

玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵, 李建明

引用本文:

李虎, 吴景贵, 李建明. 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1944–1953.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

麦秸秸秆花盆堆肥化研究及评价

黄红英, 孙恩惠, 武国峰, 曲萍, 常志州, 徐跃定

农业环境科学学报. 2015(12): 2386–2393 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.019>

秸秆、木质素及其生物炭对潮土CO₂释放及有机碳含量的影响

张杰, 黄金生, 刘佳, 刘荣乐

农业环境科学学报. 2015(2): 401–408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.026>

冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响

周玲红, 张浪, 魏甲彬, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤, 唐剑武, 唐启源

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1961–1969 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1389>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李虎, 吴景贵, 李建明. 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1944–1953.

LI H, WU J G, LI J M. Effects of strip composting for corn straw combined with livestock manure on soil active organic carbon[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(9): 1944–1953.



开放科学 OSID

玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵*, 李建明

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要:为明确秸秆田间条带堆腐在农业生产中推广应用的可能性,以吉林省范家屯农业科技示范园黑土为研究对象,探讨秸秆添加不同畜禽粪便田间条带堆腐还田对土壤活性有机碳的影响。以玉米秸秆为供试材料,进行田间堆腐试验,设置本地秸秆覆盖还田(即对照,CK)、秸秆条带堆腐无畜禽粪便(ST)、秸秆条带堆腐+腐熟猪粪(STP)、秸秆条带堆腐+腐熟鸡粪(STC)4个处理。通过测定土壤有机碳(SOC)、土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤溶解性有机碳(DOC)、土壤易氧化有机碳(EOC),综合分析土壤活性有机碳的含量和碳库管理指数(CPMI)。结果表明:秸秆条带堆腐还田各处理土壤SOC、MBC、EOC、DOC含量均高于CK处理,其中秸秆条带还田添加畜禽粪便处理更为显著,各活性碳组分含量较CK处理呈升高趋势。相关性分析表明田间条带堆腐土壤SOC、DOC、EOC、CPMI间呈现显著或极显著正相关,与氧化稳定系数(K_{oc})显著或极显著负相关。玉米秸秆条带堆腐还田有效增加土壤SOC、MBC、DOC、EOC含量,秸秆添加不同畜禽粪便处理中鸡粪更显著增加土壤有机碳和土壤活性有机碳含量,增加CPMI,降低 K_{oc} ,对改善黑土碳库质量有着积极的作用。

关键词:秸秆条带堆腐;畜禽粪便;土壤活性有机碳;土壤碳库管理指数

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)09-1944-10 doi:10.11654/jaes.2021-0023

Effects of strip composting for corn straw combined with livestock manure on soil active organic carbon

LI Hu, WU Jinggui*, LI Jianming

(College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: To evaluate the effects of applying straw strip *in-situ* composting in agricultural production, the effects on the distribution of soil active organic carbon in straw *in-situ* strip composting in the field combined with the application of different livestock and poultry manures were determined. The black soils in the agricultural science and technology demonstration park in Fanjiatun, Jilin Province, were used as experimental objects. Corn stalks were used as the test material to conduct field *in-situ* composting experiments, where the treatments under study included conventional straw return to the field (CK), straw strip return (ST), straw strip + pig manure (STP), and straw strip + chicken manure (STC). Soil organic carbon (SOC), soil microbial biomass carbon (MBC), soil dissolved organic carbon (DOC), and soil easily oxidizable organic carbon (EOC) were measured. Moreover, the content of each component of activated organic carbon was analyzed, and the carbon pool management index (CPMI) was calculated. The results showed that the contents of SOC, MBC, DOC, and EOC in the treatments with strip straw composting were all higher than those of the CK treatment. Among the treatments, the strip straw treatments

收稿日期:2021-01-08 录用日期:2021-05-10

作者简介:李虎(1994—),男,内蒙古赤峰人,硕士,主要从事土壤有机培肥及农业废弃物资源化利用研究。E-mail:1753978430@qq.com

*通信作者:吴景贵 E-mail:wujingguiok@163.com

基金项目:吉林省科技厅攻关项目(20190301018NY);国家重点研发计划项目(2018YFD0300203,2017YFD0201801)

Project supported: Jilin Province Science and Technology Department Research Project (20190301018NY); The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0300203, 2017YFD0201801)

combined with livestock and poultry manure were more effective in increasing the content of active carbon components compared with that of the CK. Correlation analysis also showed there was a significant positive correlation between SOC, DOC, EOC, and *CPMI* in the strip-straw-composted soil, whereas these parameters had a highly significant negative correlation with the oxidation stability coefficient (K_{as}). The strip straw composting method of returning straw to the field effectively increased the content of SOC, MBC, DOC, and EOC in the soil. Chicken manure was more conducive to increasing soil organic carbon content, whereas the treatments with straw combined with livestock and poultry manure were more effective in increasing the soil active organic carbon content, increasing the *CPMI*, and reducing K_{as} . The findings of this study reveal that the straw *in-situ* strip composting method combined with the application of different livestock and poultry manures has a positive effect on improving the quality of the black soil carbon pool.

Keywords: straw strip composting; livestock manure; active soil organic carbon; soil carbon pool management index

中国是玉米种植大国,秸秆产量大且呈逐年增多的趋势,因此秸秆还田成为政府和农业工作者大力倡导的土壤培肥途径之一。玉米秸秆内含有丰富的氮、磷、钾、钙、镁等多种元素,是农业生产中重要的肥料来源^[1]。秸秆还田能够改善土壤物理性状,提高土壤生物活性,可有效降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,使耕层土壤变得疏松,秸秆还田后减少环境污染,是发展可持续农业的有效措施^[2]。不同秸秆还田方式对土壤有机碳(SOC)固定及其机理等是国内外学者研究的重点^[3-4]。张鑫等^[5]、刘颖颖等^[6]研究表明秸秆还田对农业生产力发展具有积极的推动作用,能够促进作物生长发育,提高产量。目前秸秆还田的方式主要有:秸秆覆盖还田、秸秆旋耕还田、秸秆深翻还田^[7]。相关研究表明,秸秆覆盖还田容易造成地表温度过低,出苗延迟,还会造成大部分碳矿化流失,不能被有效利用^[8]。秸秆旋耕还田由于秸秆破碎程度不好,与土壤接触不良,易造成漏风跑墒的现象,影响下一季作物播种^[9]。秸秆深翻还田可以使秸秆碳被土壤固定,促进养分积累,但需要依靠大型机械,资金投入较高^[10]。陈素英等^[11]研究发现地区气候、秸秆还田方式、还田数量、土壤性质、环境等因素会影响土壤蓄水保墒、温度以及杂草生长等,从而造成减产^[12]。不同的耕作和施肥措施是改变有机碳组分的重要原因,也是影响土壤养分转化的主要驱动力^[13]。徐明岗等^[14]应用活性有机碳组分和碳库管理指数客观评价了长期定位耕作和施肥对红壤、黑土等土壤质量和土壤管理指数的影响。

