

# 碳氮添加对雨养农田土壤全氮、有机碳及其组分的影响

江晶<sup>1,2,3</sup>, 武均<sup>1,3</sup>, 张仁陟<sup>1,3,4</sup>, 董博<sup>5</sup>, 蔡立群<sup>1,3,4</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070;

4. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070; 5. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070)

**摘要:** 为探明碳氮添加4年后, 土壤全氮、有机碳及其组分(可溶性有机碳、微生物量碳、轻组和重组有机碳)的变化特征, 依托布设于甘肃省定西市安定区李家堡镇的不同碳源配施氮素田间定位试验, 涉及秸秆、生物质炭、氮素3个因素, 秸秆设置为不施、施用秸秆2水平; 生物质炭为不施和施用生物质炭2个水平; 氮素设置为不施氮、施纯氮50 kg/hm<sup>2</sup>、施纯氮100 kg/hm<sup>2</sup>3个水平, 共9个处理。结果表明: 不同处理下土壤全氮、有机碳及其组分的含量均随土层的加深而降低。添加生物质炭对土壤全氮、有机碳及其组分均具有不同程度的提升效应。添加秸秆对土壤全氮、有机碳和可溶性有机碳、微生物量碳、轻组有机碳均具有显著提升效应, 仅在0—5 cm土层对重组有机碳有显著提高。添加氮素可显著提升土壤全氮、有机碳和可溶性有机碳、微生物量碳、轻组有机碳含量。较其他处理, 添加生物质炭对土壤全氮、有机碳和重组有机碳的提升效应最高, 添加秸秆对可溶性有机碳、微生物量碳、轻组有机碳的提升效果最优。从提升土壤质量的角度出发, 推荐秸秆配施氮素模式, 该模式下土壤碳素有效性高、易于被微生物利用, 有利于作物生长。从提高土壤固碳角度考虑, 推荐生物质炭配施氮素模式, 该模式有利于碳的封存。

**关键词:** 生物质炭; 秸秆; 氮素; 全氮; 有机碳组分

中图分类号: S145.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0215-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.032

## Effects of Carbon and Nitrogen Addition on Total Nitrogen, Organic Carbon and Their Components in Rain-fed Farmland

JIANG Jin<sup>1,2,3</sup>, WU Jun<sup>1,3</sup>, ZHANG Renzhi<sup>1,3,4</sup>, DONG Bo<sup>5</sup>, CAI Liqun<sup>1,3,4</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3. Gansu Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 4. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Lanzhou 730070; 5. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070)

**Abstract:** In order to find out the change characteristics of soil total nitrogen (TN), organic carbon (SOC) and its components (dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), light fraction organic carbon (LFOC) and heavy fraction organic carbon (HFOC)) after four years of carbon and nitrogen addition, local field experiment of nitrogen application with different carbon sources was conducted at the Rain-fed Agricultural Experimental Station of Gansu Agricultural University in Lijiabao Town, Anding District, Dingxi City, central Gansu Province. Three factors including straw, biochar and nitrogen were set up in the experiment. The straw was set at two levels, including no straw and straw application, and the experiment involved two biochar levels, which were no biochar and biochar application, and the nitrogen application was at three levels of no application, 50 kg/hm<sup>2</sup> and 100 kg/hm<sup>2</sup>, totally nine treatments. The results showed that the contents of TN, organic carbon and their components decreased with the deepening of soil layer under different treatments. Application of biochar increased the concentrations of SOC, TN, DOC, MBC, LFOC and HFOC. Application of straw significantly increased the contents of SOC, TN, DOC, MBC and LFOC, but only significantly increased HFOC content in 0—5 cm soil layer. Application of nitrogen signifi-

收稿日期: 2018-11-18

资助项目: 甘肃农业大学科技创新基金项目(GAU-XKJS-2018-095); 国家自然科学基金项目(31571594, 41661049); 甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA076)

第一作者: 江晶(1982—), 女, 甘肃兰州人, 博士, 讲师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 18693123776@163.com

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

cantly increased the concentrations of SOC, TN, DOC, MBC and LFOC. Among the treatments, application of biochar showed the best improve effect on the concentrations of SOC, TN and HFOC, and adding straw represented the best enhancement effects on the concentrations of DOC, MBC and LFOC. From the perspective of improving soil quality, straw combined with nitrogen was the recommended application mode, which had a higher soil carbon availability that facilitated the carbon utilization of the microorganisms, and benefited the growth of crops. Considering the improvement of soil carbon sequestration, biochar combined with nitrogen was the recommended application mode, which was beneficial to the carbon sequestration.

