

不同氮素水平下生物质炭、秸秆添加对陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳的影响

郭万里¹, 武均^{1,2}, 蔡立群^{1,2}, 齐鹏^{1,2}, 张仁陟^{1,2,3}, 张世汉¹, 贺永岩¹

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070;2.甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室,兰州 730070;3.甘肃省节水农业工程技术研究中心,兰州 730070)

摘要: 针对黄土高原旱地小麦产量和土壤肥力水平低的问题,为更好地提升土壤肥力,达到稳产增产的效果,通过布设在定西李家堡镇的长期定位试验,研究了3种氮素(N)水平下(不施氮,施氮 50 kg/hm²,施氮 100 kg/hm²)生物质炭(B)、秸秆(S)添加(共9个处理)对陇中黄土高原旱作农田土壤有机碳及活性有机碳的影响。结果表明:相比于不施氮肥(CNO),其余施肥方式均可显著提升土壤有机碳含量,且以BN100的效果最为显著,0—5,5—10,10—30 cm土层分别提升了84.7%,69.3%,47.8%,BN0、BN50、BN100对土壤有机碳含量的提升效果明显好于SN0、SN50、SN100、CN0、CN50、CN100;相比于土壤有机碳,各处理对土壤各活性有机碳(MBC、EOC、DOC、HWOC)的影响以SN100最为显著,且均显著高于CN0、CN50、CN100;各处理对土壤有机碳及其组分含量的影响均表现出随土层加深而降低的趋势;相比于只施氮肥,生物质炭、秸秆添加下土壤有机碳及其各组分之间的相关性更加显著。相比于只施氮肥,生物质炭、秸秆的添加对于农田土壤有机碳及其活性有机碳组分含量的提升效果更加显著,生物质炭的添加对土壤有机碳含量的提升效果较好,而秸秆添加对活性有机碳含量的提升效果较为显著。研究结果对于土壤微生物环境的改善、土壤肥力的提升、减少土壤养分淋失、作物产量的提高都具有重要意义。

关键词: 黄土高原; 活性有机碳; 生物质炭; 秸秆

中图分类号:S158.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0283-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.041

Effects of Biochar and Straw Addition on Soil Active Organic Carbon Under Different Nitrogen Levels in Dry Farmland on the Middle Gansu Region of Loess Plateau

GUO Wanli¹, WU Jun^{1,2}, CAI Liqun^{1,2}, QI Peng^{1,2},
ZHANG Renzhi^{1,2,3}, ZHANG Shihan¹, HE Yongyan¹

(1.College of Resources and Environment Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2.Gansu Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

3.Gansu Provincial Water-saving Agricultural Engineering Technology Research Center, Lanzhou 730070)

Abstract: In view of low wheat yield and low soil fertility in the dry farmland of Loess Plateau, a study was carried out in a long-term localized experimental field in Lijiabao Town, near Dingxi, to study the effect of biochar (B) and straw (S) addition under three nitrogen levels (no nitrogen application, nitrogen application 50 kg/hm², nitrogen application 100 kg/hm²) (9 treatments in total) on soil organic carbon (SOC) and activated organic carbon in the middle Gansu region of Loess Plateau with the purpose of improving soil fertility and maintaining stable and increased yield. The results showed that compared with no nitrogen fertilizer (CNO), the other fertilization levels could all significantly increase the SOC content, and the effect of BN100 was the most significant as BN100 increased 84.7%, 69.3% and 47.8% of the SOC content in 0—5, 5—10 and 10—30 cm soil layers. The increase of the SOC content by BN0, BN50, and BN100 was significantly better than that of SN0, SN50, SN100, CN0, CN50, and CN100. Compared with SOC, the effect of SN100 on

收稿日期:2019-06-14

资助项目:国家自然科学基金项目(31571594,41661049)

第一作者:郭万里(1995—),男,硕士研究生,主要从事农业生态研究。E-mail:1608138945@qq.com

通信作者:张仁陟(1961—),男,博士生导师,教授,主要从事保护性耕作、节水农业、土壤生态教学与研究。E-mail:zhangrz@gansu.edu.cn

various active organic carbons (MBC, EOC, DOC, and HWOC) was the most significant, and significantly higher than that of CN0, CN50, and CN100. The effects of each treatment on the SOC content and its components showed identical trend as decreased with increment of soil depth. Compared with application of only nitrogen fertilizer, the correlations between SOC and its components were more significant in the treatments received biochar and straw. Addition of biochar showed more significant improvement of the SOC content, and straw addition showed more significant improvement of the soil active organic carbon content. Therefore, the results are of great significance to the improvement of soil microbial environment, the enhancement of soil fertility, the reduction of soil nutrient leaching, and the promotion of crop yield.

Keywords: Loess Plateau; active organic carbon; biochar; straw

土壤有机碳是反映土壤肥力的重要指标,在维持土壤结构、保持土壤水分和供应养分等方面都具有着重要作用,然而,土壤有机碳并不能很好地反映出土壤质量的变化^[1],与土壤有机碳相比,土壤活性有机碳与土壤有效养分、土壤性状、耕作措施等关系更加密切,对农业管理措施反应更加敏感^[2]。土壤活性有机碳是易分解、矿化的有机碳,在很大程度上受植物和微生物的影响,虽然其含量相对较少,但却可以提前反映土壤的细微变化,因此可以作为预测土壤变化趋势指标,同时也是对植物养分供应有直接作用的有机碳组分^[3-7]。土壤活性有机碳组分较多,但大多数学者^[8-9]认为,土壤中的微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)是土壤活性有机碳的主要表征指标。