土壤有机碳是评价土壤质量状况不可或缺的重要指标^[15]。土壤活性有机碳库极易受外界条件的影响,是土壤最敏感的有机碳库^[16],能更敏感地响应土壤耕作、施肥管理、植物残体和有机畜禽粪还田等农业管理措施^[17]。土壤可溶性有机碳(DOC)虽然占总有机碳很小的一部分,但它参与了生物化学的转化过

程,是土壤微生物可直接利用的有机碳源,并影响着土壤中有机、无机物质的转化、迁移和降解^[18]。土壤微生物生物量碳(MBC)是土壤有机碳库中最活跃和最易变化的部分,同时也是土壤中易于利用的养分库及有机畜禽粪分解的动力^[19]。土壤易氧化有机碳(EOC)是土壤有机碳中周转最快的组分,能有效地反映土壤有机碳库受环境变化的影响^[20]。活性有机碳能够高效直接地供给植物养分,容易被土壤微生物分解利用,因此活性有机碳被认为是评价土壤碳库早期动态变化的良好指标^[21]。

我国畜禽粪便资源丰富,据相关统计,数量可达 3.16×10^9 t,从畜禽粪便养分资源量看,总养分量来源以猪最大,其次为肉牛、羊和家禽,分别占总量的28.2%、22.8%、15.0%和14.0%^[22]。畜禽粪便施入田中,通过促进土壤微生物的一系列相关活动来加快秸秆的有效分解,作为腐解剂可以实现秸秆快速还田,提升土壤速效养分^[23]。本试验中施用的腐熟猪粪与鸡粪均采自于试验田附近,既可减少环境污染,又可有效利用废弃资源,对于农业的可持续发展有重要意义。

针对东北黑土肥力下降、秸秆还田模式存在缺陷等问题,本研究旨在寻求最佳秸秆还田方式,缩短秸秆腐解时间,提高土壤质量,在减少资金投入、不影响植株出苗的同时,促进土壤养分积累。本试验设计了秸秆田间条带堆腐还田方法,即将秸秆与畜禽粪便集条带混合。通过测定土壤活性碳库中的溶解性有机碳、易氧化有机碳、微生物碳及有机碳的含量,综合分析两年秸秆田间条带堆腐土壤活性有机碳的变化特征,为新型秸秆还田方式应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省公主岭市陶家镇科技示范园

区(43°65′02″N, 124°98′60″E)。属于寒温带大陆性季风气候区,年平均气温4~5℃,年平均降雨量450~600 mm,且70%集中在6、7、8月份;无霜期125~140 d,有效积温2 600~3 000℃,年蒸发量1 200~1 600 mm,是典型的黑土。土壤理化性质为:碱解氮119.13 mg·kg⁻¹,速效磷38.04 mg·kg⁻¹,速效钾134.27 mg·kg⁻¹,有机质27.55 g·kg⁻¹,pH值7.08。

1.2 试验设计与样品采集

本试验始于2019年4月,试验采用随机区组设计,根据当地秸秆还田习惯共设置4个处理:秸秆覆盖还田(即对照,CK)、玉米秸秆条带还田(ST)、玉米秸秆条带还田+猪粪(STP)、玉米秸秆条带还田+鸡粪(STC)。试验小区的面积为40 m²,垄宽0.65 m,垄长5 m,每小区设置12垄,每个处理进行3次重复。田间管理同大田,供试作物为玉米(优旗698),每年种植一季玉米。本试验供试有机畜禽粪便均来自试验地科技示范园,畜禽粪便经无害化处理直接还田利用,符合《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)的要求,供试有机物料的基本性质见表1。

表1 物料基本性质(g·kg⁻¹)

Table 1 Basic properties of materials(g·kg⁻¹)

物料 Material	全氮含量 Total nitrogen content	全磷含量 Total phosphorus content	全钾含量 Total potassium content	有机碳含量 Organic carbon content
秸秆	8.25±0.11	1.18±0.05	11.27±0.07	482.86±2.84
猪粪	20.04±0.04	7.23±0.03	8.45±0.14	272.63±6.48
鸡粪	16.86±0.12	7.86±0.02	12.23±0.02	253.44±3.36

在本试验中(2019—2020年),秸秆全量还田量为10 000 kg·hm⁻²,还田次数为1次(时间为2019年4月)。添加粪肥量(总碳含量为545.260 kg·hm⁻²)分别为:猪粪2 000 kg·hm⁻²、鸡粪2 151 kg·hm⁻²,化肥施用量为当地常规施用量(化肥为复混肥N+P₂O₅+K₂O,质量比为24:10:15,总养分≥49%,施用量为824 kg·hm⁻²)。采用玉米秸秆田间原位堆腐,秸秆每隔6垄归拢成一个条带(带宽60~80 cm,长5 m),每个小区内有两个条带,玉米秸秆粉碎至10 cm以下。春耕时将称好的猪粪、鸡粪与粉碎的玉米秸秆混合,然后覆土镇压,覆土厚度为2~5 cm。

1.3 样品测定

在玉米播种后,分别在60、90、120、150、360、540 d进行土壤样品的采集。CK处理取样位置为距玉米植株10~20 cm处0~20 cm土层,秸秆条带堆腐还田取样位置为条带堆腐边和条带堆腐下,条带边为两边距

条带10~20 cm处0~20 cm土层(堆边),两边土样混合为一个土样,条带下在下方0~20 cm土层(堆下)取样。将待测土壤装入自封袋中,土壤样品带回实验室后分成两部分,一部分鲜样过2 mm筛,对土壤微生物量碳(MBC)和土壤溶解性有机碳(DOC)进行测定,另一部分样品风干后,分别过1 mm和0.25 mm筛,进行土壤基本理化性质和其他活性碳组分的测定^[24]。土壤有机碳测定采用重铬酸钾法-外加热法^[25],微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄提取法^[26],土壤易氧化有机碳采用KMnO₄氧化法^[13],土壤溶解性有机碳采用0.5 mol·L⁻¹硫酸钾浸提法^[15]。

