期(还田后1.5 a)、2015年10月第2季玉米成熟期(还田后2 a)、2016年6月第3季小麦成熟期(还田后2.5 a)和2016年10月第3季玉米成熟期(还田后3 a),每个微区用对角线法分层采集0~20 cm和20~40 cm土样,同一微区相同土层样品充分混匀后,一部分土样保存于4℃冰箱,另一部分自然风干,研磨过20目和60目筛,用于分析土壤理化性质。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[22]。土壤可溶性有机碳按照曾全超等^[11]方法测定:称取5 g鲜土,水土比5:1(mL:g),25℃振荡30 min,5000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心15 min后,过0.45 μm 滤膜,用TC/N仪器(德国耶拿multi C/N 2100)测定,同时用烘干法测定土壤含水量。

1.4.2 土壤速效养分

土壤碱解氮用扩散法测定,有效磷用钼锑抗比色法测定,速效钾用醋酸铵浸提火焰光度计法测定^[22]。

1.4.3 作物产量

每季作物成熟期,人工收获实收测定各微区籽粒产量,并记录其含水量,分别按照小麦和玉米的入库含水量(13%和14%)折合为实际产量。

1.5 数据分析

采用Excel 2007整理数据,用SPSS 23.0分析数据,用LSD法检验差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆颗粒还田对土壤有机碳的影响

由图2可知,各处理0~20 cm土层SOC含量总体上表现为GSI>CCSI>CK,其中在还田后当年处理间有显著差异。与CK和CCSI处理相比,GSI处理第1季小麦成熟期(还田后0.5 a)SOC含量提高9.96%和8.24%;第1季玉米成熟期(还田后1 a)提高了12.28%和6.91%。还田后1.5~3 a,GSI处理和CCSI处理SOC含量均高于CK,增幅为3.62%~9.30%,但秸秆还田处理间无显著差异。

在20~40 cm土层,处理间SOC含量变化趋势与0~20 cm土层略有不同。GSI处理SOC含量高于CK和CCSI处理。相对于CK,GSI处理还田后0.5、1、1.5 a和2 a的SOC含量显著提高10.65%、12.52%、5.98%和5.39%,但还田后2.5 a和3 a两者无显著差异;与CCSI处理相比,GSI处理还田后0.5、1.5 a的SOC含量显著提高4.51%和3.34%,而其他时间无显著差异。

总体来看,在试验期内(3 a)两种秸秆还田方式均对SOC含量具有显著影响,但相对于常规粉碎还田,秸秆颗粒还田能够短期内快速提升SOC含量。

2.2 秸秆颗粒还田对土壤可溶性有机碳的影响

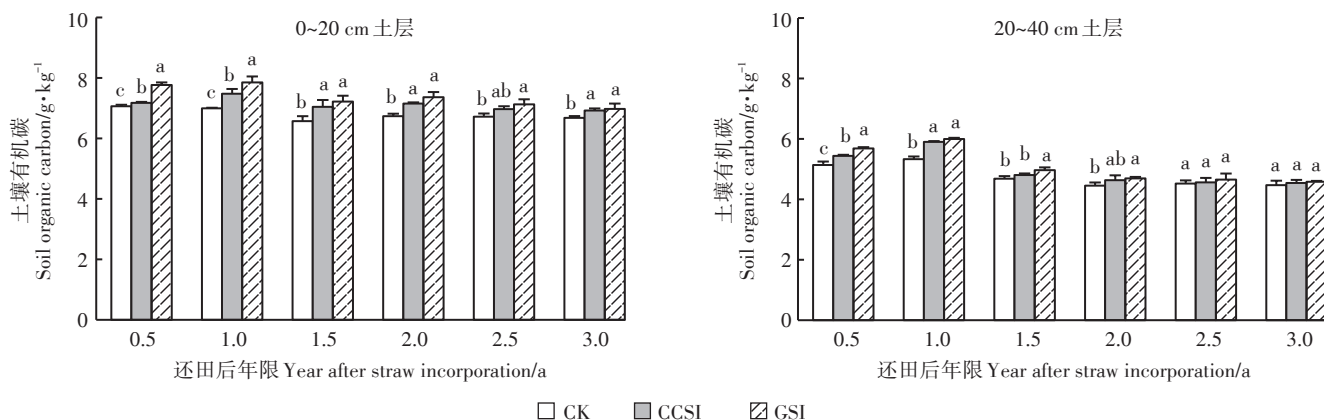
由图3可知,土壤DOC含量随着土层增加而降低。在0~20 cm土层,GSI处理和CCSI处理土壤DOC含量高于CK,增幅为16.58%~51.64%和10.93%~25.12%。与CCSI处理相比,还田后0.5、1 a和1.5 a,GSI处理的该土层DOC含量依次显著提高21.19%、11.47%和16.79%,而还田后2~3 a,两者无显著差异。

