

DOI: 10.5846/stxb201504220829

韩玮, 申双和, 谢祖彬, 李博, 李玉婷, 刘琦. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响. 生态学报, 2016, 36(18): - .
Han W, Shen S H, Xie Z B, Li B, Li Y T, Liu Q. Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响

韩 玮¹, 申双和^{1,*}, 谢祖彬², 李 博¹, 李玉婷¹, 刘 琦²

1 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏省农业气象重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 生物炭被认为是土壤碳封存的有效手段, 但是关于生物炭对土壤不同密度组分有机碳影响的研究报道很少。本研究以南方稻麦轮作区水稻土为研究对象, 通过田间小区试验研究了不施有机物(CK)、玉米秸秆还田(CS)、施用 300℃ 热解生物炭(300BC)、施用 400℃ 热解生物炭(400BC)和施用 500℃ 热解生物炭(500BC)处理对土壤轻重组分质量比例, 土壤轻重组分有机碳和土壤微生物的影响。结果表明: 1) 施用生物炭显著提高了土壤轻组的质量比例和土壤轻组有机碳含量, 轻组有机碳含量为 500BC>400BC>300BC>CS>CK, 对重组有机碳影响不显著, 但重组有机碳在土壤中占重要比例; 2) 施加生物炭后土壤微生物量相对对照也有提高, 但是与施加秸秆处理相比, 微生物量提高幅度较小。研究表明, 生物炭能提高土壤有机碳含量, 尤其提高了土壤轻组有机碳的累积, 但由于生物炭特殊的芳烃结构, 其轻组组分化学性质稳定, 这与传统的土壤有机碳轻组理论不同。与秸秆处理相比, 生物炭处理具有较低的土壤微生物量与微生物商, 有利于土壤碳的固定。

关键词: 生物炭; 土壤有机碳; 轻组有机碳; 微生物生物量

Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil

HAN Wei¹, SHEN Shuanghe^{1,*}, XIE Zubin², LI Bo¹, LI Yuting¹, LIU Qi²

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The loss of soil organic matter is a major concern in many areas of the world, especially in China, in rice paddies under warm-humid climatic conditions. Because carbon content is typically associated with soil quality, there is a need to preserve soil carbon pools. Biochar is a material that has shown promise as a means of soil amendment and carbon sequestration. However, it is unclear how the added biochar affects the distribution of organic carbon among different density fractions. In the current study, a field experiment was conducted to study the effects of biochar application on the organic carbon distribution among different density fractions and the soil microbial biomass of paddy soil. The five treatments were soil only (CK), soil and corn straw (CS), soil and biochar produced at 300 °C (300BC), soil and biochar produced at 400 °C (400BC), and soil and biochar produced at 500 °C (500BC). The different biochars were added to the field twice, at a concentration of 6 t/hm². The results show that biochar application increased the size of the light fraction proportion significantly, by 39.81%—41.20% compared to the CK treatment. This may be because of the low density of biochar. The

基金项目: 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(Y212000016); 江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB170013); 江苏省农业气象重点实验室开放基金(JKLAM201205)

收稿日期: 2015-04-22; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yqzhr@nuist.edu.cn

added biochar increased the organic carbon content of the light fraction (LFOC) significantly, by 60.04%—69.66% compared to the CK treatment. LFOC in the different treatments was ordered as follows: 500BC > 400BC > 300BC > CS > CK. The organic carbon content was highest in the 500BC treatment, with a value of 185.1 g/kg. This may be due to the higher carbon content of biochar produced at higher temperatures. With the increase in pyrolysis temperature, the volatile matter content decreased, the organic carbon content increased, and the stability of the organic carbon increased. Additionally, compared to the control, corn straw application also increased the organic carbon content. The organic carbon content was significantly lower in the straw amendment treatment than in the biochar treatments. None of the treatments had a significant effect on the heavy fraction organic carbon (HFOC). Straw incorporation improved the soil microbial biomass significantly, because straw contains a large quantity of soluble carbohydrates, which may stimulate the growth of soil microorganisms. The incorporation of biochar improved the soil microbial biomass significantly; however, the soil microbial biomasses measured in biochar treatments were lower than that of the CS treatment. The biochar treatments contained less soil microbial biomass because of the extremely low microbial availability of biochar. The slight increase in soil microbial biomass observed in the biochar treatments could be explained by a microbial response to the porosity of biochar and the presence of biochar carbon, although the concentration of soluble carbohydrates was reduced by the pyrolysis treatment. These results suggest that the application of biochar increased the organic carbon content of the soil, especially the LFOC. Compared to the treatment involving the incorporation of straw, biochar incorporation decreased the soil microbial biomass and microbial quotient, which improves soil carbon fixation. However, in the biochar treatments, the chemical and biological stability of LFOC was high due to the aromatic structure of biochar, which is different from the traditional theory that LFOC is labile and easily recycled. We concluded that the application of biochar was a more efficient method of carbon sequestration in paddy soil than the incorporation of straw, because of the lower soil microbial biomass present in the biochar treatments.