1.4 计算公式

$$A=Q_{\text{EOC}}/(Q_{\text{SOC}}-Q_{\text{EOC}})$$

$$AI=A/A'$$

$$CPI=Q_{\text{SOC}}/Q_{\text{SOC}}'$$

$$CPMI=CPI \times AI \times 100\%$$

$$K_{\text{oc}}=Q_{\text{SSOC}}/Q_{\text{EOC}}$$

$$Q_{\text{SSOC}}=Q_{\text{SOC}}-Q_{\text{EOC}}$$

式中:A为碳库活性; Q_{EOC} 为土壤易氧化有机碳含量, g·kg⁻¹; Q_{SOC} 为土壤有机碳含量, g·kg⁻¹; AI为碳库活性指数; A'为参考碳库活性; CPI为碳库指数; Q_{SOC}' 为参考有机碳含量, g·kg⁻¹; CPMI为碳库管理指数; Q_{SSOC} 为土壤稳定性有机碳含量, g·kg⁻¹; K_{oc} 为氧化稳定系数。

1.5 数据处理与分析

所有测得数据均采用Excel 2010、Origin 2017 进行整理、计算和绘图,采用SPSS 13.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 对土壤有机碳含量的影响

秸秆田间条带堆腐还田添加畜禽粪对土壤SOC含量的影响如图1所示,各处理均不同程度增加土壤SOC含量,SOC含量在60 d至540 d呈现先增加后降低再增加的趋势。堆边各处理土壤SOC平均含量依次为STC(22.72 g·kg⁻¹)>STP(21.99 g·kg⁻¹)>ST(20.85 g·kg⁻¹)>CK(19.49 g·kg⁻¹)。堆腐150 d时各处理SOC含量与CK相比显著增加,STC、STP、ST处理土壤SOC较CK提高了3.09%~12.05%。540 d时STC、STP、ST处理土壤SOC含量较CK处理提高了5.71%~15.35%,均存在显著性差异。堆下各处理土壤平均SOC含量在22.12~24.67 g·kg⁻¹,表现为STC>STP>ST>CK。150 d时STC、STP、ST、CK处理土壤SOC含量分

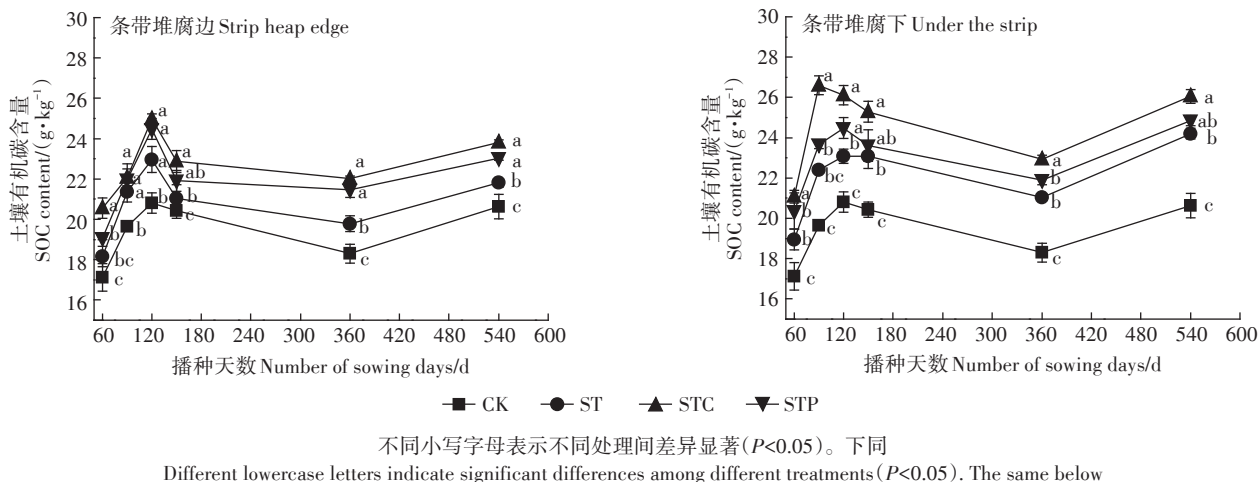


图1 玉米秸秆田间条带堆腐对土壤有机碳含量的影响

Figure 1 Effects of strip composting of corn straw in the field on the content of soil organic carbon

别为 25.29、23.61、23.08、20.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 540 d 时 STC、STP、ST、CK 处理土壤 SOC 含量分别为 26.05、24.85、24.20、20.63 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。连续两年秸秆条带堆腐还田添加畜禽粪便处理 SOC 含量均高于 ST 与 CK 处理,其中以添加鸡粪处理效果最佳,与 CK 处理相比, SOC 含量平均增加了 26.42%。

2.2 对土壤微生物碳含量的影响

由图 2 可知,各处理土壤 MBC 含量在 60~540 d 呈现先增加后降低再升高的趋势,在 90 d 时各处理土壤 MBC 含量达到最大值。堆边各处理土壤平均 MBC 含量依次为 STC ($149.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > STP ($141.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > ST ($124.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > CK ($107.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。与 CK 处理相比,秸秆条带堆腐各处理在 60、90、120、150、360、540 d 土壤 MBC 含量分别提高了 5.94%~45.72%、13.03%~30.25%、18.32%~49.41%、18.53%

~33.97%、14.12%~29.73%、21.22%~42.49%。堆下各处理土壤平均 MBC 含量在 $144.21 \sim 179.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,表现为 STC > STP > ST > CK。与 CK 处理相比,秸秆条带堆腐各处理在 60、90、120、150、360、540 d,土壤 MBC 含量分别提高 23.90%~70.10%、41.96%~80.92%、38.79%~99.40%、29.88%~41.32%、25.93%~38.06%、38.16%~463.39%。与 150 d 相比,540 d 后堆边 STC、STP、ST 处理分别提高 17.62%、15.38%、13.10%,堆下 STC、STP、ST 处理分别提高 27.85%、24.68%、17.63%。

2.3 对土壤溶解性有机碳的影响

秸秆田间条带堆腐各处理均提高了土壤溶 DOC 含量,如图 3 所示,在 60~540 d 呈现先增加后下降再增加的趋势,并且各处理在 90 d 时达到最大值,表现为 STC > STP > ST > CK。与 CK 处理相比,堆边 STC、