施肥是影响土壤活性有机碳的重要因素之一,且最为直接有效^[10]。不同的施肥方式不仅会通过影响土壤的碳输入和输出过程,影响到土壤中有机碳的含量和分布,还会通过影响有机碳的矿化,进而影响到农田土壤有机碳库的稳定^[11]。长期的氮肥施用以及不科学施肥对农田土壤的生态环境及土壤理化性质等造成了许多负面的影响,土壤急剧退化引起的肥力严重下降,肥料利用率严重下降,最终导致农作物产量低下、质量欠佳,而土壤有机碳作为反映土壤肥力的重要指标,因此如何提升土壤有机碳含量成为了近些年专家学者研究的热点,而外源性碳的添加不失为一种最直接有效的方法,生物质炭、秸秆作为重要的碳源同时也是有机肥料成为了研究热点。已有研究^[12-13]发现,有机肥的施用对于改善土壤微生物环境、提升土壤肥力、减少养分流失、改善农田生态环境具有重要作用;有研究^[14]表明,有机物料的添加可以增加土壤表层的有机碳含量,但是耕作措施的不同也会影响农田土壤有机碳含量;也有研究^[15]表明,有机物料添加下有机碳可得到较大幅度提升,但该过程同时还受秸秆类型和秸秆还田量、耕作方式、轮作体系以及气候区等因素的影响;傅敏等^[16]研究表明,有机物料的添加提升了土壤有机碳含量,但不同深度的土

层间有机碳含量差异明显。但也有研究^[17-18]表明,有机物料的添加并未显著提高土壤有机碳含量,这可能是由于土壤有机碳对短期的农田管理措施变化相对不敏感所致。还有外源有机物料的添加也会促进土壤原有有机碳的矿化损失,而适量的有机物料添加有利于土壤有机碳的固持^[19];也有研究^[20]表明,土壤质地对土壤有机碳的影响在不同地区有明显差异;另外,一些自然因素也会影响土壤有机碳含量的变化,光照可引起植物光合作用的强弱变化,从而影响植物固碳能力;温度则会影响土壤中微生物的活跃程度,调控土壤有机碳的输出;降雨量则通过影响土壤水分含量来影响土壤有机碳的含量变化^[21]。综上所述,有关有机物料添加对农田土壤 SOC 的影响国内外研究结论不一,另外影响农田土壤有机碳含量的因素较多,地区差异性显著,国内外均缺乏系统的研究,从理论上揭示其影响机制极具必要性。

陇中黄土高原农田土壤因为其特殊的气候环境、土壤性状与结构,加之不合理的管理、耕作、与施肥措施,导致土壤肥力严重下降,养分严重缺失^[22]。本研究所用秸秆、生物质炭分别为活性和惰性有机物料,因为其自身理化性状的差异,有关其对土壤活性有机碳影响的研究还较少,影响机制还不明了^[23],而土壤有机碳库因为其组分复杂,变化机制尚不明确,因此探究秸秆、生物质炭配施氮素对陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳的影响一方面对于探知农田土壤固碳能力和土壤有机碳库内部变化机制具有重要意义;另一方面也是进一步探讨土壤活性有机碳影响土壤质量和肥力的内在机理的重要途径。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇。该地区平均海拔 2 000 m,年均大气温度 6.4 °C,≥0 °C 积温 2 933.5 °C,≥10 °C 积温 2 239.1 °C,无霜期 140 d,多年平均降水量 390.9 mm,年

蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,80%保证率的降水量为 365 mm,变异系数为 24.3%,是典型的旱作农业区。土壤为典型的黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀,储水性能良好。0—200 cm 土壤容重平均为 1.17 g/cm³,凋萎含水率 7.3%,饱和含水率 21.9%。

1.2 试验方案与设计

试验以 3 个氮肥添加水平(不施氮肥,50%减量氮肥,100%常规施氮肥)下 2 种有机物料添加(小麦秸秆,生物质炭)对有机碳库影响因素为研究对象,共计 9 个处理,3 次重复,27 个小区,采用随机区组排列(表 1),小区面积为 3 m×6 m。各处理见表 1。

表 1 秸秆、生物质炭配施氮肥试验设计

单位:kg/hm²

| 处理代码 | 氮素 | 秸秆 | 生物质炭 |
|-------|-----|------|-------|
| CN0 | 0 | 0 | 0 |
| CN50 | 50 | 0 | 0 |
| CN100 | 100 | 0 | 0 |
| BN0 | 0 | 0 | 15000 |
| BN50 | 50 | 0 | 15000 |
| BN100 | 100 | 0 | 15000 |
| SN0 | 0 | 4500 | 0 |
| SN50 | 50 | 4500 | 0 |
| SN100 | 100 | 4500 | 0 |

其中,生物质炭于 2018 年 3 月上旬一次性施入 15 t/hm²,利用旋耕机将其翻埋入土壤(耕深(18±2) cm)。秸秆于每年收获后利用铡草机切割为 3~5 cm 长小段均匀散布于还田小区内,并利用旋耕机将其翻埋入土壤(三耕两耩,耕深(18±2) cm)。各处理于每年播种前均施入 P₂O₅ 105 kg/hm²(过磷酸钙,P₂O₅ 含量为 14%);试验中所添加氮素为尿素(纯氮含量为 46%),于每年播种前根据各处理所需用量同磷肥一并均匀撒施于各小区后,迅速利用播种机播种(播深(7±2) cm),待肥料与土壤混合,利用耙耩将地耩平。

供试作物为“定西 40 号”春小麦(*Triticum turgidum* L.),于 2018 年 3 月下旬播种,播量为 187.5 kg/hm²,行距 20 cm,7 月下旬收获,收获后三耕两耩。

供试生物质炭来源于金和福农业科技股份有限公司生产的生物质炭,为玉米秸秆在 500 °C 下快速热解产生,pH 为 6.7,阳离子交换量为(CEC)252.1 mmol/kg,比表面积为 300 g/m²,灰分含量为 35.64%,碳含量为 53.28%,氮素含量为 1.04%;小麦秸秆含碳量为 38.49%,氮素含量为 0.55%。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 样品的采集 秸秆、生物质炭配施氮肥试验采样期为 2018 年 7 月底,每个小区均采用“S”形取样

方法随机选取 5 个点,采集 0—30 cm(分别为 0—10, 10—20,20—30 cm)土壤样品,分别取物理样和化学样,各自混合均匀后装 6 号自封袋(1~1.5 kg),物理样保存于 4 °C 冰箱,回去过筛后测定土壤微生物量碳和可溶性有机碳,化学样品在室温下风干过筛后测定土壤有机碳、易氧化有机碳和热水提取态碳含量。