与0~20 cm土层不同,20~40 cm土层GSI处理在还田后0.5 a和1 a土壤DOC含量较CCSI处理显著提高12.04%和13.37%,而其他时间差异不显著。可见,两种秸秆还田方式均对土壤DOC有明显影响,但相对于常规粉碎还田,秸秆颗粒还田能够快速提高0~20 cm土层土壤DOC含量,与SOC不同的是,其提升效果可维持1.5 a。

2.3 秸秆颗粒还田对土壤DOC/SOC的影响

由图4可知,在0~20 cm土层,不同处理土壤DOC/SOC表现为GSI>CCSI>CK。试验期间GSI处理和CCSI处理土壤DOC/SOC较CK处理提高11.44%~37.95%,且在还田后1.5 a内差异显著;相对于CCSI处理,GSI处理还田后0.5、1 a和1.5 a土壤DOC/SOC显著提高12.02%、6.10%和13.97%,其他时间两者无显著差异。

在20~40 cm土层,处理间土壤DOC/SOC差异与0~20 cm土层相似,GSI处理高于其他处理,但仅在还田后0.5 a和1 a差异显著。与CK相比,GSI处理该土层DOC/SOC分别提高13.69%和21.18%,较CCSI处



同一时间不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different small letters at the same time indicate significant difference ($P<0.05$). The same below