Key Words: biochar; soil organic carbon; light fraction organic carbon; microbial biomass

土壤碳库是地球表面最大的碳库,在陆地碳循环和全球变化中起重要作用^[1]。近年来,秸秆焚烧等导致土壤碳库损失,如何增加土壤碳截留已引起研究者的高度重视^[2]。生物炭指生物质在缺氧的条件下经热解炭化制作而成的富碳物质,主要由芳香烃和单质碳或具有石墨结构的碳组成^[3]。由于生物炭具有极强的稳定性,生物炭技术被认为是碳封存的有效手段之一^[4-5]。利用农业废弃物(如作物秸秆等)生产生物炭,不仅减少了农业废弃物本身释放产生的 CO₂,还能增加土壤碳截留,增加土壤肥力,可以作为农业应对气候变化的增汇增产的双赢措施^[6-7]。

但是,利用总有机碳来评价生物炭对土壤碳的影响是不够的,进行土壤密度分组研究有利于进一步了解有机碳动态。密度分组是利用一定体积的相对密度重液(相对密度 1.6—2.2 g/cm³)将土壤分成轻组和重组进行研究。轻组是指土壤密度组分中比重小的部分,主要包括处于不同分解阶段的植物残体和微生物,传统理论认为,土壤轻组态有机碳(LFOC)是土壤中重要的活性碳组分^[8-9],具有较高的 C/N 比和较高的分解速率。另一种是重组,重组有机碳主要吸附在矿物表面或隐蔽在土壤微团聚体内部,其受耕作方式的影响较小,因此重组可能是土壤中稳定的碳库,研究重组有机碳对于认识土壤碳汇功能具有较为重要的意义^[10]。此外,土壤微生物在土壤中周转时间相对较快,对土壤环境变化较为敏感,与土壤有机碳关系密切,也常用来表征土壤有机碳的动态变化。有研究指出,生物炭的高芳香烃结构、孔隙结构及对水肥吸附作用也可为土壤微生物生长提供场所和养分^[11]。因此研究土壤微生物特征对于了解生物炭对土壤有机碳的动态影响具有重要意义。

尽管关于施用生物炭增加土壤碳截留的研究很多,但其对土壤不同密度组分有机碳的影响研究尚不多见,由于生物炭的生物有效性低,传统的轻-重组理论可能不适用于生物炭还田土壤。本文研究了在南方水

稻土上施用生物炭对土壤轻组,重组有机碳含量和土壤微生物量的影响,以期揭示生物炭对水稻土碳循环生物地球化学过程的影响机理。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省江都市小纪镇(119°42'E,32°35'N),亚热带湿润气候带,海拔 5 m,年降雨量 980 mm,蒸发量 1100 mm,年平均温度 14.9 °C,年日照时间>2100 h,年无霜期 220 d;土壤类型为中层砂浆水稻土;耕作方式为水稻-冬小麦复种,是典型的稻麦复种农田生态系统。

1.2 生物炭和土壤

本试验所选用生物炭是以玉米秸秆为原料,秸切切成小段(<5 cm)后转移到炭化炉中(专利批准号:20092023219 中国科学院南京土壤研究所研制 ZBXI 型),抽真空,充氮气,反复 3 次。在无氧状态下逐步加热,温度开始设定在 200 °C,逐步到 250 °C,300 °C,每一步升温(除了最后的温度)保持 1.5 小时,到目标温度(300,400,或 500 °C)恒温保持至尾气管不再冒烟为止,反应时间为 10—12 h。生物炭磨碎备用(大于 80% 粒径小于 4.76 mm)。生物炭及秸秆主要特征见表 1。土壤含有粘粒(<0.002 mm)13.6%,粉粒(0.002—0.05 mm)28.5%,和砂粒(0.05—2 mm)57.8%,砂壤质地。土壤的主要特性见表 1。

表 1 供试土壤、秸秆、生物炭的理化性质

Table 1 Chemical properties of the soil, straw, and biochar used in the experiment