**Keywords:** biochar; straw; nitrogen; soil total nitrogen; organic carbon fractions

土壤有机碳库是全球碳循环中重要的碳库,其周转更新时间远远短于土壤无机碳库<sup>[1]</sup>,有机碳库微小的变化都可能导致全球大气 CO<sub>2</sub> 含量的较大起伏<sup>[2-3]</sup>。所以,藏碳于土是减少温室气体排放的重要途径<sup>[3-4]</sup>。同时,土壤有机碳对土壤的物理、化学性状起着重要的调控作用,是评价农田土壤肥力的重要指标<sup>[5-6]</sup>。而氮是植物必需的三大营养元素之一,土壤碳氮之间存在一定的耦合关系,是农业可持续发展的基础<sup>[7]</sup>。

秸秆还田由于外源碳投入量的增加,能够促进土壤有机碳含量的提高,增加土壤碳库储量<sup>[8-9]</sup>,且众多研究<sup>[9-11]</sup>表明,添加秸秆对土壤全氮、有机碳及其组分含量均具有积极影响。添加生物质炭不仅能有效减少温室气体排放和减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度的增加,同时也是一种有效的“碳封存”方法<sup>[12]</sup>。已有研究<sup>[13]</sup>表明,施用生物质炭可以增加土壤总有机碳和全氮的含量。添加氮肥及有机物料是影响农田土壤碳氮累积的重要措施,关于氮肥对土壤肥力的影响研究早已有很多,且证明添加氮肥对提高土壤有机碳及全氮均具有促进作用<sup>[9-10]</sup>。目前有关秸秆、生物质炭、氮素在农业生产中的研究已然很多,尤其是在南方酸性土壤方面的研究较多,但有关陇中黄土高原旱作农田的研究鲜见报道,尤其是比较秸秆、生物质炭、氮素对土壤全氮、有机碳及其组分的影响方面的研究更少。因此本文以连续进行 4 年的不同碳源(秸秆、生物质炭)配施氮肥定位试验为研究对象,对试区 2017 年收获后土壤有机碳、全氮、水溶性有机碳、微生物量碳、轻组和重组有机碳含量进行测定,分析比

较氮素、秸秆和生物质炭 3 个因素对土壤全氮、土壤有机碳及其组分含量的作用效应、各因素相互之间是否有交互效应及其层次效应。以期得到添加秸秆和生物质炭及氮肥不同添加量对陇中黄土高原旱作农田土壤全氮、土壤有机碳及其组分影响的综合评价结果,探索适合于该区农业可持续发展的最佳方式,并为相关研究提供可靠依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验布设于黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市李家堡镇甘肃农业大学旱农试验站。试区属中温带半干旱区,农田土壤为典型的黄绵土,平均海拔 2 000 m,无霜期 140 d,年均日照时间 2 476.6 h,年均太阳辐射 594.7 KJ/cm<sup>2</sup>,年均气温 6.4 °C,≥0 °C 积温 2 933.5 °C,≥10 °C 积温 2 239.1 °C;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%,为典型的雨养农业区。

### 1.2 试验设计

试验涉及秸秆、生物质炭、氮素 3 个因素,秸秆设置为不施、施用秸秆 2 水平;生物质炭为不施和施用生物质炭 2 个水平;氮素设置为不施氮、施纯氮 50 kg/hm<sup>2</sup>、施纯氮 100 kg/hm<sup>2</sup> 3 个水平。试验共设 9 个处理(表 1)。所有处理均采用随机区组排列,各处理 3 个重复,共计 27 个小区,小区面积 3 m×6 m=18 m<sup>2</sup>。

表 1 处理设置

编号	处理	试验设计	纯碳投入量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	纯氮投入量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
1	CN0	无碳+不施氮	0	0
2	BN0	生物质炭 15 t/hm <sup>2</sup> +不施氮	7992.00	156.00
3	SN0	秸秆 4.5 t/hm <sup>2</sup> +不施氮	1732.05	24.75
4	CN 50	无碳+施纯氮 50 kg/hm <sup>2</sup>	0	23.00
5	BN 50	生物质炭 15 t/hm <sup>2</sup> +施纯氮 50 kg/hm <sup>2</sup>	7992.00	179.00
6	SN 50	秸秆 4.5 t/hm <sup>2</sup> +施纯氮 50 kg/hm <sup>2</sup>	1732.05	47.75
7	CN 100	无碳+施纯氮 100 kg/hm <sup>2</sup>	0	46.00
8	BN 100	生物质炭 15 t/hm <sup>2</sup> +施纯氮 100 kg/hm <sup>2</sup>	7992.00	202.00
9	SN 100	秸秆 4.5 t/hm <sup>2</sup> +施纯氮 100 kg/hm <sup>2</sup>	1732.05	70.75