图2 不同处理土壤有机碳(SOC)的含量

Figure 2 Soil organic carbon (SOC) contents of different treatments

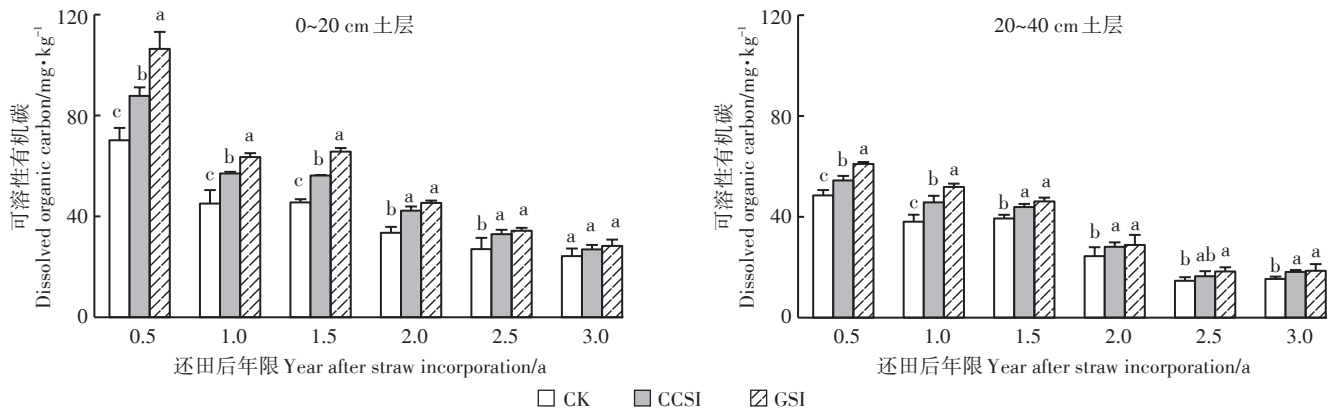


图3 不同处理土壤可溶性有机碳(DOC)的含量

Figure 3 Soil dissolved organic carbon (DOC) contents of different treatments

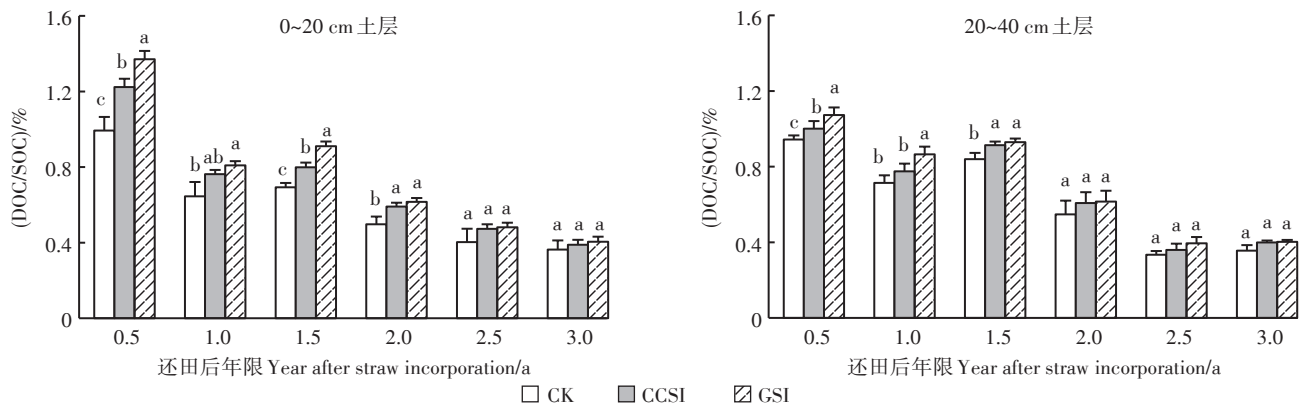


图4 不同处理土壤DOC/SOC的比值

Figure 4 Ratio of DOC/SOC of different treatments

理提高7.19%和11.61%。总体来看,两种秸秆还田方式对土壤DOC/SOC影响可维持2 a,且秸秆颗粒还田对土壤DOC/SOC的提升效果优于常规粉碎还田,尤其是还田后1 a内效果较为突出。

2.4 秸秆颗粒还田对作物产量的影响

从冬小麦产量看,GSI处理第1季小麦产量显著高于CK和CCSI处理,CCSI处理和CK无显著差异(表2)。相对于CK和CCSI处理,GSI处理第1季小麦产量分别增加9.80%和10.82%;而GSI处理和CCSI处理第2季、第3季小麦产量均显著高于CK,与CK相比,GSI处理分别增产5.68%和6.68%,CCSI处理分别增产4.48%和4.57%,GSI处理和CCSI处理无显著差异。

从夏玉米产量看,第1季和第2季表现为GSI>CCSI>CK。与CK相比,GSI处理和CCSI处理第1季玉米增产9.54%和5.89%,第2季增产7.98%和5.57%,差异均达到显著水平;而处理间第3季玉米产量无显著差异。秸秆还田处理中,GSI处理第1季玉米产量较CCSI处理显著提高3.45%,其他生长季两者

无显著差异。总体来看,秸秆还田利于提高作物周年产量,且秸秆颗粒还田当年的增产效果高于常规粉碎还田。

2.5 作物产量与土壤有机碳的相关性分析

由表3可知,小麦和玉米的籽粒产量均与SOC和DOC含量呈极显著正相关关系,且相关系数都随着土层的加深而减小。另外,作物产量与DOC/SOC呈显著正相关,且在玉米生长季,其籽粒产量与20~40 cm土层DOC/SOC呈极显著正相关性。可见,作物产量与SOC和DOC密切相关,且与耕层SOC含量关系更紧密。

2.6 秸秆颗粒还田的经济效益分析

由表4可知,秸秆还田在增加了经济投入的同时,也提高了年经济收益,最终获得较高的净利润。与CK相比,2013—2016年GSI处理和CCSI处理的年均净利润分别提高10.09%和6.63%。在秸秆还田处理中,2013—2016年GSI处理年净利润高于CCSI处理,三年依次提高5.43%、3.10%和1.45%,且在秸秆颗粒还田当年两者差异达到显著水平。

表2 不同处理冬小麦和夏玉米籽粒产量(t·hm⁻²)

Table 2 Grain yield of winter wheat and summer maize under different treatments(t·hm⁻²)

处理 Treatments	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
	第1季	第2季	第3季	第1季	第2季	第3季
CK	5.41±0.11b	5.81±0.01b	5.69±0.02b	10.69±0.04c	10.78±0.08b	10.70±0.11a
CCSI	5.36±0.02b	6.07±0.04a	5.95±0.05a	11.32±0.16b	11.38±0.11a	11.26±0.22a
GSI	5.94±0.18a	6.14±0.04a	6.07±0.03a	11.71±0.11a	11.64±0.32a	11.22±0.19a

注:冬小麦第1、2、3季分别表示还田后0.5、1.5、2.5 a;夏玉米第1、2、3季表示还田后1、2、3 a。

Note: The first, second and third winter wheat indicate 0.5, 1.5 and 2.5 years after straw incorporation. The first, second and third summer maize indicate 1, 2 and 3 years after straw incorporation.