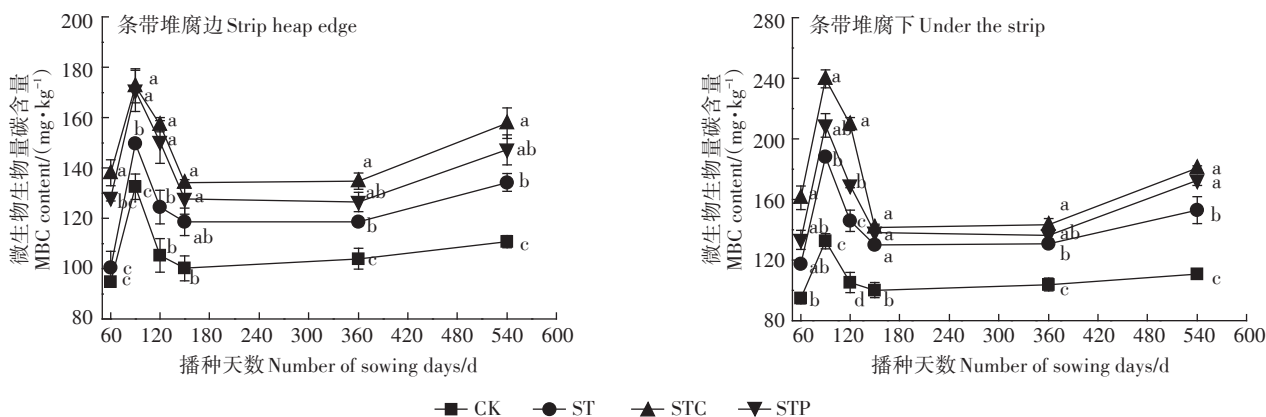


图2 玉米秸秆田间条带堆腐对土壤微生物量碳含量的影响

Figure 2 Effects of strip composting of corn straw in the field on the content of soil microbial biomass carbon

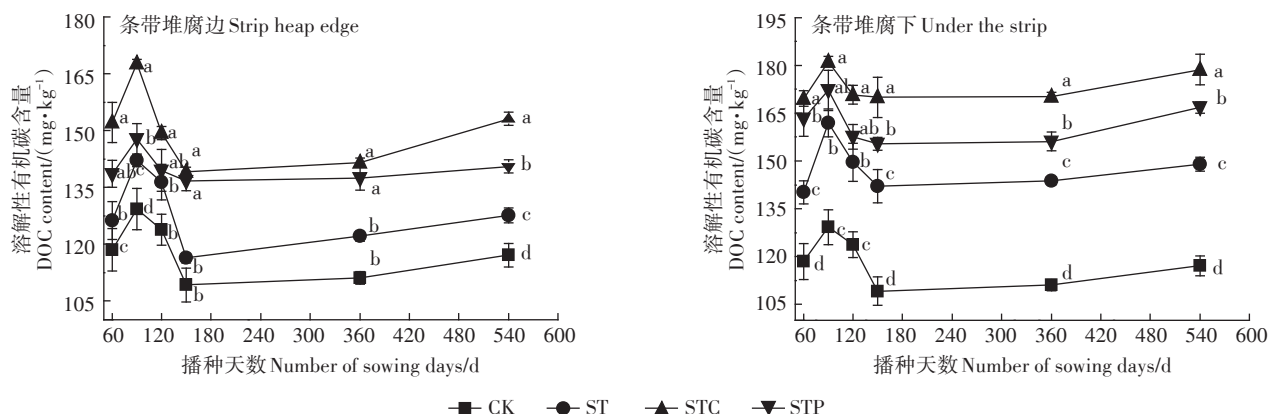


图3 玉米秸秆田间条带堆腐对土壤溶解性有机碳含量的影响

Figure 3 Effects of strip composting of corn straw in the field on the content of soil dissolved organic carbon

STP、ST处理在150 d时土壤DOC含量分别增加27.46%、25.19%、6.54%，在540 d时土壤DOC含量分别增加30.75%、19.99%、8.90%，各处理均差异显著。与CK处理相比，堆下STC、STP、ST处理在150 d时土壤DOC含量分别增加55.67%、42.32%、30.16%，在540 d时土壤DOC含量分别增加52.60%、42.46%、27.24%，各处理间均差异显著。与150 d相比，540 d时堆边STC、STP、ST处理提高了2.80%~10.02%，堆下STC、STP、ST处理提高了4.84%~13.79%。

2.4 对土壤易氧化有机碳的影响

秸秆田间条带堆腐各处理对土壤EOC的影响如图4所示，各处理均提高土壤EOC含量，其中添加畜禽粪便处理提升幅度更大，与空白处理差异显著。随着采样期的延长，土壤EOC含量呈先增加后降低再增加的趋势，在90 d时EOC含量最高。堆边150 d时各处理土壤均显著高于CK处理。540 d时STC和STP处理与CK相比，土壤EOC含量显著提升，而STC

与STP处理间差异不显著。堆下各处理在150 d时EOC含量显著高于CK处理，540 d时各处理间EOC含量均存在显著差异。与150 d相比，540 d堆边土壤EOC各处理提高了5.52%~18.49%，堆下各处理提高了11.52%~22.35%。

2.5 对土壤碳库管理指数的影响

土壤的CPMI是评价有机碳的重要指标，由表2可知，秸秆田间条带堆腐对提高CPMI、CPI、AI、A具有积极意义。与CK处理相比，堆边STC、STP、ST处理土壤CPMI分别提高了152.38%、126.15%、28.86%，土壤CPI分别提高了15.38%、11.54%、5.38%，土壤AI分别提高了119.48%、102.60%、22.08%，土壤A分别提高了117.74%、101.61%、20.97%。与ST处理相比，STC、STP处理土壤CPMI分别提高了95.86%、75.51%，土壤CPI分别提高了9.49%、5.84%，土壤AI分别提高了79.79%、65.96%，土壤A分别提高了80.00%、66.67%。与CK处理相