生物质炭于 2014 年 3 月上旬一次性施入 15 t/hm<sup>2</sup>, 利用旋耕机将其翻埋入土壤(耕深(18±2) cm),可使

其与土壤充分混匀。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(3耕2耨,耕深(18±2) cm)。各处理于每年播种前均施入P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg/hm<sup>2</sup>(过磷酸钙,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>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,利用耢耨将地耨平。

供试作物为“定西40号”春小麦(*Triticum turgidum* L.),自2014年开始,采用春小麦连作并遵循定西当地传统耕作生产方式,于每年3月下旬播种,播量为187.5 kg/hm<sup>2</sup>,行距20 cm,7月下旬收获,收获后3耕2耨。

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,碳含量53.28%,氮素含量1.04%;小麦秸秆含碳量38.49%,氮素含量为0.55%。

### 1.3 采样与测定

于2017年7月收获后按照“S”形采样法采集各小区0—5,5—10,10—30 cm各土层供试土样2 000 g左右,其中1 000 g装于硬质塑料保鲜盒带回实验室自然风干后用于土壤团聚体分析;500 g装于塑料自封袋带回实验室自然风干后过2 mm筛用于土壤化学性质分析;500 g装于塑料自封袋带回实验室储存于4℃冰柜,用于生物指标测定。

土壤有机碳利用0.5 mol/L稀盐酸除无机碳后采用碳氮联合分析仪(Multi N/C 2100s, Jena, Germany)测定<sup>[4]</sup>;全氮采用全自动间断化学分析仪测定(Smartchem 140, AMS, 意大利);土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸,0.5 mol/L硫酸钾浸提后利用碳氮联合分析仪测定;水溶性有机碳采用超纯水(水土比5:1)浸提后,利用碳氮联合分析仪测定;轻组有机碳利用1.7 g/cm<sup>3</sup>分离,0.5 mol/L稀盐酸除无机碳后利用碳氮联合分析仪测定,重组有机碳利用土壤有机碳减轻组有机碳得到。

### 1.4 数据处理

文中全氮、有机碳和各碳组分平均含量采用加权平均法计算,计算公式为(以全氮为例):

$$TN \text{ 平均值} = (TN_{0-5 \text{ cm}} + TN_{5-10 \text{ cm}} + TN_{10-30 \text{ cm}} \times 4) / 6 \quad (1)$$

碳组分分配比率计算公式为:

$$\text{碳组分分配比率} = \frac{\text{碳组分平均含量}}{\text{有机碳平均含量}} \times 100\% \quad (2)$$

文中表格采用Excel 2013软件制作,数据利用SPSS 19.0软件选用多因素方差分析,新负极差减法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳氮添加对土壤有机碳及全氮含量的影响

土壤有机碳和氮素是衡量土壤肥力高低的重要指标,直接影响作物的生长和产量。长期施肥通过改变土壤物理、化学和生物学性质,进而影响土壤有机碳、氮含量<sup>[5]</sup>。由表2可知,添加氮素、生物质炭或秸秆皆对提高土壤有机碳含量具有显著的促进作用,但各因素的效应大小却有所不同,各土层中均为生物质炭>秸秆>氮素,且各因素间无显著交互效应。较无碳素添加处理(CN0、CN50、CN100,简称CN),秸秆配施氮素处理(SN0、SN50、SN100,简称SN)和生物质炭配施氮素处理(BN0、BN50、BN100,简称BN)均能显著提高SOC平均含量5.1%和19.0%。较无氮素添加处理(CN0、SN0、BN0,简称N0),N50处理(CN50、SN50、BN50)与N100处理(CN100、SN100、BN100)可分别提升土壤有机碳平均含量3.14%、3.84%。各因素均具有明显的层次效应,随土层加深,SOC呈显著的递减趋势,且层次与不同碳源之间具有显著的交互效应,而氮素与土层间交互效应不显著。