表3 作物产量与土壤有机碳的相关性(r)

Table 3 Correlation between soil organic carbon and grain yield(r)

指标 Index	0~20 cm 土层			20~40 cm 土层		
	土壤有机碳 SOC	可溶性有机碳 DOC	DOC/SOC	土壤有机碳 SOC	可溶性有机碳 DOC	DOC/SOC
小麦产量 Wheat yield	0.956**	0.951**	0.758*	0.744**	0.865**	0.730*
玉米产量 Maize yield	0.907**	0.844**	0.781*	0.870**	0.899**	0.838**

注: * P<0.05, ** P<0.01.

表4 不同处理的经济效益分析

Table 4 Cost-return analysis as affected by different treatments

时间 Time	处理 Treatments	投入/元·hm ⁻² Cost/yuan·hm ⁻²			年收益 ^d /元·hm ⁻²	年净利润/元·hm ⁻²
		秸秆还田 Straw incorporation	其他 Others	共计 Total	Annual revenue/yuan·hm ⁻²	Net profit/yuan·hm ⁻²
2013—2014	CK	0	14 280	14 280	29 350.8±333.5c	15 070.8±333.5b
	CCSI	720 ^a	14 280	15 000	30 167.9±210.9b	15 167.9±210.9b
	GSI	1890 ^b	14 280	16 170	32 161.2±493.0a	15 991.2±493.0a
2014—2015	CK	0	14 280	14 280	30 473.3±121.2b	16 193.3±121.2b
	CCSI	0	14 280	14 280	32 006.2±235.6a	17 726.2±235.6a
	GSI	0	14 280	14 280	32 556.0±480.3a	18 276.0±480.0a
2015—2016	CK	0	14 280	14 280	30 035.8±215.2b	15 755.8±215.2b
	CCSI	0	14 280	14 280	31 525.1±358.5a	17 245.1±358.5a
	GSI	0	14 280	14 280	31 775.9±243.1a	17 495.9±243.1a

注: a: 常规秸秆机械化粉碎还田的费用(720 元·hm⁻²); b: 秸秆颗粒机械化生产的所有费用, 包括运费(150 元·t⁻¹)、电费(65 元·t⁻¹)、人工费(40 元·t⁻¹)、管理费(20 元·t⁻¹)、设备折旧费(20 元·t⁻¹)和维修费(20 元·t⁻¹); c: 作物从播种到收获的所有支出, 包括种子、耕地、播种、肥料、农药和收获等; d: 小麦和玉米的收益之和, 根据当地收购价格, 小麦和玉米的单价分别按照 2460 元·t⁻¹ 和 1500 元·t⁻¹ 计算。

Note: a: Cost of conventional chopped straw incorporation(720 yuan·hm⁻²). b: Costs of making pelletized straw, including freight cost(150 yuan·t⁻¹), electricity cost(65 yuan·t⁻¹), labor cost(40 yuan·t⁻¹), management costs(20 yuan·t⁻¹), depreciation allowances of equipment(20 yuan·t⁻¹) and maintenance costs(20 yuan·t⁻¹) during the production. c: Costs from sowing to harvest straw, such as costs of seeds, tillage, sowing, fertilizer, pesticides and harvest. d: The sum of economic benefits of wheat and maize yield. The prices for wheat and maize was 2460 yuan·t⁻¹ and 1500 yuan·t⁻¹.