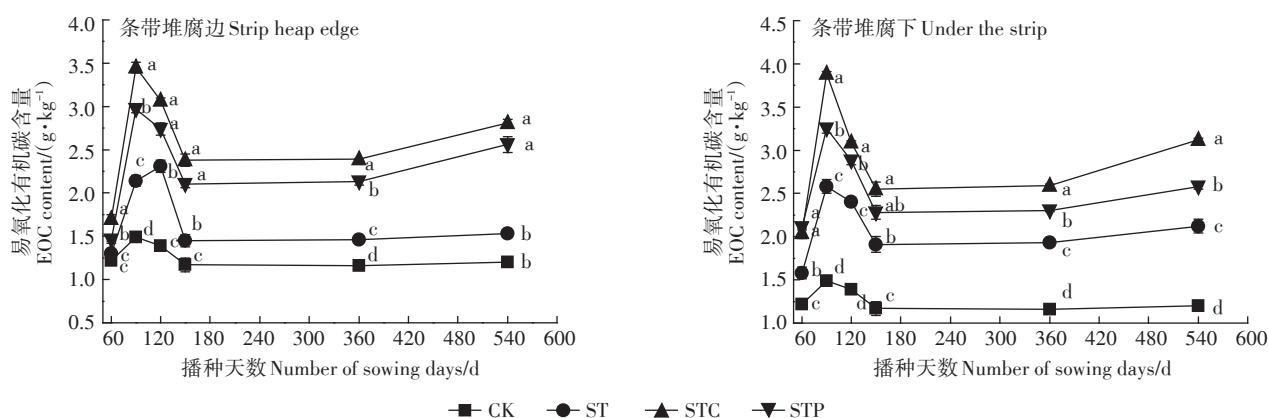


图4 玉米秸秆田间条带堆腐对土壤易氧化有机碳含量的影响

Figure 4 Effects of strip composting of corn straw field on the content of soil oxidizable organic carbon

表2 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对土壤碳库管理指数的影响

Table 2 Effects of adding livestock and poultry manure and corn straw field strip composting on soil carbon pool management index

取样位置 Sampling location	处理 Treatment	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CPMI
条带堆腐边 Strip heap edge	CK	0.062±0.001b	0.77±0.01b	1.30±0.04c	100.29±1.88b
	ST	0.075±0.002b	0.94±0.03b	1.37±0.01b	129.23±2.74b
	STC	0.135±0.022a	1.69±0.28a	1.50±0.01a	253.11±10.78a
	STP	0.125±0.006a	1.56±0.07a	1.45±0.01a	226.81±9.67a
条带堆腐下 Under the strip	CK	0.062±0.001d	0.77±0.01d	1.30±0.04c	100.29±1.87d
	ST	0.097±0.005c	1.21±0.06c	1.52±0.02b	183.62±8.08c
	STC	0.136±0.001a	1.70±0.01a	1.64±0.02a	279.00±2.21a
	STP	0.116±0.003b	1.45±0.04b	1.57±0.02ab	226.64±3.66b

注:表中数据为施用畜禽粪540 d的数据。表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The data in the table are the data of 540 days of application of animal manure. The data in the table are the mean±standard deviation; different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

比,堆下STC、STP、ST处理土壤CPMI分别提高了178.19%、125.98%、83.09%,土壤CPI分别提高了26.15%、20.77%、16.92%,土壤AI分别提高了120.78%、83.12%、57.14%,土壤A分别提高了119.35%、87.10%、56.45%。与ST处理相比STC、STP处理土壤CPMI分别提高了51.94%、23.43%,土壤CPI分别提高了7.89%、3.29%,土壤AI分别提高了40.50%、19.83%,土壤A分别提高了40.21%、19.59%。秸秆条带堆腐添加畜禽粪便处理与CK处理差异显著,显著增加土壤AI、CPI、CPMI,说明土壤中有有机碳分解更快,且质量更高。

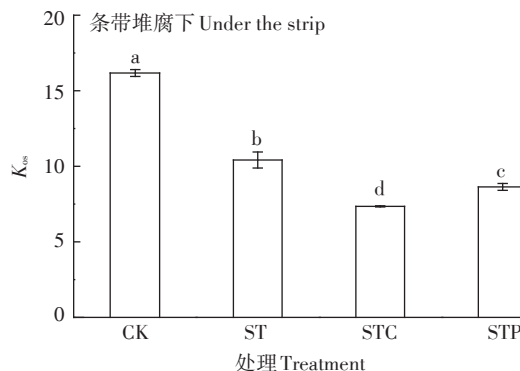
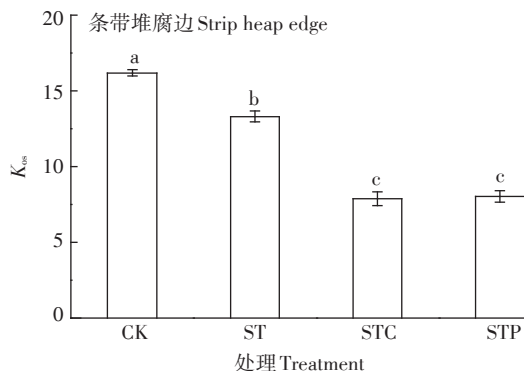
2.6 对土壤氧化稳定系数的影响

氧化稳定性是土壤有机碳的重要性质之一,关系到土壤有机碳分解的难易程度以及养分释放。通常使用氧化稳定系数(K_{os})来衡量土壤的氧化稳定性, K_{os} 值越大,氧化稳定性越大,反之则越小。秸秆条带

堆腐对土壤 K_{os} 的影响如图5所示,各处理间 K_{os} 含量存在较大差异,表现为CK>ST>STP>STC。堆边STC、STP、ST处理较CK分别降低了51.39%、50.41%、17.81%。堆下STC、STP、ST处理较CK分别降低了54.59%、46.64%、35.63%。

2.7 土壤有机碳组分与土壤碳库管理指数的相关性

土壤有机碳与活性有机碳各组分、CPMI及 K_{os} 相关分析见表3,堆边土壤SOC、DOC、MBC、EOC与CPMI呈极显著正相关,相关系数分别为0.804、0.861、0.827、1.000,SOC、DOC、MBC、EOC与 K_{os} 呈极显著负相关,相关系数分别为-0.827、-0.892、-0.868、0.977。堆下SOC、DOC、EOC、MBC与CPMI呈极显著正相关,相关系数分别为0.935、0.969、0.936、1.000,SOC、DOC、EOC、MBC与 K_{os} 极显著负相关,相关系数分别为-0.929、-0.967、-0.941、-0.976。秸秆田间条带堆腐土壤SOC和土壤活性有机碳组分与CPMI间有着



图中所用数据为施用畜禽粪540 d土壤指标

The data used in the figure are soil indicators of 540 days of the application of livestock manure

图5 玉米秸秆田间条带堆腐对土壤氧化系数的影响

Figure 5 Effects of strip composting of corn straw in the field on soil oxidation coefficient

表3 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐土壤有机碳组分与碳库管理指数相关系数

Table 3 Correlation coefficient between active organic carbon and carbon pool management index of strip composting soil in the field with corn straw adding livestock manure

		SOC	DOC	MBC	EOC	CPMI	K_{os}
条带堆腐边 Strip heap edge	SOC	1	0.871**	0.893**	0.816**	0.804**	-0.827**
	DOC		1	0.883**	0.869**	0.861**	-0.892**
	MBC			1	0.836**	0.827**	-0.868**
	EOC				1	1.000**	-0.977**
	CPMI					1	-0.972**
	K_{os}						1
条带堆腐下 Under the strip	SOC	1	0.914**	0.952**	0.940**	0.935**	-0.929**
	DOC		1	0.960**	0.970**	0.969**	-0.967**
	MBC			1	0.940**	0.936**	-0.941**
	EOC				1	1.000**	-0.976**
	CPMI					1	-0.973**
	K_{os}						1

注:相关分析所用数据为施用畜禽粪540 d土壤各项指标,*显著($P<0.05$),**极显著($P<0.01$)。

Note: The data used in the correlation analysis are the various indexes of the soil after applying livestock manure for 540 days, *significant ($P<0.05$), **very significant ($P<0.01$).