表2 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤有机碳的影响

编号	处理	有机碳 SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	10.27c	9.25e	8.75c	9.09f
2	BN0	13.45a	11.91b	10.23a	11.05b
3	SN0	11.89b	10.11d	9.25b	9.83d
4	CN50	10.73c	9.77d	9.33b	9.64e
5	BN50	13.74a	12.29ab	10.41a	11.28a
6	SN50	12.33b	10.60c	9.25b	9.99c
7	CN100	10.73c	9.86d	9.34b	9.66e
8	BN100	14.00a	12.47a	10.54a	11.44a
9	SN100	12.35b	10.65c	9.28b	10.02c
	土层	a	b	c	
	N		12.13***		
	生物质炭		1119.45***		
	秸秆		149.53***		
	N×生物质炭		1.00(ns)		
	N×秸秆		1.02(ns)		
	N×土层		0.69(ns)		
	秸秆×土层		38.49***		
	生物质炭×土层		65.56***		

注:表中同列小写字母表示统计检验在P≤5%水平差异显著;ns表示该因子在P≤5%水平下无显著效应;\*表示该因子在P≤5%水平下有显著效应;\*\*表示该因子在P≤1%水平下有显著效应;\*\*\*表示该因子在P≤0.1%水平下有显著效应。下同。

由表3可知,氮素、生物质炭及秸秆皆对土壤全氮(TN)含量具有显著提升效应,且各因素的效应大小为:生物质炭>氮素>秸秆,各因素之间无显著交互效应。较之CN处理,BN处理和SN处理均能分别显著提高TN平均含量8.99%和2.35%。较N0处理,N50处理与N100处理可分别提升土壤TN平

均含量 4.1%, 6.0%。各因素均具有明显的层次效应, 随土层加深, TN 呈显著的递减趋势, 生物质碳、秸秆均与土层有显著交互作用, 其中生物质碳添加与土层之间交互效应在  $P \leq 1\%$  水平达到显著, 氮素与土层无显著的交互效应。

表 3 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤全氮的影响

编号	处理	全氮 TN/(g · kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	0.87d	0.82e	0.77cd	0.80e
2	BN0	0.98b	0.90bcd	0.84ab	0.87b
3	SN0	0.91c	0.84e	0.80bc	0.83d
4	CN50	0.91c	0.86de	0.81b	0.84d
5	BN50	1.04a	0.97a	0.86a	0.91a
6	SN50	0.95bc	0.92abc	0.81b	0.85bc
7	CN100	0.93c	0.87cde	0.83b	0.85cd
8	BN100	1.06a	0.97a	0.88a	0.93a
9	SN100	0.98b	0.93ab	0.82b	0.87b
	土层	a	b	c	
	N		22.93***		
	生物质炭		138.15***		
	秸秆		17.12***		
	N×生物质炭		0.86 (ns)		
	N×秸秆		0.62(ns)		
	N×土层		1.26(ns)		
	秸秆×土层		2.71*		
	生物质炭×土层		6.18**		

## 2.2 碳氮添加对土壤有机碳组分的影响

2.2.1 土壤可溶性有机碳和微生物量碳 目前土壤有机碳尚无统一的分组, 研究者<sup>[14]</sup>往往可以根据自己的需要进行分组。可溶性有机碳是具有一定溶解性的有机碳, 其活性较高<sup>[15]</sup>; 土壤微生物量碳作为土壤碳库质量的敏感指示因子可推断碳素有效性<sup>[16]</sup>; 可溶性有机碳和微生物量碳可作为土壤有机碳变化的早期指标和活性有机碳变化的指标。

由表 4 可知, 添加氮素、生物质炭或秸秆皆对土壤可溶性有机碳(DOC)含量的提高具有显著的促进作用, 且氮素与秸秆添加的效应达到显著水平, 各因素按其影响效应高低排序为秸秆>氮素>生物质炭, 各因素之间没有显著的交互效应。SN 处理和 BN 处理较之 CN 处理均能分别显著提高 DOC 平均含量 47.92% 和 7.58%。较 N0 处理, N50 处理与 N100 处理可分别显著提升土壤 DOC 平均含量 8.5%, 17.6%。各处理 DOC 含量均具有明显的层次效应, 且随土层加深而降低, 但层次与各因素之间无显著的交互效应。

由表 5 可知, 各因素对土壤微生物量碳(MBC)含量的提升效应均达到显著作用, 相较而言, 秸秆>生物质炭>氮素, 且各因素之间无显著交互效应。较 CN 处理, SN 处理和 BN 处理可分别显著提升 MBC 平均含量 41.5% 和 15.0%。N50 处理与 N100 处理较 N0 处理可分别显著提升 MBC 含量 4.7%, 10.5%。各因素均具有明显的层次效应, 具体表现为 MBC 含量随土层