项目 Item	C/(g/kg)	N/(g/kg)	P/(g/kg)	K/(g/kg)	pH	C/N
土壤 Inceptisol	20.5	1.9	0.635	15.24	7.6	10.6
玉米秸秆 Corn straw	412.0	8.5	0.995	13.5	-	48.5
300°C 生物炭 Biochar produced at 300 °C	574.8	13.5	2.34	28.3	8.47	42.6
400°C 生物炭 Biochar produced at 400 °C	597.7	13.4	2.47	29.8	9.52	44.6
500°C 生物炭 Biochar produced at 500 °C	651.1	5.5	4.37	31.3	9.82	118.4

1.3 试验设计和土壤样品采集

试验在 2011 和 2012 年两次施加生物炭或秸秆还田,用量均为 6 t/hm²。共设 5 个处理:对照(CK),秸秆还田(CS),添加 300 °C 生物炭(300BC),添加 400 °C 生物炭(400BC),添加 500 °C 生物炭(500BC)。每处理随机设 3 个重复,共计 15 个小区,小区面积为 10 m²。

生物炭施用或秸秆还田时间为水稻播种前(2011 年 6 月 20 日,2012 年 6 月 17 日),添加深度为 10 cm。水稻(*Oryza sativa* L.,南粳 40)在 2011 年 6 月 23 日和 2012 年 6 月 20 日移植。每平米 24 穴,行距 25 cm,穴距 16 cm,每穴 3 苗。稻季化肥施用量为:尿素(200 kg/hm²N,50%为基肥,10%为蘖肥,40%为穗肥),过磷酸钙(70 kg/hm²P₂O₅,基肥)和氯化钾(70 kg/hm² K₂O,基肥)。小麦(*Triticum aestivum* L.,宁麦 14 号)于 2011 年 11 月 5 日播种,播种密度为 320 粒/m²,2012 年 6 月 2 日收获。麦季化肥施用量为:尿素(180 kg/hm²,50%基肥,拔节期 10%,和抽穗期 40%),过磷酸钙(50 kg/hm² P₂O₅,基肥),氯化钾(50 kg/hm² K₂O,基肥)。

土壤样品的采集工作于 2012 年 10 月 20 日水稻收获后进行,每个小区按 S 形用土钻随机取样,采样深度 0—10 cm,四分法取样用于实验室分析。

1.4 样品处理与分析

土壤样品带回室内后分成两份,一份鲜样除去其中可见植物残体及土壤动物,过 2 mm 筛,混匀。调节土壤含水量至饱和持水量的 60%后将其置于广口瓶内,用保鲜膜封口,25 °C 下培养 7—15 d 后进行微生物量碳、氮、磷的测定。另一份土样密度分组后测定土壤有机碳。

土壤轻组有机碳的分析采用密度浮选法^[12],重液为 NaI。具体操作方法为:称取 10 g 风干土放入离心管中,加入 50 ml 重液(密度为 1.8 g/cm³),振荡 1 h,将悬浮物离心(3500 r/min,30 min)。收集上层悬浮物,重

复加入重液,分离、离心,共收集 3 次。将所得样品过 0.45 μm 滤膜真空抽滤,然后用 100 mL 0.01 mol/L 的 CaCl_2 溶液洗涤,再用 200 mL 蒸馏水反复冲洗。收集滤膜上样品至烧杯中 65 $^\circ\text{C}$ 烘干测定有机碳含量。剩余部分为重组,用 100 mL 0.01 mol/L CaCl_2 溶液洗涤,再用 200 mL 蒸馏水反复冲洗,收集重组。测定样品重量回收率,所得回收率均在 95% 以上。

土壤有机碳测定采用重铬酸钾-外加热法:在外加热条件下(油浴温度为 175—180 $^\circ\text{C}$ 、沸腾 5 min)用一定浓度的重铬酸钾-硫酸溶液氧化土壤有机质,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁滴定。通过所消耗的硫酸亚铁标准溶液的体积得到有机碳含量^[13]。

微生物量采用氯仿熏蒸-浸提法^[14]。土壤微生物量碳,氮采用氯仿熏蒸-硫酸钾提取法测定,称取 6 份预培养土样,每一份土壤 25 g(烘干基),其中 3 份直接用 0.5 mol/L 的硫酸钾提取,另 3 份在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),熏蒸的土样除去氯仿后立即提取。浸提液中有机碳用重铬酸钾氧化法测定,浸提液中全氮用凯氏法消煮-全自动定氮仪测定,以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的碳,氮的差值乘以相应转换系数 k_c (0.38), k_N (0.45),分别计算土壤微生物量碳,氮。土壤微生物磷采用熏蒸培养-碳酸氢钠提取法测定,称取 6 份预培养土样,每份土壤 5.0 g(烘干基),3 份直接用 0.5 mol/L 的碳酸钠提取,另外 3 份熏蒸后提取。采用钼锑抗比色法测定分析提取液中的磷。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的磷的差值乘以转换系数 k_p (0.4),计算土壤微生物生物量磷。