1.3.2 样品的测定方法 土壤有机碳(SOC)采用 K₂Cr₂O₇外加热法^[24]测定;土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸浸提法^[25]测定,将浸提液过滤后上碳氮联合分析仪(Multi N/C 2100)进行测定;可溶性有机碳(DOC)采用 0.5 mol/l K₂SO₄ 浸提(水土比 4:1)土样,浸提液经 0.45 μm 滤膜过滤后,滤液用碳氮联合分析仪(Multi N/C 2100)进行测定^[26];易氧化有机碳(EOC)采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化法^[27]测定;热水提取态有机碳(HWOC)参考王开峰等^[28]热水提取态碳的方法测定。

1.4 数据分析

试验原始数据用 Excel 2010 整理后,利用 SPSS 20 软件对数据进行分析,用 Duncan 法多重比较检验不同处理间差异显著性,显著性水平设为 P=0.05。相关性分析采用皮尔逊(Pearson)相关分析法进行双尾检验确定显著性。另外,以氮素、生物质炭、秸秆作为 3 种不同的因子进行多因素分析,检验氮素、秸秆、生物质炭以及氮素与秸秆和生物质炭间的差异及交互效应。利用 Excel 2010 软件制作图表。

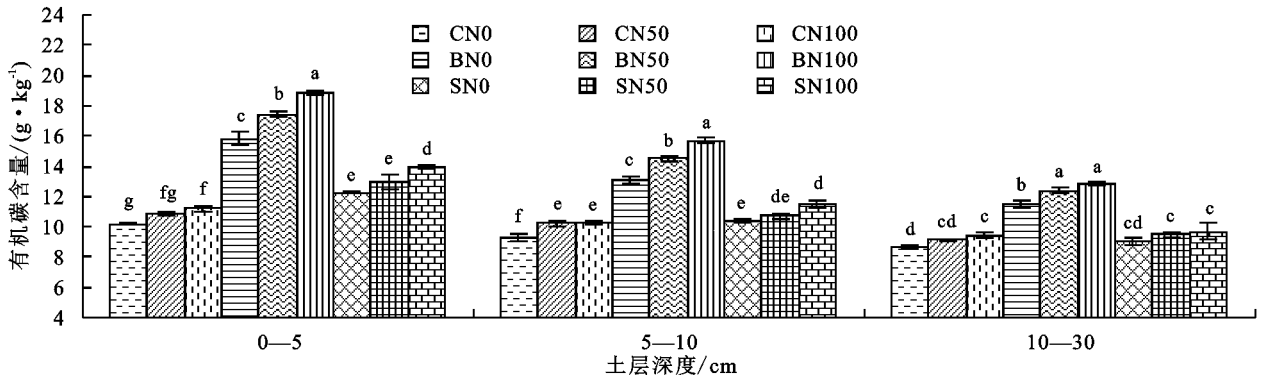
2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可知,生物质炭、秸秆配施氮肥对土壤有机碳(SOC)含量的影响各处理均表现出随土层加深而降低的趋势,各土层均以 BN100 处理 SOC 含量最高,CN0 处理含量最低。除 10—30 cm 土层外,其余各土层 BN100 均显著高于其他处理,且 BN0、BN50、BN100 显著高于 CN0、CN50、CN100、SN0、SN50、SN100。在 0—5 cm 土层,较之 CN0 处理,除 CN50 以外,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 SOC 含量 9.7%,55.4%,71.0%,84.7%,20.5%,27.1%,37.3%;在 5—10 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN50、CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 SOC 含量 10.1%,10.3%,40.7%,56.7%,69.3%,11.6%,15.7%,23.9%;在 10—30 cm 土层,较之 CN0 处理,除 CN50、SN0 以外,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN50、SN100)均显著提升土壤 SOC 含量 8.7%,32.5%,42.1%,47.8%,9.1%,11.5%。

由表 2 可知,氮肥与生物质炭对 0—30 cm 各土层土壤有机碳(SOC)含量均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;秸秆对 0—10 cm 各土层土壤有机碳(SOC)含量均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应,对 10—30 cm 土层在 $P < 0.05$ 水平下具有显著效应;氮

素与生物质炭的交互效应在 0—10 cm 各土层下均表现为极显著水平($P < 0.001$),在 10—30 cm 土层下表现为不显著;氮素与秸秆的交互效应只在 0—5 cm 土层下表现为显著水平($P < 0.01$),在 5—30 cm 各土层下表现为不显著。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同有机物料配施氮肥下土壤有机碳的含量

表 2 氮素、秸秆、生物质炭对土壤有机碳含量的效应

| 因子 | 土壤有机碳 | | |
|-----------|-------------|------------|------------|
| | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—30 cm |
| 氮素 | 141.789*** | 46.33*** | 15.56*** |
| 生物质炭 | 3306.887*** | 764.615*** | 462.719*** |
| 秸秆 | 573.614*** | 44.911*** | 5.906* |
| 氮素 * 生物质炭 | 37.237*** | 10.701*** | 1.408n.s. |
| 氮素 * 秸秆 | 6.38** | 2.743n.s. | 0.062n.s. |

注:表中*、**、***分别表示在 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平下有显著效应;n.s.表示在 $P < 0.05$ 水平下无显著效应;*、**、***和 n.s.前的数值为 F 检验值。下同。