3 讨论

土壤有机碳含量是土壤碳素输入与输出平衡的结果^[9-10]。研究表明, 秸秆还田有效增加了土壤有机物质的输入量, 显著提高土壤有机碳含量, 同时还能增强土壤团聚体稳定性, 减少土壤碳排放量, 被公认为提升土壤碳库储量和品质的重要措施^[23-24]。但其固碳能力还受秸秆质量、还田时间等因素影响^[24-25]。本研究结果显示, 与不还田相比, 秸秆颗粒还田和常

规粉碎还田都能增加 0~20 cm 土层土壤有机碳含量, 这与周萍等^[26]研究结果一致, 土壤有机碳在未达到饱和和前, 增加外源有机碳投入能提高土壤有机碳含量。在秸秆还田处理中, 秸秆颗粒还田处理土壤有机碳增幅高于常规粉碎还田处理, 其中在还田后 0.5 年和 1 年增幅尤为显著, 这可能是由于秸秆颗粒在制作过程中, 改变了纤维素形态^[16], 提高了秸秆腐解速率^[18], 加速了秸秆腐殖化进程^[27], 进而短期内大幅提高 0~20 cm 土层有机碳含量。而秸秆还田 1 年后, 各处理土壤

有机碳含量均不同程度地下降,常规粉碎还田和秸秆颗粒还田对土壤有机碳的提升作用也明显减弱,两者无显著差异,这可能与秸秆中大部分易分解物质已被矿化分解,剩下的主要是难分解物质有关^[17,28]。在20~40 cm土层,秸秆还田处理的土壤有机碳含量也高于秸秆不还田,但与0~20 cm土层有所不同,秸秆颗粒还田和常规粉碎还田的差异主要集中在还田当季的小麦成熟期。这可能由于秸秆颗粒体积小、腐解快,施入土壤后改善了后茬作物的生长环境,利于其生长发育,增加土壤外源碳输入量^[29],但具体原因待进一步深入研究。

研究表明,秸秆还田显著提高土壤溶解性有机质含量^[30]。本研究结果与前人相似,秸秆还田利于提高土壤可溶性有机碳含量,且秸秆颗粒还田后1.5年内0~20 cm土层可溶性有机碳含量显著高于常规粉碎还田。这是由于秸秆颗粒破坏了秸秆表皮结构^[16],吸水后,利于秸秆中可溶性有机物溶出,使得等质量秸秆颗粒的可溶性有机碳含量是常规粉碎秸秆的1.78倍(表1),大幅增加了可溶性有机碳的输入量。同时,秸秆颗粒吸水后还原为细小的粉末,大大增加秸秆与土壤的接触面积^[28],能促进秸秆中的有机物质转化为活性有机碳。但随着还田后时间推进,秸秆颗粒还田的提升作用逐渐减弱,在还田后2年两处理间无显著差异。在20~40 cm土层秸秆颗粒还田后1年内玉米成熟期的土壤可溶性有机碳仍显著高于常规粉碎还田,这与土壤有机碳变化不同。究其原因应与夏季降雨较多(图1),促使耕层土壤可溶性有机碳向亚耕层淋溶移动有关。

可溶性有机碳与土壤有机碳的比值(DOC/SOC)常作为反映土壤有机碳活性及其转化速率的重要指标^[30],其值越高说明土壤碳素有效性越高,土壤中养分转化和供应能力较强^[12]。本研究表明,GSI处理和CCSI处理土壤DOC/SOC高于CK处理,这与土壤可溶性有机碳变化相似,说明秸秆还田对土壤活性有机碳的影响高于土壤有机碳。在秸秆还田处理中,GSI处理土壤DOC/SOC高于CCSI处理,且在还田当季差异显著。这一方面是由于秸秆颗粒在粉碎和挤压过程中破坏了秸秆表皮组织,使得维管束扭曲变形^[31],促进秸秆中易溶性物质溶出,大幅提高秸秆颗粒浸提液DOC/SOC,使得秸秆颗粒还田当年土壤DOC/SOC维持较高水平。另一方面,秸秆颗粒的分解速率显著高于常规粉碎秸秆^[18],为微生物提供丰富能源,促进土壤有机质转化为活性有机碳^[32],使得土壤DOC

增加量高于SOC增加量,提高了GSI处理土壤DOC/SOC,这与陈安强等^[33]研究的有机物还田对土壤DOC/SOC无明显影响的结果不同,这可能与两项研究施入土壤的秸秆性质和采样时间不同有关。