1.5 数据处理

数据处理用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析和回归分析,LSD 法(最小显著差异法, $P < 0.05$)来实现不同处理下试验数据均值之间的比较分析。

土壤中各组分碳含量计算如下:

$$1 \text{ kg 土壤中各组分碳含量(g/kg)} = \text{组分碳含量}(\%) \times \text{组分干重比例}(\%) \times 10 \quad (1)$$

2 结果

2.1 土壤不同密度组分比例及不同密度组分有机碳含量的变化

土壤不同密度组分干重百分比见表 2。可以看出,对照处理土壤轻组的百分比为 4.32%,秸秆处理土壤轻组百分比为 5.06%;生物炭处理土壤轻组为 6.01%—6.10%。可见外源有机物料的添加增加了轻组干重,尤其是添加生物炭后土壤轻组比例显著上升。这是因为生物炭加工后粒径很小且具有多孔和低密度的特性,所以大多数生物炭都集中于轻组生物炭中。反之,生物炭及秸秆处理土壤重组质量百分比都有所下降。

表 2 土壤不同密度组分干重比例 (%)

Table 2 Dry weight percent of light fraction and heavy fraction of soil

处理 Treatment	CK	CS	300BC	400BC	500BC
轻组 Light fraction	4.32±0.56 b	5.06±0.54 ab	6.10±0.66 a	6.01±1.90 a	6.04±0.73 a
重组 Heavy fraction	95.68±1.25 a	94.94±0.25 ab	93.90±0.54 b	93.99±0.61 b	93.96±1.10 b

同列中不同字母表差异显著 ($P < 0.05$)

从表 3 可见,与 CK 相比,生物炭处理大幅提高了轻组有机碳含量,轻组有机碳含量提高了 60.04%—69.66%,秸秆处理也略有增加。这是因为大多数生物炭颗粒都集中于轻组生物炭中。另外不同生物炭处理轻组有机碳含量也不同,随着生物炭热解温度的提高,轻组有机碳也呈增加趋势,其中 500 $^\circ\text{C}$ 处理轻组有机碳含量最高。而对于重组有机碳,虽然相比对照处理也有一定程度提高,但是增加幅度远小于轻组有机碳,各处理间无显著性差异。各处理轻组有机碳含量为 109.1—185.1 g kg^{-1} ,重组有机碳含量为 19.8—20.9 g kg^{-1} ,所有处理中轻组有机碳含量远远高于重组有机碳。

2.2 土壤有机碳在轻重组分的分布

生物炭显著提高总有机碳含量(图 1)。与 CK 相比,生物炭处理总有机碳含量显著增加,增加了

25.58%—30.32%; 秸秆处理总有机碳含量也有增加。对于轻组而言,对照土壤轻组有机碳占总有机碳的 19.92%, 秸秆处理土壤轻组有机碳占总有机碳的 23.67%, 而生物炭处理土壤轻组有机碳占总有机碳的 35.86%—36.24%。可以看出,生物炭施用后轻组有机碳所占比例大幅上升。重组比例正好与轻组相反,生物炭处理使得土壤重组有机碳所占比例下降。但是尽管如此,重组有机碳对总有机碳量的贡献明显高于轻组有机碳。

表 3 不同密度组分内土壤有机碳含量(g/kg)

Table 3 Organic C concentration in different fractions of soil

Treatment	CK	CS	300BC	400BC	500BC
轻组有机碳 Light fraction organic carbon	109.08±7.13 c	116.40±11.41 b	174.59±8.62 a	178.84±7.50 a	185.05±9.48 a
重组有机碳 Heavy fraction organic carbon	19.79±1.54 a	20.00±2.97 a	20.28±1.18 a	20.29±2.03 a	20.91±2.15 a

同列中不同字母表差异显著($P < 0.05$)

将不同处理的土壤总有机碳、轻组和重组有机碳做相关分析(表 4),表明轻组有机碳与总有机碳均表现为显著正相关关系,说明土壤总有机碳与土壤轻组有机碳的变化具有一致性。