2.2 不同施肥方式对土壤微生物量碳的影响

由图 2 可知,生物质炭、秸秆配施氮肥对土壤微生物量碳(MBC)的影响各处理均表现出随土层加深而降低的趋势,各土层均以 SN100 处理 MBC 含量最

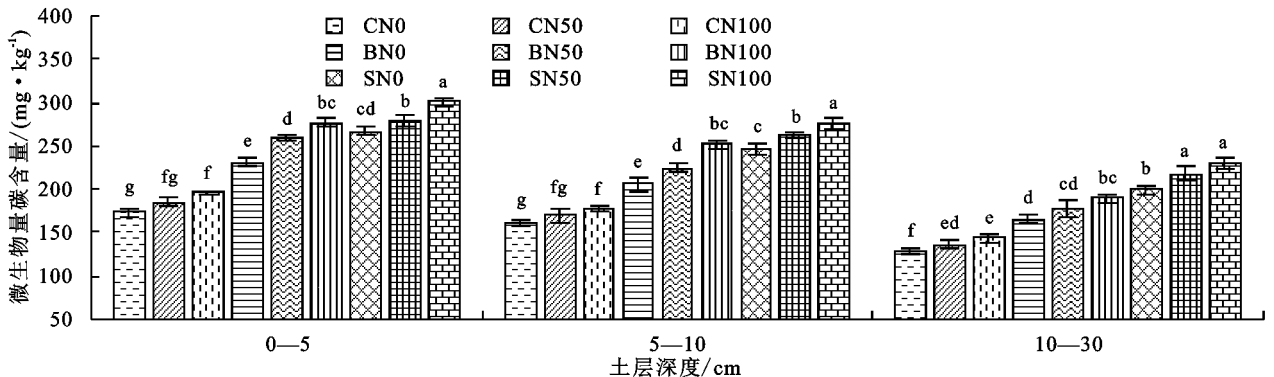


图 2 不同有机物料配施氮肥下土壤微生物量碳的含量

由表 3 可知,氮肥、秸秆、生物质炭对 0—30 cm 各土层土壤微生物量碳(MBC)含量均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;除在 5—10 cm 土层下氮素与生物质炭的交互效应表现为显著水平($P < 0.01$)外,其他土层均表现为不显著;氮素与秸秆的交互效应在各土层均表现为不显著。

高,CN0 处理含量最低。在各土层中,除 CN50 处理与 CN0 不显著外,其余各处理均表现出显著水平,且 SN0、SN50、SN100、BN0、BN50、BN100 各处理均显著高于 CN0、CN50、CN100。在 0—5 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 MBC 含量 12.9%,32.7%,49.0%,59.3%,53.7%,61.1%,72.8%;在 5—10 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 MBC 含量 10.1%,27.5%,38.6%,55.9%,52.0%,11.6%,62.2%,70.3%;在 10—30 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 MBC 含量 13.5%,29.9%,39.2%,48.5%,56.9%,71.3%,80.3%。

2.3 不同施肥方式对土壤易氧化有机碳的影响

由图 3 可知,生物质炭、秸秆配施氮肥对土壤易氧化有机碳(EOC)的影响各处理均表现出随土层加深而降低的趋势,各土层均以 SN100 处理 EOC 含量最高,CN0 处理含量最低。在 0—5 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN50、BN100、SN0、

SN50、SN100)均显著提升土壤 EOC 含量 13.9%,20.2%,29.0%,14.9%,30.7%,44.5%;在 5—10 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN100、SN50、SN100)均显著提升土壤 EOC 含量 17.9%,19.7%,26.9%;在 10—30 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 EOC 含量 13.2%,21.4%,28.3%,40.5%,33.7%,50.3%,59.7%。

由表 4 可知,氮肥、秸秆对 0—30 cm 各土层土壤易氧化有机碳(EOC)含量均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;生物质炭除对 5—10 cm 土层土壤易氧化有机碳(EOC)含量在 $P < 0.05$ 水平下具有显著效应外,其余土层均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效

应;氮素与秸秆的交互效应除对 0—5 cm 土层土壤易氧化有机碳(EOC)含量在 $P < 0.05$ 水平下具有显著效应外,其余土层均表现为不显著;氮素与生物质炭的交互效应在各土层均表现为不显著。

表 3 氮素、秸秆、生物质炭对土壤微生物量碳含量的效应

| 因子 | 土壤微生物量碳 | | |
|-----------|-------------|-------------|------------|
| | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—30 cm |
| 氮素 | 96.61*** | 86.228*** | 24.547*** |
| 生物质炭 | 809.988*** | 599.338*** | 138.840*** |
| 秸秆 | 1341.765*** | 1312.065*** | 531.704*** |
| 氮素 * 生物质炭 | 1.605n.s. | 15.007** | 0.287n.s. |
| 氮素 * 秸秆 | 2.905n.s. | 1.061n.s. | 0.230n.s. |

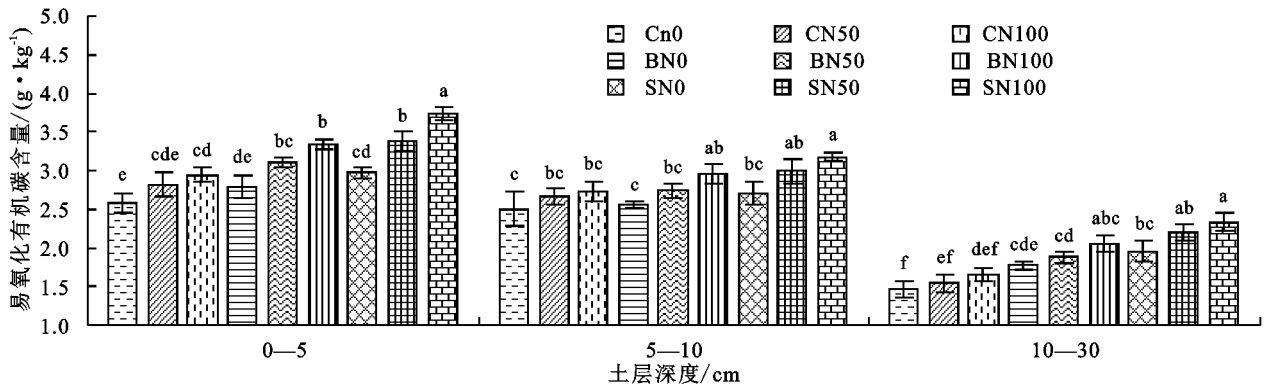


图 3 不同有机物料配施氮肥下土壤易氧化有机碳的含量

表 4 氮素、秸秆、生物质炭对土壤易氧化有机碳含量的效应

| 因子 | 土壤易氧化有机碳 | | |
|-----------|------------|-----------|------------|
| | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—30 cm |
| 氮素 | 55.483*** | 20.640*** | 14.889*** |
| 生物质炭 | 34.370*** | 4.722* | 49.899*** |
| 秸秆 | 130.687*** | 35.649*** | 152.537*** |
| 氮素 * 生物质炭 | 1.059n.s. | 0.973n.s. | 0.281n.s. |
| 氮素 * 秸秆 | 5.329* | 1.694n.s. | 1.414n.s. |