多数学者积极肯定了秸秆还田的优点^[9-10]。但也有部分学者研究指出秸秆不合理还田影响秸秆腐解速率^[34],降低当季作物供肥能力,不利于作物生长^[29]。本研究表明,秸秆还田的增产效果与还田秸秆的形态和还田后的时间有关,常规粉碎秸秆还田当季的小麦产量与不还田无显著差异,而秸秆颗粒还田处理显著高于不还田。这可能是由于秸秆颗粒化还田提升了还田质量,有效避免了常规粉碎秸秆还田造成的群体数量不足的问题^[29];另一方面则是由于秸秆颗粒还田处理显著提高土壤有机碳和可溶性有机碳含量,为微生物提供较多的能源,利于土壤中有机态氮、磷的转化^[10-11],提高了当季肥效,利于小麦增产。进一步相关分析发现,作物产量与0~20 cm土层土壤有机碳和可溶性有机碳的相关性高于20~40 cm土层。这说明作物增产与秸秆还田层土壤碳素供给能力密切相关。

在农业生产中,适宜的农田管理措施,除了要保证土壤可持续发展,还要兼顾作物的经济效益。本研究结果显示,秸秆还田能补充土壤有机质,提升土壤有机质的含量和品质,促进小麦、玉米增产,尤其是秸秆颗粒化还田,能短期内提高土壤活性有机碳含量,增强土壤碳素供给能力,显著提高小麦籽粒产量,获得较高的经济收益。进一步分析发现,秸秆颗粒还田由于制作过程比常规粉碎还田复杂,增加了额外的运输费用和制作成本,导致每公顷耕地的年投入是常规粉碎还田的2.6倍(表4)。但综合分析发现,秸秆颗粒还田处理由于增产带来的经济收益高于其增加的投入,进而获得较高的年净利润。此外,秸秆颗粒化后体积缩小了80%左右。施入土壤后不仅大幅提高秸秆还田质量,更能实现秸秆的多倍量还田,快速提高土壤肥力。与此同时,秸秆颗粒还田能根据不同地区的土壤养分状况,以秸秆为主料,配施不同比例的无机肥制成颗粒肥,因地制宜地改良土壤。但目前秸秆颗粒的成本仍然较高,且制作工艺对其培肥效果的影响机制仍不清楚,因此,秸秆颗粒化还田作为一种新型的还田方式仍需要进一步深入研究。

4 结论

(1)秸秆还田能提高0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳和可溶性有机碳含量,但增加幅度随着还田

后时间的延长而降低。相对于常规粉碎还田,秸秆颗粒还田利于土壤有机碳短期内快速积累,显著提高还田当年0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳和可溶性有机碳含量,增加土壤DOC/SOC,增强还田当年作物生长期土壤碳素供给能力。

(2)秸秆还田能提高作物产量,且秸秆颗粒还田的增产幅度高于常规粉碎还田,其还田当年的小麦产量和玉米产量分别比常规粉碎还田显著提高10.82%和3.45%,但随着还田后时间推进,秸秆颗粒还田的增产作用逐渐减弱,两者差异不显著。

(3)小麦和玉米的籽粒产量与0~20 cm和20~40 cm两土层土壤有机碳、可溶性有机碳呈极显著正相关,与土壤DOC/SOC呈显著正相关,且相关系数随着土层加深而降低,说明作物产量与耕层土壤有机碳的关系更加密切。

(4)与不还田相比,秸秆还田增加了经济投入,且秸秆颗粒还田增幅高于常规粉碎还田,但由于其具有更高的经济效益,最终秸秆颗粒还田表现出较高的年净利润。

综上所述,在黄淮海麦玉轮作区,秸秆颗粒还田能有效解决秸秆腐解慢、土秸混合程度差和当季土壤供肥不足的问题,但秸秆颗粒还田快速培肥效应是否受秸秆种类和还田量的影响仍不清楚,秸秆颗粒还田作为一种新型的还田方式有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 路文涛,贾志宽,张鹏,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522-528.
- [2] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741-1749.
WU Ji, GUO Xi-sheng, LU Jian-wei, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1741-1749.
- [3] 李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463-465.
LI Shao-kun, WANG Ke-ru, FENG Ju-kai, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463-465.
- [4] 贾春林,郭洪海,张勇,等. 玉米秸秆全量还田下不同播种方式对土壤结构及小麦苗期生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 243-248.