2.3 土壤微生物量的变化

微生物生物量碳是土壤有机碳的重要组成部分,也是土壤重要的活性有机碳指标。同时土壤微生物是有机碳的分解者,对土壤碳循环起到重要的传输作用^[14]。图 2 是土壤微生物生物碳、氮、磷含量。可见,添加生物炭和玉米秸秆的土壤微生物生物碳、氮、磷含量显著高于对照,其中,添加秸秆的土壤微生物生物碳、氮、磷含量最高,添加生物炭的土壤微生物生物碳、氮、磷显著低于秸秆处理。但是三个生物炭处理的土壤微生物生物碳、氮、磷含量没有显著差异。

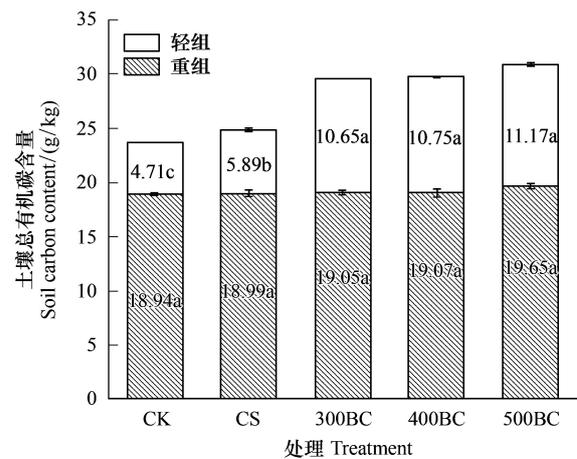


图 1 土壤有机碳密度在不同密度组分中的分布

Fig.1 Distribution of soil C storage in different fractions

表 4 土壤各组分有机碳含量与总有机碳含量的相关关系

Table 4 Correlation of LFOC, HFOC and SOC

项目 Item	轻组有机碳含量 Light fraction organic carbon	重组有机碳含量 Heavy fraction organic carbon	土壤总有机碳含量 Soil organic carbon
轻组有机碳含量 Light fraction organic carbon	1.00	0.57	0.99 **
重组有机碳含量 Heavy fraction organic carbon	—	1.00	0.65
土壤有机碳含量 Soil organic carbon	—	—	1.00

** 表示 0.01 水平显著性差异, * 表示 0.05 水平显著性差异

土壤微生物量碳与土壤总有机碳的比值称为微生物商,微生物商对于评价土壤健康变化具有重要意义。微生物商的变化可以反映出土壤中的有机碳输入动态,以及土壤中的碳损失和土壤矿物质固定碳的能力^[15]。已有研究指出有机物输入增加能够提高土壤微生物商^[16],但是由于有机物料成分的不同对微生物影响各异^[17]。本研究中秸秆处理即显著增加了土壤微生物商,几乎是对照土壤微生物商的两倍。但是生物炭处理土壤微生物商与对照接近,这是由于生物炭稳定的有机碳形态所致,相比秸秆,微生物利用生物炭中有机碳的能力下降,可见生物炭更有利于土壤固碳。不同温度生物炭处理微生物商差别不大。