加深呈显著递减趋势, 且层次与秸秆添加之间具有及显著的交互效应, 其主要作用层在 0—10 cm, 生物质碳、氮素与土层之间交互效应不显著。

表 4 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤可溶性有机碳的影响

编号	处理	可溶性有机碳 DOC/(mg · kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	97.65d	77.44c	69.27b	75.36e
2	BN0	103.65d	81.11c	76.35b	81.69de
3	SN0	162.05b	121.59b	100.13a	114.03b
4	CN50	106.51d	82.47c	74.83b	81.38de
5	BN50	110.82cd	92.86c	80.22b	87.43cd
6	SN50	172.61ab	142.23a	102.66a	120.91ab
7	CN100	114.64cd	90.21c	81.64b	88.57cd
8	BN100	129.20c	97.95c	85.41b	94.80c
9	SN100	187.12a	153.08a	106.85a	127.93a
	土层	a	b	c	
	N		17.09***		
	生物质炭		6.85*		
	秸秆		356.39***		
	N×生物质炭		0.12 (ns)		
	N×秸秆		0.60 (ns)		
	N×土层		1.34(ns)		
	秸秆×土层		19.36(ns)		
	生物质炭×土层		0.10(ns)		

表 5 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤微生物量碳的影响

编号	处理	微生物量碳 MBC/(mg · kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	164.31f	157.44h	118.60f	132.69f
2	BN0	190.32d	177.11fg	143.01cd	153.91d
3	SN0	259.39b	228.25c	162.80ab	189.81b
4	CN50	171.85ef	167.81gh	124.16ef	139.38ef
5	BN50	198.82cd	184.86ef	160.22cd	160.98cd
6	SN50	271.28b	242.23b	169.32a	198.47ab
7	CN100	185.30de	170.21g	134.97de	149.23e
8	BN100	207.87c	195.28e	165.41bc	169.46b
9	SN100	289.78a	253.08a	176.19a	207.93a
	土层	a	b	c	
	N		32.79***		
	生物质炭		120.88***		
	秸秆		1339.37***		
	N×生物质炭		0.00(ns)		
	N×秸秆		0.79 (ns)		
	N×土层		0.91(ns)		
	秸秆×土层		66.42***		
	生物质炭×土层		0.66(ns)		

2.2.2 土壤轻组有机碳和重组有机碳 利用密度分组技术将土壤有机碳分成轻组和重组, 其中轻组有机碳亦很活跃, 也是有机碳库中较为敏感和广受关注的一个指标; 而重组有机碳作为稳态碳素影响着土壤物理结构及稳定性<sup>[17]</sup>。由表 6 可知, 氮素、生物质炭或秸秆皆对土壤轻组有机碳(LFOC)含量的提高具有显著促进作用。各因素按其影响效应高低排序为: 秸秆>生物质炭>氮素, 且各因素间无显著交互效应。较 CN 处理, SN 处理和 BN 处理可分别显著提升 LFOC 平均含量 136.4% 和 68.3%。

N50 处理与 N100 处理较 N0 处理可分别显著提升 LFOC 平均含量 12.4%, 20.9%。各因素均具有明显的层次效应,随土层加深,LFOC 呈显著递减趋势,且层次与秸秆间具有显著的交互效应。

表 6 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤轻组有机碳的影响

编号	处理	轻组有机碳 LFOC/(g·kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	0.92h	0.79i	0.64i	0.71i
2	BN0	1.59e	1.36f	1.22f	1.31f
3	SN0	2.35b	2.03c	1.68c	1.85c
4	CN50	1.13g	0.94h	0.77h	0.86h
5	BN50	1.72d	1.48e	1.37e	1.44e
6	SN50	2.59a	2.29b	1.84b	2.04b
7	CN100	1.26f	1.08g	0.89g	0.99g
8	BN100	1.91c	1.60d	1.44d	1.54d
9	SN100	2.67a	2.41a	1.95a	2.14a
	土层	a	b	c	
	N		105.17***		
	生物质炭		1282.42***		
	秸秆		5914.31***		
	N×生物质炭		0.39(ns)		
	N×秸秆		1.15 (ns)		
	N×土层		1.04(ns)		
	秸秆×土层		44.15***		
	生物质炭×土层		2.75(ns)		