2.4 不同施肥方式对土壤可溶性有机碳的影响

由图 4 可知,生物质炭、秸秆配施氮肥对土壤可溶性有机碳(DOC)的影响各处理均表现出随土层加深而降低的趋势,各土层均以 SN100 处理 DOC 含量最高,CN0 处理含量最低。在 0—10 cm 各土层中,

除 CN50 处理与 CN0 不显著外,其余各处理均表现出显著水平;在 0—30 cm 各土层中,SN0、SN50、SN100 各处理均显著高于 CN0、CN50、CN100。在 0—5 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 DOC 含量 23.3%,22.4%,35.0%,43.6%,44.2%,56.7%,76.1%;在 5—10 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(CN100、BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 DOC 含量 19.5%,30.1%,36.7%,49.9%,63.1%,78.5%,92.9%;在 10—30 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 DOC 含量 26.2%,33.8%,45.3%,58.2%,66.4%。

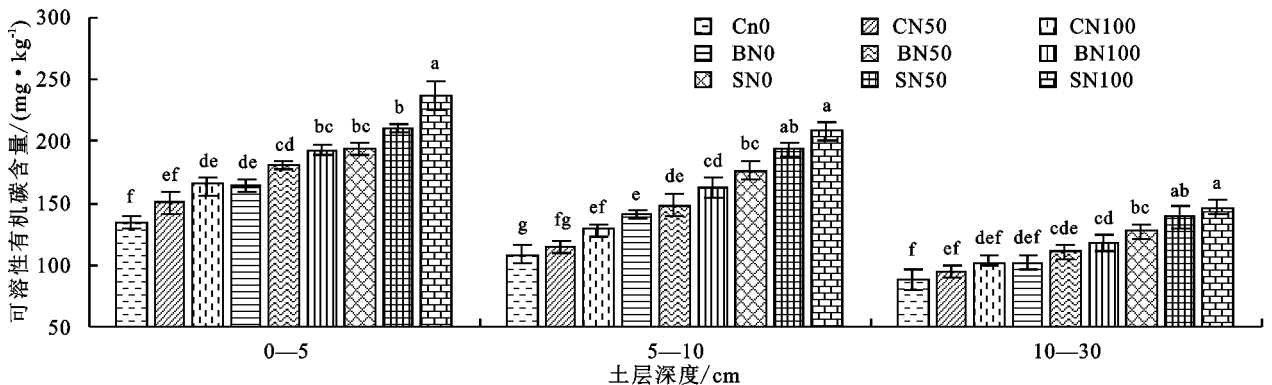


图 4 不同有机物料配施氮肥下土壤可溶性有机碳的含量

表 5 为氮素、秸秆、生物质炭对土壤可溶性有机碳(DOC)含量的效应。由表 5 可知,生物质炭、秸秆对 0—30 cm 各土层土壤可溶性有机碳(DOC)含量均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;氮肥除对 10—30 cm 土层土壤可溶性有机碳(DOC)含量在 $P < 0.01$ 水平下具有显著效应外,其余土层均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;氮素与秸秆的交互、氮素与生物质炭的交互效应在各土层均表现为不显著。

表 5 氮素、秸秆、生物质炭对土壤可溶性有机碳含量的效应

| 因子 | 土壤可溶性有机碳 | | |
|-----------|------------|------------|-------------|
| | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—30 cm |
| 氮素 | 35.972*** | 23.051*** | 11.048** |
| 生物质炭 | 73.03*** | 104.381*** | 1326.837*** |
| 秸秆 | 339.769*** | 545.209*** | 207.559*** |
| 氮素 * 生物质炭 | 0.105n.s. | 0.006n.s. | 0.040n.s. |
| 氮素 * 秸秆 | 1.191n.s. | 1.234n.s. | 0.260n.s. |

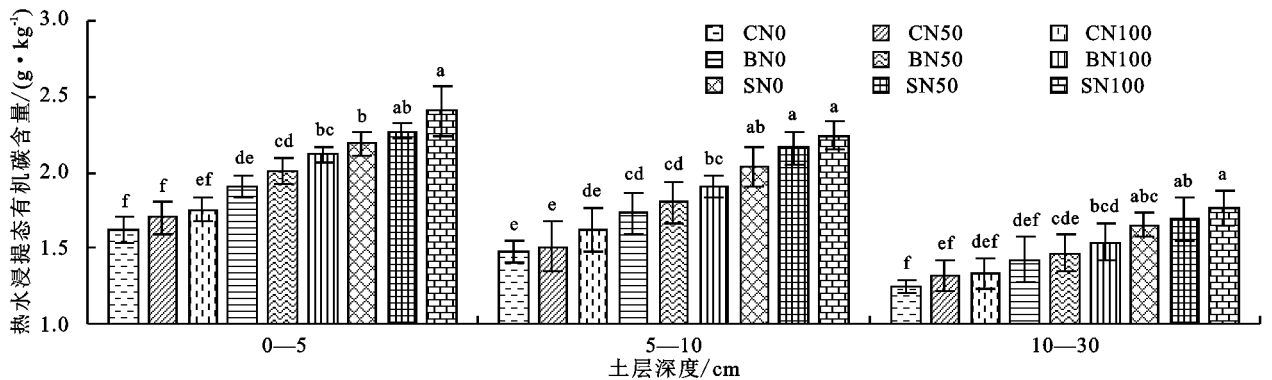


图 5 不同有机物料配施氮肥下土壤热水浸提态有机碳的含量

由表 6 可知,秸秆对 0—30 cm 各土层土壤 HWOC 含量在 $P < 0.01$ 水平下均具有显著效应;生物质炭除对 10—30 cm 土层土壤 HWOC 含量在 $P < 0.01$ 水平下具有显著效应外,其余土层均在 $P < 0.001$ 水平下具有显著效应;氮素对 0—5 cm 土层土壤 HWOC 含量在 $P < 0.01$ 水平下具有显著效应,5—10 cm 土层在 $P < 0.05$ 水平下具有显著效应,10—30 cm 土层下无显著效应;氮素与秸秆的交互、氮素与生物质炭的交互效应在各土层均表现为不显著。