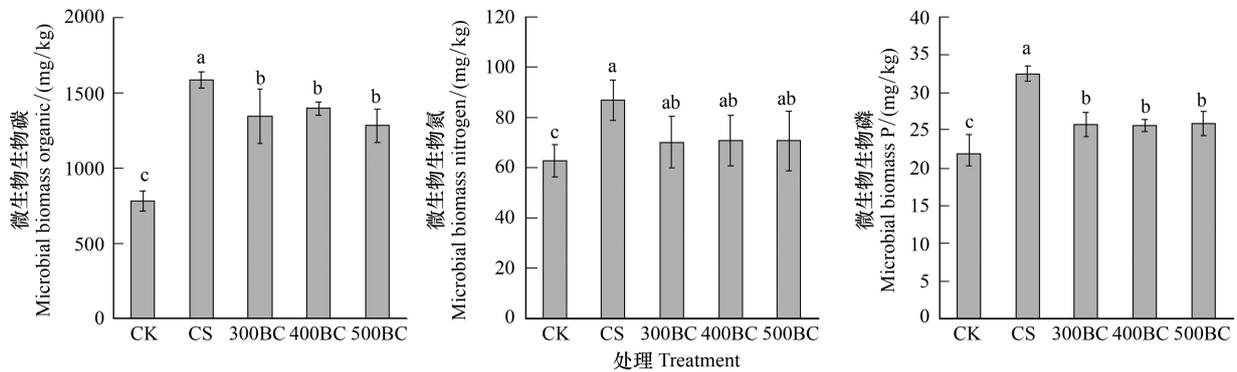


图2 土壤微生物生物碳、氮、磷含量

Fig.2 The soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus content

3 讨论

3.1 生物炭和秸秆对土壤有机碳及各密度组分碳的影响程度

土壤有机碳含量是土壤微生物等各种因素综合影响下有机碳输入与输出之间动态平衡的结果。本研究中施加生物炭后,土壤总有机碳含量增加幅度远远高于秸秆还田处理。这可能与两个方面有关。第一,在较高的温度下产生的生物炭有着较高的碳含量。Richard 等亦指出外界碳源投入量越多,轻组有机碳含量越高^[18]。生物炭碳含量为 57.48%—65.11%,而秸秆碳含量为 41.20%,前者碳含量要远高于后者,这是生物炭施用后引起土壤碳含量增加的主要原因之一。第二,有机物料的化学组成决定着其分解过程,当有机物料量一定时,土壤有机碳的累积取决于有机物料的化学组成^[19]。生物炭和其他有机物之间的化学差异最大的是芳香碳所占比例较大^[20]。随着热解温度的升高,有机碳含量增加,有机碳稳定性增加^[21]。这些结构特征决定了生物炭的高稳定性,因而施入土壤后分解较慢。而秸秆中含有大量新鲜有机质,引起土壤有机碳的激发效应,分解较快。本研究中,生物炭连续投入土壤两年后,土壤有机碳的增加总量达到碳投入总量的 86.02%—91.77%,而连续秸秆还田处理两年后土壤有机碳的增加总量仅有碳投入总量的 24.88%,这说明与秸秆相比,在水稻土上添加生物炭更有增加土壤碳汇的潜力。Zimmerman 等人^[22]发现生物炭施入土壤后矿化速率很低。Khare 等人^[23]也发现,与秸秆相比施入生物炭明显增加土壤固碳。这些结果与我们的研究结果一致。

本研究中生物炭处理土壤总有机碳含量较高,并随着生物炭热解温度的升高而升高,最高为 500BC。生物炭内的碳形式可能取决于植物细胞中碳的结构特征、炭化条件(主要是温度和时间)^[24]。有研究发现,当裂解温度升高时,生物炭的产率急剧下降;生物炭随裂解温度的升高而进一步炭化,其中剩余的碳重排形成稳定碳结构形式^[25],不稳定的脂肪族化合物在热解过程中有所损失,并形成更稳定的芳烃成分。Ahmad 等^[26]的研究也表明,与较低温度制得的生物炭相比,高温制得的生物炭具有更高的芳香性和更低的孔隙度,致使较高温条件下制得的生物炭更加稳定,其自身所含易分解组分更少。这与本研究中较高温裂解生物炭处理土壤有机碳增幅更大的结果一致。

生物炭施用后轻组有机碳含量显著升高。轻组有机碳的升高也和有机物料的质量密切相关。生物炭由于有机碳含量高,形态稳定,因此轻组有机碳含量增加较秸秆处理多。轻组有机碳与土壤总有机碳的变化趋势一致,呈极显著正相关性,说明土壤有机碳活性组分的含量很大程度上取决于土壤有机碳的贮存量,这与马

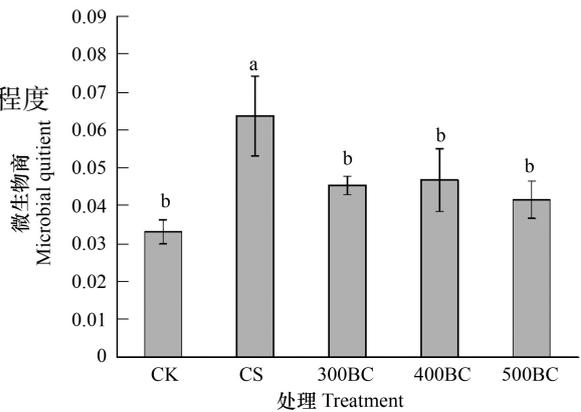


图3 土壤微生物商

Fig.3 The microbial quotient of soil

少杰等^[27]研究结果一致。本研究中不同处理间轻组有机碳差异较土壤总有机碳显著,均说明轻组有机碳比土壤总有机碳变化剧烈。因为轻组有机质更易受外界环境条件变化的影响^[28],本研究中外源有机物质为轻组有机碳提供了物质来源,因此土壤轻组含量显著增加。