由表 7 可知,添加氮素对土壤重组有机碳(HFOC)含量无显著影响,添加生物质炭和秸秆皆对 HFOC 含量具有显著的影响,各因素之间没有显著的交互效应。较 CN 处理,BN 处理可显著提升 HFOC 平均含量 14.1%。HFOC 含量有明显的层次效应,各处理 HFOC 含量均随土层加深呈显著递减趋势,添加生物质炭对 0—30 cm 各层次土壤 HFOC 含量均具有显著提高促进作用,而添加秸秆仅对 0—5 cm 土层 HFOC 有促进作用,而在 5—30 cm 土层对土壤 HFOC 含量有显著降低作用。土层与秸秆添加和生物质炭添加之间均具有显著的交互效应,而氮素与土层间无显著交互作用。

### 2.3 碳氮添加对土壤有机碳组分分配率的影响

由表 8 可知,氮素、秸秆、生物质炭均对碳组分分配比率有显著效应(除生物质炭对微生物量碳分配比率的效应),秸秆的效应最高。可溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳 3 组活性碳组分分配比率均以 SN 处理的最高,BN 处理的最低。而 CN 处理的重组有机碳分配比率最高,SN 处理的最低。较 CN 和 BN 处理,SN 处理可分别显著提升可溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳 3 组活性碳组分分配比率 40.9%, 34.6%, 125.3% 和 55.3%, 39.3%, 59.0%。N100 和 N50 处理较 N0 处理可分别显著提升可溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳分配比率 3.7%, 1.9%, 9.6% 和 11.0%, 6.5%, 17.3%。重组有机碳分配比率以 CN 处理的最高,SN 处理的最低。较之 BN 和 SN 处理,

CN 处理可显著提升重组有机碳分配比率 4.3% 和 14.1%。较之 N100 和 N50 处理,N0 处理可分别显著提升重组有机碳分配比率 2.6% 和 1.4%。

表 7 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤重组有机碳的影响

编号	处理	重组有机碳 HFOC/(g·kg <sup>-1</sup> )			
		0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	平均
1	CN0	9.38b	8.59b	8.21cd	8.47b
2	BN0	11.86a	9.68a	9.01ab	9.60a
3	SN0	9.55b	8.08b	7.84de	8.16b
4	CN50	9.37b	8.61b	8.56bc	8.71b
5	BN50	11.99a	10.25a	9.11ab	9.78a
6	SN50	9.75b	8.22b	7.58e	8.04b
7	CN100	9.40b	8.41ab	8.45c	8.60b
8	BN100	12.09a	9.87a	9.04a	9.68a
9	SN100	9.48b	8.08b	7.67e	8.04b
	土层	a	b	c	
	N		0.86(ns)		
	生物质炭		261.12***		
	秸秆		10.21**		
	N×生物质炭		0.22(ns)		
	N×秸秆		0.12(ns)		
	N×土层		0.28(ns)		
	秸秆×土层		8.06***		
	生物质炭×土层		35.30***		

表 8 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤

有机碳组分分配的影响

单位:%

处理	碳组分分配比率			
	可溶性有机碳	微生物量碳	轻组有机碳	重组有机碳
CN0	0.83cd	1.46b	7.83h	92.17a
BN0	0.74d	1.39b	11.81e	88.19c
SN0	1.16b	1.93a	18.81c	81.19d
CN50	0.84cd	1.45b	8.91g	91.09b
BN50	0.78d	1.43b	12.82d	87.18c
SN50	1.21ab	1.99a	20.42b	79.58e
CN100	0.92c	1.54b	10.18f	89.82b
BN100	0.83cd	1.48b	13.51d	86.49d
SN100	1.28a	2.07a	21.42a	78.58e
N	3.96*	5.71*	35.18***	6.67**
生物质炭	7.49*	3.11(ns)	316.30***	72.10***
秸秆	136.24***	328.03***	2874.39***	292.48***
N×生物质炭	0.05(ns)	0.31(ns)	1.15(ns)	2.07(ns)
N×秸秆	0.15(ns)	0.62(ns)	0.73(ns)	0.51(ns)

## 3 讨论

土壤中添加外源有机物料可提升土壤有机碳含量<sup>[3-4,6]</sup>。但生物质炭添加处理下土壤有机碳高于秸秆的,这主要与生物质炭中的有机碳多以高度芳香化的稳定态有机碳存在,其矿化、腐解率较低有关,同时也说明生物质炭可显著增加土壤重组有机碳。当氮肥进入土壤后,在硝化作用下会迅速转化为土壤有效态氮,而土壤有效氮素的损失会有多条途径,譬如氨挥发、氧化亚氮排放、淋失等均会引起氮素的损失,添加外源有机物料会提高土壤对氮素的吸附能力<sup>[6,15,18]</sup>,葛顺峰等<sup>[18]</sup>研究发现,添加秸秆和生物质炭可显著增加氮回收率,降低氮损失率,且生物质炭效果最好,这和生物质炭的吸附能力有关。虽然生物质炭含有较高的碳素,但其活