密切的关系,因此土壤 CPMI 能够很好地表示土壤的碳素变化。

3 讨论

3.1 玉米秸秆田间条带堆腐添加畜禽粪便对土壤 SOC 的影响

秸秆还田作为农田管理过程中重要的技术措施,是提高土壤 SOC 含量和培肥地力的重要途径^[27]。张银平等^[28]研究发现,秸秆粉碎混土还田较秸秆免耕覆盖还田更有利于秸秆的腐解和土壤肥力的提升。李江涛等^[29]研究也证实了这一点,施用畜禽粪便有机肥有利于土壤 SOC 的积累,一方面促进作物根系和土壤微生物活动,增加土壤中的有机代谢物,另一方面施用有机肥能够为土壤提供有机碳源,增加土壤中总有机碳含量,这与本研究结果相一致。秸秆条带堆腐还田各处理与 CK 处理相比更有利于 SOC 的储存,可能是因为秸秆还田方式发生了改变,条带堆腐使用粉碎秸秆(10 cm 以下),并且在秸秆条带上覆土镇压,有利于秸秆内部的保温保湿效果,从而加快秸秆的腐解,且外源有机肥的添加为微生物提供了大量能源,能够促进秸秆的更快速分解,从而增加土壤中的养分积累^[30]。本研究中秸秆条带堆腐添加鸡粪较 CK 处理土壤 SOC 平均含量增加 12.42%~35.44%,秸秆条带添加猪粪较 CK 处理增加 11.27%~20.47%,并且 STP、STC 处理与 ST、CK 处理 SOC 含量存在显著性差异,证明秸秆条带堆腐添加畜禽粪便处理能够显著增加土

壤 SOC 含量,因此秸秆条带堆腐添加畜禽粪便不仅能够调节土壤的碳氮比,还能对秸秆的腐解起到正激发作用,促进 SOC 的积累^[31]。

3.2 玉米秸秆田间条带堆腐添加畜禽粪便对土壤活性碳组分的影响

土壤 MBC 来源于土壤微生物,是土壤有机物分解和矿化的动力,极易受到土壤管理措施的影响,对环境变化敏感^[32],因此它能够反映土壤养分的有效性和土壤的微生物状况,且与土壤肥力关系密切。本研究发现,与 CK 处理相比,秸秆条带堆腐添加畜禽粪便明显增加了 MBC 含量,罗原骏等^[33]也发现了相同规律,单施有机肥和有机肥配施化肥提高了土壤 MBC 含量。可能是因为秸秆条带与畜禽粪便均匀混合,外源有机物与秸秆为土壤微生物提供了足够的碳源与能量,促进了土壤微生物的生长繁殖,微生物活性增加,MBC 含量也随之增加。

土壤 EOC 是土壤有机碳中固定转化最快的组分,是土壤有机质动态变化的敏感指标,可用于反映土壤 SOC 的早期变化^[34-36]。本研究发现,相比于 CK 处理,秸秆条带堆腐各处理均能够提升土壤 EOC 含量,其中以添加畜禽粪便处理表现最为显著。这与王丹丹等^[37]提出的免耕秸秆还田降低 10~20 cm 土层土壤 EOC 含量的研究结果有所差异,一方面可能是因为气候条件、土壤类型、土壤质地的不同,另一方面可能是因为秸秆还田方式不同。本研究中,存在外源有机物的加入,进入土壤的有机物和秸秆被微生物分

解,分解产物氧化稳定性比较低,从而成为EOC的重要来源。

DOC主要来源于近期植物的枯枝落叶和土壤有机质中的腐殖质,虽然仅占SOC很小的一部分,但它参与生物化学转化过程,是土壤微生物可直接利用的有机碳源,影响着土壤中有机和无机物质的转化、迁移和降解。DOC是土壤中性质最活跃的有机碳,具有极强的溶解、吸附和转移能力,DOC易受自然环境、施肥措施和作物生长等因素的影响。本试验结果显示秸秆条带堆腐各处理土壤DOC含量均高于CK处理,可能是因为免耕减少了土壤的扰动,且秸秆条带堆腐中添加畜禽粪便,增加了土壤微生物生物量、作物掉落物和根系分泌物,提高了土壤微生物学特性,从而增强了土壤有机化合物的分解与转化,利于表层土壤DOC的积累^[38]。张黛静等^[39]认为,免耕和增施有机肥有利于提高土壤SOC、土壤MBC、土壤DOC、土壤EOC含量,这与本研究结果一致。本研究发现在90 d时各处理土壤DOC含量达到最大值,这与张瑞等^[40]研究结果一致,可能是因为秸秆还田方式的改变,短期内畜禽粪便与秸秆施入田中能够增加土壤活性有机碳含量,提高作物生物量和根际分泌物,使微生物活动和降解活动加速,因此在短期内生成高浓度水溶性有机物,增加了土壤DOC含量。

本试验研究结果显示,相较于CK处理,秸秆条带堆腐各处理显著提高了土壤活性有机碳各组分,并且条带堆腐下活性有机碳含量高于条带堆腐边,秸秆腐解养分垂直方向运移高于水平方向,这可能因为自然环境条件下,随着季节性降雨,作物秸秆与有机物料随着雨水下渗,而条带堆腐边缺少物料的输入,导致其各组分活性有机碳含量较条带堆腐下各处理含量低。