另外,生物炭处理显著提高了轻组有机碳在土壤总有机碳中所占比例。轻组中碳增加的主要原因不仅是由于轻组本身碳含量升高,也是由于土壤中轻组干重升高导致的。相比对照,秸秆处理轻组质量提高了17.13%,而生物炭处理轻组质量提高了39.81%—41.20%,生物炭不是均一物质,在密度上体现为表面密度较低(这使得轻重分组中生物炭处理组的轻组含量增加)^[29],管天玉也认为施用生物炭显著增加了土壤中轻组的重量^[30]。本实验中,因为相比玉米秸秆生物炭具有多孔和低密度的特性,大量集中于土壤轻组中,因而大幅度提高了土壤轻组质量百分比,从而大幅提高了轻组有机碳比例。生物炭处理中的轻组部分,主要包括新加入的生物炭颗粒,由于生物炭本身的化学稳定性和生物稳定性,这里的轻组组分性质稳定,与传统意义上的轻组组分不同。传统理论认为,土壤轻组是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分,具有很强的生物学活性,较高的周转速率,易分解^[31]。而本实验中,生物炭处理中的轻组组分却因为生物炭的本身的稳定性很难被微生物利用,生物有效性较低。

本研究表明,各处理重组和轻组有机碳占总有机碳的比例分别为63.76%—80.08%和19.92%—36.24%,说明轻组是土壤有机碳库的重要组成部分,但重组中的有机碳占优势。这与传统的有机质轻重分组理论一致。虽然不同处理中重组的差异不像轻组那么显著,施用生物炭对重组有机碳含量也有一定的影响。重组有机碳是土壤中腐殖化程度较高,与土壤矿质颗粒紧密结合的一类有机碳。因此,重组有机碳对耕作、土地利用变化的反应不如轻组敏感。但是施用生物炭或秸秆还田使得运移到土壤矿质颗粒的有机碳绝对数量上升。这样致使重组中有机碳也有一定程度的上升。虽然生物炭作为一种高度稳定的高含碳物质,难于较大程度的与土壤无机交替结合,但已有研究显示土壤中的生物炭会和土壤粘土矿物结合而成为土壤重组有机质的一部分^[32-34]。另外,生物炭密度的不均一性使得重组分离试验过程中部分高密度的生物炭以颗粒状态直接进入土壤重组,可使生物炭处理土壤的重组有机碳测定值增高^[29,35]。

3.2 土壤有机碳与土壤微生物特征的相互关系

本试验表明秸秆处理和生物炭处理土壤微生物生物量碳、氮、磷的含量明显高于对照。这与 Gul 等^[36]和 Domene 等^[37]的结论一致。土壤微生物量的增加有助于当地土壤质量的改良。土壤中生物炭的变化过程可受到微生物活动影响。微生物数量的增多可促进生物炭材料在土壤中的氧化降解,形成更多的表面基团,使其更好的与土壤粘粒结合,从而促进土壤团聚结构、有机无机复合体结构的形成^[29]。本实验中,秸秆处理增加了土壤微生物生物量,这是因为秸秆为微生物生长和繁殖提供了大量的碳源和能源,刺激了微生物的生长,这与吴荣美等^[38]和武际等^[39]的研究一致。生物炭在一定程度上也可显著增加土壤微生物量,分析原因可能是:一方面,生物炭具有疏松多孔的结构、巨大的表面积以及能够保持水分和空气的特点,可为土壤微生物的聚集、生长与繁殖提供良好的环境^[20,40];另一方面,生物炭含碳量丰富,在培养过程中会部分地降解,为微生物提供新的碳源,促进特定微生物的生长^[41]。也有研究者认为,生物炭的芳香烃成分对新微生物量的合成也产生贡献^[42-43]。但是生物炭处理微生物量低于秸秆处理,这是因为生物炭与秸秆相比有机碳形态更为稳定,生物有效性较低,不易被微生物利用。有研究显示,生物炭的添加不仅促进了土壤腐殖质的形成,还有助于碳水化合物、酯族、芳烃等难以被微生物利用的有机大分子的形成^[44-45],因此这种过程将降低土壤微生物量。生物炭处理因为微生物量相对较低,有机碳的微生物分解率较低,因此在应用生物炭更有利于增加土壤碳储量。

4 结论

(1) 施用生物炭增加了土壤中轻组质量比例,施用生物炭后土壤中各密度组分有机碳均有增加,但是轻组有机碳较重组有机碳含量增长比例更高。随着生物炭裂解温度的提高,土壤有机碳含量增加,500℃生物炭

处理土壤有机碳含量最高。

(2) 施用生物炭和玉米秸秆还田均增加了土壤微生物生物量,但是秸秆处理增长幅度较大,生物炭处理增长幅度较小,施用生物炭条件下土壤微生物量与微生物商均较低,说明该条件下生物炭相比秸秆具有更高的稳定性。