性碳素较少,多以高度芳香化有机碳存在,尤其是随着试验时间的推进,其活性碳素也会被逐渐矿化、降解,因此,生物质炭对土壤水溶性有机碳含量影响并不显著。虽然生物质炭可提升产量、生物量<sup>[5]</sup>,但是根系分泌物、凋落物和有机肥直接输入的碳源相比毕竟有限,所以水溶性有机碳增加不多<sup>[19]</sup>。相对于秸秆,生物质炭中的碳素是稳定的,对微生物的活性无明显刺激作用<sup>[20]</sup>,这与本研究结果不同,这可能是由于生物质炭通过对土壤物理性质的影响,进而改善了微生物的生存环境有关。而添加秸秆下水溶性有机碳和微生物量碳含量高则归因于秸秆中活性有机质的分解。添加生物质炭和秸秆均可显著提升土壤轻组、重组有机碳含量,但生物质炭更有利于稳定态的土壤重组有机碳积累,秸秆施入有助于活性较高的土壤轻组有机碳积累,这主要是由于秸秆中的活性碳素较多,而生物质炭中的惰性碳素较高。添加氮素对土壤有机碳及其组分的提升效应可能是由于添加氮素有利于作物残茬和根系生物量的提升而引起的。

本研究发现,氮素与土层间的交互作用对土壤全氮、有机碳及其组分均无显著效应。这表明,在不同土壤层次,土壤全氮、有机碳及其组分随氮素添加水平的变化而呈现出相似的变化趋势和特征。这可能是由于氮素在土壤中具有较强的迁移性<sup>[6,10]</sup>,氮素添加量越高,则其在土层间的迁移量越大,反之亦然,致使在不同土层,氮素对土壤全氮、有机碳及其组分的影响皆随氮素添加水平的增加呈现出相似的趋势和特征。秸秆与土层间的交互效应对土壤全氮、有机碳、微生物量碳、轻组和重组有机碳皆有显著效应,随着土层的加深,添加秸秆对土壤全氮、有机碳、微生物量碳、轻组和重组有机碳的提升效应逐渐降低,尤其是在 10—30 cm 土层,降低幅度最大。这说明秸秆的作用具有明显的层化现象,这与武均等<sup>[4]</sup>的研究结果不同,这主要是由于试验年限较短,秸秆仅对土壤浅层环境具有较强的影响。生物质炭于土层的交互作用对土壤可溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳等活性有机碳无显著影响,这主要是因为生物质炭本身含有大量惰性碳素,进而导致不同生物质炭添加水平随土层变化呈现出较为相似的变化趋势。

土壤微生物量碳分配比率高,则土壤碳素有效性高、易于被微生物利用,有利于作物生长。土壤可溶性有机碳分配比率低,且土壤有机碳含量高,则有利于碳的固定和保存<sup>[21]</sup>。本研究发现,添加秸秆可显著提升可溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳 3 组活性碳组分分配比率,而添加生物质炭无显著提升效应。这主要是由于秸秆中含有大量的易分解的活性碳素<sup>[4]</sup>,而生物质炭所含的碳素以惰性为主<sup>[18]</sup>。研究结果还显示,无碳源

和氮素添加下重组有机碳分配比率最高,但这并不意味着该种模式对土壤固碳效应最高,这主要是由于无碳源和氮素添加下土壤微生物活性较低,其对土壤有机质的分解速率也低<sup>[15,19]</sup>,同时也不利于农业生产。

## 4 结论

(1)添加生物质炭、秸秆或氮素均可提升土壤有机碳和全氮含量,添加生物质炭对土壤有机碳的提升效应最高,而添加 100 kg/hm<sup>2</sup> 氮素更有利于全氮的提升,因此 BN100 处理更有利于该区土壤有机碳和全氮含量的提高。

(2)添加生物质炭对土壤 HFOC 影响高,而添加对土壤 DOC、MBC 和 LFOC 的影响高。因此添加生物质炭更有利于土壤惰性碳库的提升,添加秸秆更有助于土壤活性碳库的改善。

(3)从提升土壤质量的角度出发,推荐秸秆配施氮素模式,该模式下土壤碳素有效性高、易于被微生物利用,有利于作物生长。从提高土壤固碳角度考虑,推荐生物质炭配施氮素模式,该模式有利于碳的封存。