2.6 不同水平氮素、生物质炭、秸秆添加对土壤活性有机碳组分之间相关性的影响

由表 7 所知,在不同氮素水平影响下,土壤有机碳(SOC)与易氧化有机碳(EOC)之间呈极显著正相关关系,与热水浸提态有机碳(HWOC)之间呈显著负相关关系,与微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)之间均呈负相关关系;易氧化有机碳(EOC)与微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、热水浸提态有机碳(HWOC)之间均呈显著负相关关系;微生物量碳(MBC)与可溶性有机碳(DOC)、热水浸提态有机碳(HWOC)之间均呈极显著正相关关系;可溶性有机碳(DOC)与热水浸提态有机碳(HWOC)之

2.5 不同施肥方式对土壤热水浸提态有机碳的影响

由图 5 可知,生物质炭、秸秆配施氮肥对土壤热水浸提态碳(HWOC)的影响各处理均表现出随土层加深而降低的趋势,各土层均以 SN100 处理 MBC 含量最高,CN0 处理含量最低。在各土层中,SN0、SN50、SN100 各处理均显著高于 CN0、CN50、CN100。在 0—5 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 HWOC 含量 17.9%,24.1%,30.9%,35.2%,40.3%,48.4%;在 5—10 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN0、BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 HWOC 含量 17.4%,22.4%,29.4%,38.2%,46.6%,52.3%;在 10—30 cm 土层,较之 CN0 处理,各处理(BN50、BN100、SN0、SN50、SN100)均显著提升土壤 HWOC 含量 17.6%,23.3%,32.4%,35.6%,41.4%。

间呈极显著正相关关系。

表 6 氮素、秸秆、生物质炭对土壤热水浸提态有机碳含量的效应

| 因子 | 土壤热水浸提态有机碳 | | |
|-----------|------------|------------|------------|
| | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—30 cm |
| 氮素 | 10.279** | 5.201* | 2.060n.s. |
| 生物质炭 | 70.545*** | 33.025*** | 14.493** |
| 秸秆 | 243.572*** | 159.148*** | 207.559*** |
| 氮素 * 生物质炭 | 0.376n.s. | 0.590n.s. | 0.098n.s. |
| 氮素 * 秸秆 | 0.487n.s. | 0.293n.s. | 0.112n.s. |

由表 8 可知,在生物质炭添加下,土壤有机碳(SOC)与易氧化有机碳(EOC)之间呈极显著正相关关系,与热水浸提态有机碳(HWOC)、微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)之间均呈显著负相关关系;易氧化有机碳(EOC)与微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)之间均呈显著负相关关系,与热水浸提态有机碳(HWOC)之间呈极显著负相关关系;微生物量碳(MBC)与可溶性有机碳(DOC)、热水浸提态有机碳(HWOC)之间均呈极显著正相关关系;可溶性有机碳(DOC)与热水浸提态有机碳(HWOC)之间呈极显著正相关关系。

表 7 不同氮素水平下土壤各活性有机碳组分之间的相关性

| 指标 | 有机碳 | 易氧化有机碳 | 微生物量碳 | 可溶性有机碳 | 热水浸提态有机碳 |
|----------|-------|---------|---------|---------|----------|
| 有机碳 | 1.000 | 0.872** | -0.638 | -0.537 | -0.688* |
| 易氧化有机碳 | | 1.000 | -0.669* | -0.711* | -0.785* |
| 微生物量碳 | | | 1.000 | 0.940** | 0.978** |
| 可溶性有机碳 | | | | 1.000 | 0.974** |
| 热水浸提态有机碳 | | | | | 1.000 |

表 8 生物质炭添加土壤各活性有机碳组分之间的相关性

| 指标 | 有机碳 | 易氧化有机碳 | 微生物量碳 | 可溶性有机碳 | 热水浸提态有机碳 |
|----------|-------|---------|---------|---------|----------|
| 有机碳 | 1.000 | 0.947** | -0.724* | -0.728* | -0.750* |
| 易氧化有机碳 | | 1.000 | -0.728* | -0.789* | -0.806** |
| 微生物量碳 | | | 1.000 | 0.967** | 0.973** |
| 可溶性有机碳 | | | | 1.000 | 0.998** |
| 热水浸提态有机碳 | | | | | 1.000 |

由表 9 可知,在秸秆添加下,土壤有机碳(SOC)与易氧化有机碳(EOC)之间呈极显著正相关关系,与热水浸提态有机碳(HWOC)、微生物量碳(MBC)之间均呈极显著负相关关系,与可溶性有机碳(DOC)之间呈显著负相关关系;易氧化有机碳(EOC)与微生物量碳(MBC)、

可溶性有机碳(DOC)、热水浸提态有机碳(HWOC)之间均呈显著负相关关系;微生物量碳(MBC)与可溶性有机碳(DOC)、热水浸提态有机碳(HWOC)之间均呈极显著正相关关系;可溶性有机碳(DOC)与热水浸提态有机碳(HWOC)之间呈极显著正相关关系。

表 9 秸秆添加下土壤各活性有机碳组分之间的相关性

| 指标 | 有机碳 | 易氧化有机碳 | 微生物量碳 | 可溶性有机碳 | 热水浸提态有机碳 |
|----------|-------|---------|----------|---------|----------|
| 有机碳 | 1.000 | 0.951** | -0.823** | -0.754* | -0.826** |
| 易氧化有机碳 | | 1.000 | -0.741* | -0.713* | -0.771* |
| 微生物量碳 | | | 1.000 | 0.983** | 0.993** |
| 可溶性有机碳 | | | | 1.000 | 0.988** |
| 热水浸提态有机碳 | | | | | 1.000 |