(3) 相比秸秆还田处理,生物炭显著增加了土壤轻组有机碳含量,传统理论认为轻组有机碳周转快,是易变有机碳的良好指标,而本研究中生物炭所含有的碳具有高度的稳定性,这与传统的土壤轻组有机质理论不同。

参考文献 (References):

- [1] 余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.
- [2] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [3] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 朱春悟. 生物炭研究进展及其研究方向. 土壤, 2011, 43(6): 857-861.
- [4] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 395-419.
- [5] Demisie W, Liu Z Y, Zhang M K. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. Catena, 2014, 121: 214-221.
- [6] 陈温福, 张伟明, 孟军, 徐正进. 生物炭应用技术研究. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- [7] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 张雯, 高海英. 生物炭对不同土壤化学性质, 小麦和糜子产量的影响. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [8] 徐尚起, 崔思远, 陈阜, 肖小平, 张海林. 耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 127-132.
- [9] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 胡锋. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响. 土壤, 2012, 44(4): 570-575.
- [10] 舒馨, 朱安宁, 张佳宝, 陈文超, 杨文亮. 保护性耕作对潮土不同组分有机碳、氮的影响. 土壤通报, 2014, 45(2): 432-438.
- [11] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1301-1310.
- [12] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [15] Franchini J C, Crispino C C, Souza R A, Torres E, Hungria M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 18-29.
- [16] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1411-1418.
- [17] 王芳, 张金水, 高鹏程, 同延安. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 702-709.
- [18] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(11): 1459-1468.
- [19] 廖利平, 汪思龙, 高洪, 于小军, 黄志群. 杉木与亚热带主要阔叶造林树种叶凋落物的分解. 应用生态学报, 2000, 11(增刊): 141-145.
- [20] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota-A review. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [21] Peng X, Ye L L, Wang C H, Zhou H, Sun B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. Soil and Tillage Research, 2011, 112(2): 159-166.
- [22] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [23] Khare P, Goyal D K. Effect of high and low rank char on soil quality and carbon sequestration. Ecological Engineering, 2013, 52: 161-166.
- [24] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 刘世杰, 周鑫, 张聪, 武华. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系. 土壤学报, 2012, 49(4): 796-802.
- [25] Kim K H, Kim J Y, Cho T S, Choi J W. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). Bioresource Technology, 2012, 118: 158-162.
- [26] Ahmad M, Lee S S, Dou X M, Mohan D, Sung J K, Yang J E, Ok Y S. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-

- derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 536-544.
- [27] 马少杰, 李正才, 王斌, 刘荣杰, 格日乐图, 王刚. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异. *生态学报*, 2012, 32(8): 2603-2611.
- [28] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响. *生态学报*, 2012, 32(14): 4379-4387.
- [29] 刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [30] 管天玉. 秸秆还田方式对土壤有机碳组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [31] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [32] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7-8): 669-678.
- [33] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 220-228.
- [34] Llorente M, Glaser B, Turrión M B. Storage of organic carbon and Black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses. *Geoderma*, 2010, 159(1/2): 31-38.
- [35] Purevsuren B, Avid B, Tesche B, Davaajav Y. A biochar from casein and its properties. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(11): 2347-2351.
- [36] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, Sachdeva V, Deng H Y. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 46-59.
- [37] Domene X, Hanley K, Enders A, Lehmann J. Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 10-17.
- [38] 吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 李小刚. 秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响. *生态学报*, 2012, 32(9): 2855-2862.
- [39] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 万水霞, 王允青, 许征宇, 张晓玲. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响. *生态学报*, 2013, 33(2): 565-575.
- [40] 何莉莉, 杨慧敏, 钟哲科, 公丕涛, 刘玉学, 吕豪豪, 杨生茂. 生物炭对农田土壤细菌群落多样性影响的 PCR-DGGE 分析. *生态学报*, 2014, 34(15): 4288-4294.
- [41] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(6): 426-432.
- [42] Knicker H, González-Vila F J, González-Vázquez R. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soils of Southern Spain. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 31-39.
- [43] Zimmermann M, Bird M I, Wurster C, Saiz G, Goodrick I, Barta J, Capek P, Santruckova H, Smernik R. Rapid degradation of pyrogenic carbon. *Global Change Biology*, 2012, 18(11): 3306-3316.
- [44] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10): 2127-2134.
- [45] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究. *生态环境学报*, 2013, 21(11): 1795-1799.