3.3 玉米秸秆田间条带堆腐添加畜禽粪便对土壤CPMI的影响

碳库管理指数(CPMI)是反映土壤碳素动态变化的有效指标,能够为培肥地力、提高土壤活性碳含量提供重要的依据^[41]。 K_{os} 能反映有机碳分解和养分释放的程度, K_{os} 越高说明土壤有机质活性越低,土壤越贫瘠,反之土壤越肥沃。本研究发现STC和STP处理对土壤活性有机碳提升效果明显,其碳库活度(A)和碳库活度指数(AI)也明显上升,并且高于ST处理与CK处理,说明秸秆条带堆腐添加畜禽粪便不仅能提高土壤活性有机碳,还能够提升碳库活度,解释了在秸秆条带堆腐添加畜禽粪便下活性有机碳较高的原

因。条带堆腐边各处理中STC处理CPMI最高,其次为STP处理,最低为ST处理,一方面可能是因为不同畜禽粪便化学组成不同,导致其分解速率不同;另一方面是可能因为鸡的肠道短,吃进去的饲料消化利用不充分,大量营养物质随粪便排出,施用后为微生物提供足够的养分,更能够促进秸秆腐解^[42]。本研究中 K_{os} 也证实了这一点,CK处理土壤 K_{os} 高于ST、STP与STC处理,说明ST、STP与STC能有效提高土壤肥力,并且试验中添加畜禽粪便更能增强土壤有机碳活性,提高土壤肥力。本研究中秸秆条带堆腐处理下SOC、DOC、EOC、MBC与土壤CPMI间存在显著或极显著的相关性,各组分活性有机碳相互关联、相互影响、相互包含。

4 结论

(1)玉米秸秆田间条带堆腐还田能够增加土壤有机碳、溶解性有机碳、易氧化有机碳、微生物量有机碳与碳库管理指数,降低土壤氧化稳定系数,对改善黑土碳库质量有积极作用。

(2)玉米秸秆田间条带堆腐添加鸡粪处理更有利于土壤有机碳、土壤活性有机碳的积累,具有良好的培肥效果,是提高土壤肥力的有效措施。

参考文献:

- [1] 杨迪,林琳,杨旭,等. 黑龙江不同玉米秸秆还田方式下土壤动物群落结构及其对秸秆降解的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 356-366. YANG D, LIN L, YANG X, et al. Soil animal community structure and its effect on straw degradation under different methods of returning corn stalks to the field in Heilongjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1): 356-366.
- [2] LAVELLE P, DECANS T, AUBERT M, et al. Soil invertebrates and ecosystem services[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(Suppl 1): 3-15.
- [3] 范如芹,周运来,李赞,等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1095-1101. FAN R Q, ZHOU Y L, LI Y, et al. Fermentation of straws to improve soil humus content and quality[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture*, 2019, 35(5): 1095-1101.
- [4] 王月宁,冯朋博,李荣,等. 不同秸秆还田方式对宁夏扬黄灌区土壤性质及玉米生长的影响[J]. 西南农业学报, 2019(11): 2607-2614. WANG Y N, FENG P B, LI R, et al. Effects of different straw returning methods on soil properties and corn growth in the Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. *Journal of Southwest Agriculture*, 2019(11): 2607-2614.
- [5] 张鑫,李菁园,孟凡乔,等. 桓台县冬小麦和夏玉米秸秆长期还田的生态效益分析[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4157-4168. ZHANG X, LI J Y, MENG F Q, et al. Analysis of the ecological benefits of re-

- turning winter wheat and summer maize stalks to the field for a long time in Huantai County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12):4157-4168.
- [6] 刘颖颖, 卜容燕, 唐杉, 等. 连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6):1008-1016. LIU Y Y, BU R Y, TANG S, et al. The effect of continuous straw and milk vetch co-return to the field on double-cropping rice yield, nutrient accumulation and soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(6):1008-1016.
- [7] 刘玮斌, 田文博, 陈龙, 等. 不同秸秆还田方式对土壤酶活性和玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(5):25-29. LIU W B, TIAN W B, CHEN L, et al. Effects of different ways of returning straw to the field on soil enzyme activities and corn yield[J]. *Soil and Fertilizers in China*, 2019(5):25-29.
- [8] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23):119-125. MENG Q Y, ZOU H T, HAN Y Y, et al. Effects of the amount of straw returned to the field on soil aggregate organic carbon and corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23):119-125.
- [9] 王秋菊, 张敬涛, 盖志佳, 等. 长期免耕秸秆覆盖对寒地草甸土壤物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9):2943-2948. WANG Q J, ZHANG J T, GAI Z J, et al. Effects of long-term no-tillage straw mulch on soil physical properties of cold meadow soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9):2943-2948.
- [10] 王利斌, 于猛, 张维安, 等. 东北玉米秸秆还田技术模式应用分析[J]. *农机科技推广*, 2019(10):55-58. WANG L B, YU M, ZHANG W A, et al. Application analysis of the technology model of returning corn stalks to the field in northeast China[J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2019(10):55-58.
- [11] 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5):519-525. CHEN S Y, ZHANG X Y, SUN H Y, et al. Analysis of the reasons for the reduction in yield of winter wheat with straw mulching in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5):519-525.
- [12] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2):507-516. WANG X M, LIU X, HAO L Y, et al. Effects of returning straw to the field combined with reduced nitrogen fertilizer application on corn yield and soil properties[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 39(2):507-516.
- [13] 李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(2):268-276. LI Y M, WANG G L, MENG X H, et al. Effects of straw returning methods on active organic carbon components in dryland meadow soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2):268-276.
- [14] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4):459-465. XU M G, YU R, SUN X F, et al. Effects of long-term fertilization on active organic matter and carbon pool management index of typical soils in my country[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(4):459-465.
- [15] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15):5546-5554. YAN L J, LI G, WU J Q, et al. Effects of four typical vegetations on the soil active organic carbon and soil carbon pool on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15):5546-5554.
- [16] WANG Q Y, WANG Y, WANG Q C, et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143(12):1-6.
- [17] 田慎重, 张玉凤, 边文范, 等. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2):185-192. TIAN S Z, ZHANG Y F, BIAN W F, et al. Effects of subsoiling and straw returning on active components of soil organic carbon in rotary farming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2):185-192.
- [18] 万忠梅, 郭岳, 郭跃东. 土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3):567-570. WAN Z M, GUO Y, GUO Y D. Research progress in the effects of land use on wetland soil active organic carbon[J]. *Acta Eco-Environmental Sciences*, 2011, 20(3):567-570.
- [19] 董扬红, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1):143-148. DONG Y H, ZENG Q C, AN S S, et al. Effects of different forest types on the soil active organic carbon and humus in the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1):143-148.
- [20] 徐道炜, 刘金福, 何中声, 等. 毛竹向杉木林扩张对土壤活性有机碳及碳库管理指数影响[J]. *西部林业科学*, 2019, 48(5):22-28, 36. XU D W, LIU J F, HE Z S, et al. The expansion of *Phyllostachys edulis* to Chinese fir plantation affects soil active organic carbon and carbon pool management index[J]. *Western Forestry Science*, 2019, 48(5):22-28, 36.
- [21] 陈晓旋, 安婉丽, 陈优阳, 等. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳库及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):294-302. CHEN X X, AN W L, CHEN Y Y, et al. Effects of simulated acid rain on soil carbon pool and carbon pool management index of paddy fields in Fuzhou Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):294-302.
- [22] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5):1131-1148. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. The amount and utilization potential of nutrient resources in animal manure and urine in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(5):1131-1148.
- [23] 尹飞, 宋玉娟, 焦念元, 等. 秸秆助腐畜禽粪添加量对土壤速效养分空间分布动态的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(6):113-116. YIN F, SONG Y J, JIAO N Y, et al. The effect of adding amount of straw to help decay livestock and poultry manure on the spatial distribution of soil available nutrients[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(6):113-116.
- [24] 崔正果, 李秋祝, 张恩萍, 等. 玉米秸秆不同还田方式对土壤有机质及微生物数量的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(6):104-109.