3 讨论

3.1 不同氮素水平下有机物料添加对农田土壤总有机碳的影响

大量研究^[12-13,29-30]表明,有机物料的添加对于农田土壤有机碳和活性有机碳含量具有明显的提升作用,有机物料的添加可以显著增强土壤微生物活性和减缓土壤有机碳含量的下降,这与本研究结果一致,可能是因为有机物料的添加为土壤提供了足够的碳源,增加了微生物活性,从而提升了土壤有机碳含量^[31-32];此外,相比于只施氮肥,秸秆、生物质炭添加对于土壤有机碳含量的提升效果比较显著,这与陇中黄土高原特殊的土壤环境下导致其土壤肥力较低有很大关系,相比于肥力较高的土壤,有机物料的添加对于肥力较低的土壤有机碳含量的提升更为显著^[33]。本研究发现,生物质炭配施氮肥下土壤有机碳含量显著高于秸秆配施氮肥、单施氮肥,这与曾爱等^[34]、Zimmermann 等^[35]研究结果一致,当生物质炭含碳量在 40%~75%时,生物质炭对于土壤有机碳含量的影响更加显著,而本研究所用生物质炭含碳量为 53.28%,在此区间内;生物质炭配施氮肥相比于秸秆配施氮肥对于土壤有机碳含量的提升更加显著,这可能是炭化的植物残体更有助于土壤碳的增加和长期稳定性,还有可能与高温制备的生物质炭碳(C)的

质量分数增加,而氢(H)和氧(O)质量分数下降,H/C 及 O/C 比下降;生物质炭的脂肪族结构减弱,芳香性增强,稳定性升高,且随着添加比例的增加而增加,其中以 500 °C 制备的生物质炭对土壤有机碳库的提升效果最为明显^[36],而本研究中所用生物质炭也是在 500 °C 制备,且表现出随着添加量的增加对土壤有机碳的提升效果更加显著;另外,黄超等^[37]研究发现,当生物质炭施加量增加时,土壤中一些活性较高组分,例如胡敏酸和富里酸等所占的比例会降低,而残留的像黑碳、胡敏素等一些稳定性较高的有机物质会明显增多,这说明生物质炭作为一种惰性有机物料,其固碳能力较高,在短时间内有利于土壤有机碳的积累,而秸秆的降解速率较快,无法在长时间内固持土壤有机碳,这可能也是生物质炭添加对土壤有机碳含量的提升高于秸秆添加的一个重要原因^[38]。

3.2 不同氮素水平下有机物料添加对农田土壤活性有机碳的影响

相比于有机碳,不同有机物料添加对于各活性有机碳含量的提升基本呈现出秸秆配施氮肥高于生物质炭配施氮肥、只施氮肥处理。黎嘉成等^[39]研究发现,秸秆、生物质炭添加均可提升土壤活性有机碳含量,尤其对微生物量碳提升效果显著,且秸秆添加效果好于生物质炭添加,与本研究结果一致;张杰等^[40]、李有兵

等^[41]研究发现,秸秆添加相比于生物质炭添加显著提升了土壤 DOC、EOC 含量。这可能与秸秆中含有丰富的矿质元素,碳利用效率较高,降解速率较快,施用秸秆加速了土壤呼吸、提升土壤微生物对碳源的利用程度,因而增加了土壤微生物活性,在短时间可以被微生物所利用吸收^[42],而生物质因为其富有的孔隙结构、比表面积,芳香化程度、吸附性和稳定性,导致其不易被微生物短期内利用^[43-44]。但牛斐^[45]研究结果与本文不一致,其原因可能是耕作方式与耕作年限长短不一所造成的;王丹丹等^[46]研究发现,秸秆还田对土壤 EOC 含量没有影响,与本研究结果不一致,其所研究的土壤为水稻土,而本研究所试土壤为典型的黄绵土,这可能是供试土壤的类型、质地与本研究不一样等原因所导致的;此外,贾俊香等^[23]研究发现,秸秆较生物质炭添加可以显著提升土壤 DOC、EOC 含量,但是对 MBC 含量的提升效果并不显著;代红翠等^[47]研究表明,生物炭较秸秆还田并没有显著提高土壤 MBC 和 DOC 含量,这表明有机物料对土壤活性有机碳影响复杂多变;强学彩等^[48]研究发现,秸秆直接还田由于其中所含有机碳的相对活跃性,会诱发土壤微生物的高效代谢和繁衍,从而改变土壤有机碳活性及稳定性;也有研究^[49-50]发现,与秸秆直接还田相比,生物炭添加对土壤活性有机碳库是否产生差异目前尚未定论,因此需要进一步的研究从而在理论上对其作出解释。本研究还发现,不同施肥方式对于土壤有机碳及活性有机碳组分含量的影响均呈现随着土层加深而降低的趋势,这与崔东等^[51]、张葛等^[52]研究结果相一致,这可能与土壤理化性质、耕作层深度、有机物料的埋深、性质等具有很大关系。

4 结论

相比于只施氮肥,秸秆、生物质炭添加对于土壤有机碳及其活性碳组分的提升效果较为明显,且表现出随着土层加深而逐渐降低的趋势,其中,生物炭的添加显著提升了土壤有机碳含量,秸秆添加显著提升了活性有机碳含量;另外,相比于氮素添加,秸秆、生物质炭添加下有机碳及其活性碳组分之间的相关性更为显著,均呈显著或极显著关系,氮素添加下土壤有机碳与微生物量碳、可溶性有机碳之间均无显著相关关系。

参考文献:

- [1] 肖胜生,董云社,齐玉春,等.草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J].地球科学进展,2009,24(10):1138-1148.
- [2] 王栋,李辉信,李小红,等.覆草旱作对稻田土壤活性有机碳的影响[J].中国农业科学,2011,44(1):75-83.
- [3] 钟春棋,曾从盛,全川.不同土地利用方式对闽江口湿地土壤活性有机碳的影响[J].亚热带资源与环境学报,2010,5(4):64-70.
- [4] 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.
- [5] 李太魁,朱波,王小国,等.土地利用方式对土壤活性有机碳含量影响的初步研究[J].土壤通报,2012,43(6):1422-1426.
- [6] 向成华,栾军伟,骆宗诗,等.川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J].生态学报,2010,30(4):1025-1034.
- [7] 孙伟军,方晰,项文化,等.湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征[J].生态学报,2013,33(24):7765-7773.
- [8] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J].生态学杂志,1999,18(3):33-39.
- [9] 宋小艳,张丹桔,张健,等.马尾松(*Pinus massoniana*)人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响[J].生态学报,2015,35(16):5393-5402.
- [10] 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.
- [11] 张森溪.施肥对高寒草甸土壤有机碳矿化的影响[D].兰州:兰州大学,2018.
- [12] 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.
- [13] 农传江,汤利,徐智,等.有机肥部分替代化肥对土壤有机碳库和烤烟经济性状的影响[J].中国土壤与肥料,2016,12(4):70-75.
- [14] 周泉,王龙昌,邢毅,等.秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J].应用生态学报,2019,30(4):1235-1242.
- [15] 匡恩俊,迟凤琴,张久明,等.不同耕作方式与有机物料配施后对土壤主要特性的影响[J].土壤与作物,2019,8(4):395-404.
- [16] 傅敏,郝敏敏,胡恒宇,等.土壤有机碳和微生物群落结构对多年不同耕作方式与秸秆还田的响应[J].应用生态学报,2019,30(9):3183-3194.
- [17] Li J H, Yang Y J, Li B W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil carbon fractions in alpine meadows on the qinghai-tibetan plateau[J].PLoS One,2014,9(7):e103266.
- [18] Li J H, Hou Y L, Zhang S X, et al. Fertilization with nitrogen and phosphorus lowers soil organic carbon sequestration in alpine meadows[J].Land Degradation and Development,2018,29(6):1634-1641.
- [19] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J].土壤学报,2010,47(5):931-938.
- [20] 王丹丹,史学正,于东升,等.东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J].生态环境学报,2009,18(3):1049-1053.

- [21] Jones C, McConnell C, Coleman K, et al. Global climate change and soil carbon stocks predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil[J]. *Global Change Biology*, 2004, 11(1):154-166.
- [22] 武均.不同管理措施下陇中黄土高原旱作农田土壤生态化学计量学特征研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [23] 贾俊香,谢英荷,李廷亮,等.秸秆与秸秆生物炭对采煤塌陷复垦区土壤活性有机碳的影响[J].*应用与环境生物学报*, 2016, 22(5):787-792.
- [24] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2001:30-35.
- [25] 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,2000:231-232.
- [26] 周兴,廖育林,鲁艳红,等.肥料减施条件下水稻土壤有机碳组分对紫云英-稻草协同利用的响应[J].*水土保持学报*, 2017, 31(3):283-290.
- [27] Lefroy D B, Blair G J, Strong W M, et al. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance [J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156(1):399-402.
- [28] 王开峰,王凯荣,彭娜,等.有机物循环对红壤稻田土壤有机碳和热水可提取碳的影响[J].*土壤通报*, 2007, 38(3):447-451.
- [29] Li C F, Yue L X, Kou Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119:31-37.
- [30] Li Y F, Jiang P K, Chang S X, et al. Organic mulch and fertilization affect soil carbon pools and forms under intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) forests in southeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(4):739-747.
- [31] 刘杰云,沈健林,邱虎森,等.生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J].*农业环境科学学报*, 2015, 34(2):205-212.
- [32] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等.不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响[J].*环境科学*, 2017, 38(1):333-342.
- [33] 武均,蔡立群,罗珠珠,等.保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J].*水土保持学报*, 2014, 28(2):112-117.
- [34] 曾爱,廖允成,张俊丽,等.生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J].*农业环境科学学报*, 2013, 32(5):1009-1015.
- [35] Zimmermann M, Bird M I, Wurster C, et al. Rapid degradation of pyrogenic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11):3306-3316.
- [36] 张婷,王旭东,逢萌雯,等.生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J].*环境科学*, 2016, 37(6):2298-2303.
- [37] 黄超,刘丽君,章明奎.生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(4):439-445.
- [38] 周桂玉,窦森,刘世杰.生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J].*农业环境科学学报*, 2011, 30(10):2075-2080.
- [39] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].*草业学报*, 2018, 27(5):39-50.
- [40] 张杰,黄金生,刘佳,等.秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO_2 释放及有机碳含量的影响[J].*农业环境科学学报*, 2015, 34(2):401-408.
- [41] 李有兵,把余玲,李硕,等.作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J].*植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4):943-950.
- [42] 孟超然,白如霄,杨鹏辉,等.秸秆还田对干旱区滴灌玉米生产及土壤微生物的影响[J].*新疆农业科学*, 2018, 55(12):2251-2260.
- [43] Eykelbosh A J, Johnson M S, Couto E G. Biochar decrease dissolved organic carbon but not nitrate leaching relation to vinasse application in a Brazilian sugar cane soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149:9-16.
- [44] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(2/1):311-324.
- [45] 牛斐.不同种植模式及秸秆还田对旱地农田土壤肥力及土壤有机碳的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [46] 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.
- [47] 代红翠,陈源泉,赵影星,等.不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J].*农业工程学报*, 2016, 32(增刊2):103-110.
- [48] 强学彩,袁红莉,高旺盛.秸秆还田量对土壤 CO_2 释放和土壤微生物量的影响[J].*应用生态学报*, 2004, 15(12):2199-2205.
- [49] 尚杰,耿增超,陈心想,等.施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J].*农业环境科学学报*, 2015, 34(3):509-517.
- [50] 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.
- [51] 崔东,邓霞,刘影,等.镰叶锦鸡儿湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指数的关系[J].*干旱地区农业研究*, 2017, 35(5):195-201, 228.
- [52] 张葛,窦森,谢祖彬,等.施用玉米秸秆生物炭对水稻土黑碳数量和结构特征的影响[J].*农业环境科学学报*, 2015, 34(9):1769-1774.