- JIA Chun-lin, GUO Hong-hai, ZHANG Yong, et al. Effects of different seeding manner on the soil structure and wheat seedling growth under maize stalk full returned to the field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(8): 243-248.
- [5] 方放,李想,石祖梁,等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228-234.
FANG Fang, LI Xiang, SHI Zu-liang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 228-234.
- [6] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345-350.
LI Chang-sheng. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agro-ecosystem carbon pool in China and the U. S. [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 345-350.
- [7] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [8] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [9] 邱建军,王立刚,李虎,等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161.
QIU Jian-jun, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154-161.
- [10] 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.
- [11] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原不同乔木林下土壤微生物碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3589-3605.
ZENG Quan-chao, LI Xin, DONG Yang-hong, et al. Study on soil microbial biomass nitrogen and carbon, water soluble nitrogen and carbon under different arbors forests on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3589-3605.
- [12] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015, 135: 283-289.
- [13] 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.
- [14] 窦森,陈光,关松,等. 秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(2): 127-133.
DOU Sen, CHEN Guang, GUAN Song, et al. Why burning of corn sto-

- ver in fields and technical models studies of it's deep incorporation to subsoil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2017, 39(2): 127-133.
- [15] Angers D A, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size[J]. *Plant and Soil*, 1997, 189: 197-203.
- [16] Bremer E, Van Houtum W, Van Kessel C. Carbon dioxide evolution from wheat and lentil residues as affected by grinding, added nitrogen, and the absence of soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11: 221-227.
- [17] 张 鹏, 李 涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2518-2525.
- ZHANG Peng, LI Han, JIA Zhi-kuan, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518-2525.
- [18] 王 婧, 张 莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 177-183.
- WANG Jing, ZHANG Li, PANG Huan-cheng, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 177-183.
- [19] 郑 健, 王 燕, 蔡焕杰, 等. 秸秆颗粒形态对沟灌入渗特征影响的试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(1): 66-72.
- ZHENG Jian, WANG Yan, CAI Huan-jie, et al. Experimental investigation into effects of maize leaf and straw fragments on soil water infiltration characteristics in furrow irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(1): 66-72.
- [20] Devêvre O C, Horváth W R. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1773-1785.
- [21] Yilmaz E, Wzorek M, Akçay S. Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 216: 169-175.
- [22] 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. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488-500.
- LI Wen-jun, PENG Bao-fa, YANG Qi-yong. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 488-500.
- [24] 张 鹏, 贾志宽, 王 维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 45(8): 1513-1520.
- ZHANG Peng, JIA Zhi-kuan, WANG Wei, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1513-1520.
- [25] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 563-570.
- ZOU Wen-xiu, HAN Xiao-zeng, LU Xin-chun, et al. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 563-570.
- [26] 周 萍, 潘根兴, 李恋卿, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制 V. 碳输入与土壤碳固定[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(12): 4260-4268.
- ZHOU Ping, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. SOC enhancement in major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China. V. Relationship between carbon input and soil carbon sequestration[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12): 4260-4268.
- [27] 江晓东, 迟淑筠, 王 芸, 等. 少免耕对小麦/玉米农田玉米还田秸秆腐解的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 247-251.
- JIANG Xiao-dong, CHI Shu-yun, WANG Yun, et al. Effect of less tillage and no-tillage patterns on decomposition of returned maize straw in wheat/maize system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 247-251.
- [28] Garnier P, Cambier C, Bousso M, et al. Modeling the influence of soil-plant residue contact on carbon mineralization: Comparison of a compartmental approach and a 3D spatial approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2754-2761.
- [29] 张 莉, 王 婧, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1770-1778.
- ZHANG Li, WANG Jing, PANG Huan-cheng, et al. Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1770-1778.
- [30] 卢 萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 736-741.
- LU Ping, SHAN Yu-hua, YANG Lin-zhang, et al. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 736-741.
- [31] 徐广印, 沈胜强, 胡建军, 等. 秸秆冷态压缩成型微观结构变化的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(3): 273-278.
- XU Guang-yin, SHEN Sheng-qiang, HU Jian-jun, et al. Experimental study on the micro structure changes in the process of cold molding with straw[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(3): 273-278.
- [32] Zsolnay A, Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: Effects of drought and long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(9): 1257-1261.
- [33] 陈安强, 付 斌, 鲁 耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160-167.
- CHEN An-qiang, FU Bin, LU Yao, et al. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 160-167.
- [34] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 135-138.
- LI Xin-ju, ZHANG Zhi-guo, LI Yi-xue. Effect of soil depth on decay speed of straw[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 135-138.