### 参考文献:

- [1] Ma W N, Li Z W, Ding K Y, et al. Stability of soil organic carbon and potential carbon sequestration at eroding and deposition sites [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16 (6): 1705-1717.
- [2] Wu J, Larsen K S, Linden L V D, et al. Synthesis on the carbon budget and cycling in a Danish, temperate deciduous forest [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 181(13): 94-107.
- [3] 王虎,王旭东,田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (12): 3491-3498.
- [4] 武均,蔡立群,张仁陟,等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (5): 728-736.
- [5] 徐均华,黄国强,营攀峰,等. 土壤有机碳研究进展及在农田生产中的应用[J]. *耕作与栽培*, 2018(2): 64-68.
- [6] 宋大利,刁向银,黄绍敏,等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 369-379.
- [7] 夏文建,王萍,刘秀梅,等. 长期施肥对红壤旱地有机碳、氮和磷的影响[J]. *江西农业学报*, 2017, 29(12): 27-31.
- [8] Hammerbeck A L, Stetson S J, Osborne S L, et al. Corn residue removal impact on soil aggregates in a no-till corn/soybean rotation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1399-1406.
- [9] 汪军,王德建,张刚,等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24 (5): 40-44.

- methods to quantify dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.
- [20] Blair G J, Lefory R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [21] Terrer C, Vicca S, Hungate B A, et al. Mycorrhizal association as a primary control of the CO<sub>2</sub> fertilization effect [J]. *Science*, 2016, 353(6294): 72-74.
- [22] 曹宏杰,倪红伟. 大气 CO<sub>2</sub> 升高对土壤碳循环影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(11): 1846-1852.
- [23] 龙凤玲,李义勇,方熊,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升和氮素添加对南亚热带模拟森林生态系统土壤碳稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(10): 1053-1063.
- [24] 谢晓金,李仁英,张耀鸿,等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻和玉米叶片光合生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(10): 120-123.
- [25] Cheng Y, Zhang J B, Zhu J G, et al. Ten years of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> doesn't alter soil nitrogen availability in a rice paddy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 98: 99-108.
- [26] 张继舟,倪红伟,王建波,等. 模拟氮沉降和 CO<sub>2</sub> 浓度增加对三江平原小叶章群落土壤总有机碳和氮素含量的影响[J]. *地球与环境*, 2013, 41(3): 217-225.
- [27] 王小治,张海进,孙伟,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻田土壤氮素的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2161-2165.
- [28] 雷振锋,郑海峰,沈国强,等. 垄距和天气对玉米灌浆期开顶式气室(OTCs)增温效果的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(1): 79-88.
- [29] 刘元,潘根兴,张辉,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1484-1491.
- [30] Bader K F, Körner C. No overall stimulation of soil respiration under mature deciduous forest trees after 7 years of CO<sub>2</sub> enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2830-2843.
- [31] Van Groenigen K J, Xia J Y, Osenberg C W, et al. Application of a two-pool model to soil carbon dynamics under elevated CO<sub>2</sub> [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4293-4297.
- [32] 虞凯浩,陈效民,陈旭,等. 模拟气候变化条件下太湖地区典型农田氮素的变化[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 96-100.
- [33] 肖列,刘国彬,李鹏,等. 短期 CO<sub>2</sub> 浓度升高和干旱胁迫对白羊草土壤碳氮和微生物根际效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3251-3259.
- [34] 周欢,蔡立群,张仁陟,等. 不同耕作方式下秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(1): 63-68.
- (上接第 220 页)
- [10] 王慧,刘金山,惠晓丽,等. 旱地土壤有机碳氮和供氮能力对长期不同氮肥用量的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 2988-2998.
- [11] 袁嫚嫚,邬刚,胡润,等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 27-35.
- [12] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [13] 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.
- [14] 廖敏,彭英,陈义. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 129-133.
- [15] 汤宏,沈健林,刘杰云,等. 稻秸的不同组分对水稻土微生物量碳氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 264-271.
- [16] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 222-230.
- [17] 谢锦升,杨玉盛,解明曙,等. 土壤轻组有机质研究进展[J]. *福建林学院学报*, 2006, 26(3): 281-288.
- [18] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重,阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 47(2): 366-373.
- [19] 丁少男,薛蕙,刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳,氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2146-2154.
- [20] Wu F P, Jia Z K, Wang S G, et al. Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(5): 555-565.
- [21] 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.