- CUI Z G, LI Q Z, ZHANG E P, et al. Effects of different ways of returning corn stalks to soil on soil organic matter and microbial quantity[J]. *Corn Science*, 2018, 26(6):104–109.
- [25] 乔磊磊, 李袁泽, 翟珈莹, 等. 黄土丘陵区植被恢复模式对土壤碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5):14–20. QIAO L L, LI Y Z, ZHAI J Y, et al. Effects of vegetation restoration models on soil carbon components in loess hilly regions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5):14–20.
- [26] 刘旭, 李双异, 彭畅, 等. 深松和秸秆深还对黑土有机碳及其活性组分的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3):602–608. LIU X, LI S Y, PENG C, et al. The effects of deep loosening and straw depth on black soil organic carbon and its active components[J]. *Soil Bulletin*, 2019, 50(3):602–608.
- [27] 王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 等. 秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4):636–646. WANG Z Y, LIAN H L, SUN Y, et al. Effects of depth of returning straws to field on soil organic carbon and nitrogen contents and soil enzyme activities in spring corn farmland[J]. *Agricultural Resources and Environment Journal*, 2021, 38(4):636–646.
- [28] 张银平, 迟岩杰, 王振伟, 等. 秸秆混土还田对两熟区玉米秸秆腐解速度的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19):245–249. ZHANG Y P, CHI Y J, WANG Z W, et al. The effect of returning straw to the field on the decomposing rate of corn stalk in the two-maturity area[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(19):245–249.
- [29] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):233–238. LI J T, ZHONG X L, ZHAO Q G. Effects of applying livestock manure and chemical fertilizers on soil active organic carbon pool and aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):233–238.
- [30] 蔡丽君, 赵桂范, 刘婧琦, 等. 玉米不同部位秸秆腐解特征及其影响因素研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(2):113–119. CAI L J, ZHAO G F, LIU J Q, et al. Study on decomposition characteristics and influencing factors of different parts of corn stalk[J]. *Maize Science*, 2019, 27(2):113–119.
- [31] 孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):369–376. SUN H Y, JI Q, WANG Y, et al. Study on the distribution and oxidation stability of organic carbon in water-stable aggregates under different modes of returning straw to the field[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2012, 31(2):369–376.
- [32] 周吉祥, 张贺, 杨静, 等. 连续施用土壤改良剂对沙质潮土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16):3307–3318. ZHOU J X, ZHANG H, YANG J, et al. Effects of continuous application of soil amendments on the fertility and active organic carbon components of sandy fluvo-aquic soil[J]. *China Agricultural Sciences*, 2020, 53(16):3307–3318.
- [33] 罗原骏, 蒲玉琳, 龙高飞, 等. 施肥方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8):1389–1397. LUO Y J, PU Y L, LONG G F, et al. Effects of fertilization methods on soil active organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture*, 2018, 30(8):1389–1397.
- [34] 胡娟. 半干旱覆膜滴灌土壤有机畜禽粪腐解特征及对有机碳影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2018:58–59. HU J. Decomposition characteristics of soil organic livestock and poultry manure and its effect on organic carbon in semi-arid drip irrigation with film mulching[D]. Changchun:Jilin Agricultural University, 2018:58–59.
- [35] 王维. 有机畜禽粪对不同作物根际土壤活性有机碳组分及腐殖质特征的影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2017:10–11. WANG W. Effects of organic livestock manure on the active organic carbon components and humus characteristics of different crop rhizosphere soils[D]. Changchun:Jilin Agricultural University, 2017:10–11.
- [36] 李婧, 迟凤琴, 魏丹, 等. 不同有机物料还田对黑土活性有机碳组分含量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(6):975–980. LI J, CHI F Q, WEI D, et al. The effect of returning different organic materials to the field on the content of active organic carbon in black soil[J]. *Soybean Science*, 2016, 35(6):975–980.
- [37] 王丹丹, 曹凑贵. 耕作措施与秸秆还田方式对土壤活性有机碳库及水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(32):123–127. WANG D D, CAO C G. Effects of tillage measures and straw returning methods on soil active organic carbon pool and rice yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(32):123–127.
- [38] 高志霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):115–121. GAO Z X, ZHOU J B, WANG X, et al. Effects of different fertilization treatments on the content and characteristics of soil dissolved organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1):115–121.
- [39] 张黛静, 王艳杰, 陈倩青, 等. 不同耕作方式与增施有机肥对麦田土壤有机碳库及小麦产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11):128–133. ZHANG D J, WANG Y J, CHEN Q Q, et al. Effects of different tillage methods and increased organic fertilizer application on soil organic carbon pool in wheat field and wheat yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(11):128–133.
- [40] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1):277–282. ZHANG R, ZHANG G L, JI Y Y, et al. Effects of different fertilization measures on soil active organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1):277–282.
- [41] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4):563–568. PENG H, JI X H, WU J M, et al. Study on soil organic carbon and carbon pool management index of double-cropping rice under different rice straw returning models[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4):563–568.
- [42] 杨茜雯, 吴景贵, 王雪峰, 等. 畜禽粪与玉米秸秆田间原位条带堆腐特征研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6):46–52. YANG Q W, WU J G, WANG X F, et al. Study on the characteristics of in-situ strip composting of livestock manure and corn stalk in the field[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 43(6):46–52.