

DOI: 10.5846/stxb201410232083

赵军, 耿增超, 尚杰, 耿荣, 王月玲, 王森, 赵宏飞. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响. 生态学报, 2016, 36(8): - .  
Zhao J, Geng Z C, Shang J, Geng R, Wang Y L, Wang S, Zhao H F. Effects of Biochar and Biochar-based Ammonium Nitrate Fertilizers on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Enzyme Activities. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

# 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响

赵 军, 耿增超\*, 尚 杰, 耿 荣, 王月玲, 王 森, 赵宏飞

西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100

**摘要:**以小麦-玉米轮作交替种植下的田间试验为平台, 探讨施用生物炭及三种炭基硝酸铵氮肥对土壤主要化学肥力因子、土壤微生物量碳、氮和酶活性的影响。田间试验共设 6 个处理, 依次为: 对照(施磷、钾肥, CK); 生物炭(BC); 硝酸铵氮肥(AN); 掺混型生物炭基氮肥(CH); 固-液吸附型生物炭基氮肥(XF); 化学反应型生物炭基氮肥(FY)。结果表明, 生物炭及三种生物炭基氮肥均显著提高土壤有机碳含量, 并有效降低了有效磷和速效钾的含量。与 CK 处理相比较, CH、BC 处理的土壤微生物量碳含量分别增加了 22.10%、17.45%, 而 AN、XF、FY 3 个处理则分别减少了 9.09%、10.86%、1.46%; 不同施肥处理土壤微生物量氮较 CK 均有增加, 且 BC、XF 处理差异达显著水平, BC 处理的增幅最大, 达 66.53%, XF 处理的增幅次之, 达到了 62.78%, AN 处理的增幅最小, 为 24.86%。与 CK 处理比较而言, FY、XF、CH 均增加土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性, 且增加效应均依次减弱, FY、XF 处理均增加碱性磷酸酶活性, 而 CH 处理降低了碱性磷酸酶活性。FY、XF、CH 较 CK 处理均可显著增加小麦产量, 增产率分别为 36.61%、22.58%、20.72%, 且增产效果依次减弱。

**关键词:**生物炭; 生物炭基氮肥; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮; 酶活性

## Effects of Biochar and Biochar-based Ammonium Nitrate Fertilizers on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Enzyme Activities

ZHAO Jun, GENG Zengchao\*, SHANG Jie, GENG Rong, WANG Yueying, WANG Sen, ZHAO Hongfei

College of Resources and Environment, Northwest A&F University / Key Laboratory for Plant Nutrient and Agricultural Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

**Abstract:** An experiment with a winter wheat-summer maize rotation system was carried out to explore the effects of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical fertility, soil microbial biomass carbon and nitrogen, and enzyme activity of soil invertase, urease, catalase, and alkaline phosphatase. Six treatments were used in this study: control (CK), biochar (BC), ammonium nitrate control (AN), simple mixed type of biochar-based nitrogen (CH), solid-liquid adsorption type biochar-based nitrogen (XF), and chemical reaction type biochar-based nitrogen (FY). The results showed that the content of soil organic carbon significantly increased and the values of available phosphorus and available potassium decreased in biochar and biochar-based nitrogen treatments, CH, XF, FY. Compared to the CK, microbial biomass carbon content increased by 22.10% and 17.45% in CH and BC treatments, respectively, but decreased by 9.09%, 10.86%, 1.46% in AN, XF and FY treatments, respectively. Microbial biomass nitrogen content was positively

**基金项目:**农业部“948”项目“生物炭技术引进及消化”(2010-Z19); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM5004); 国家级大学生创新创业训练计划项目“生物炭基氮肥的氮素利用率及对微生物活性影响研究”; 西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目“生物炭对壤土物理性质和生物活性的影响”

收稿日期: 2014-10-23; 网络出版日期: 2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gengzengchao@126.com

affected by all fertilization treatments. In BC and XF treatments, microbial biomass nitrogen significantly ( $P < 0.05$ ) increased by 66.53% and 62.78%, respectively, compared to that in the CK. The increase in the nitrogen content was the lowest in AN treatment and only reached 24.86%, compared to that in the CK. In biochar-based nitrogen treatments, FY, XF, and CH, the enzyme activity of soil invertase, urease and catalase was increased. The effect of FY treatment was the strongest, followed by XF treatment, while the effect of CH treatment was the weakest. Both FY and XF treatments increased the enzyme activity of alkaline phosphatase activity, but its activity decreased in the CH treatment, compared to the CK. Wheat yield in biochar-based nitrogen treatments, FY, XF, CH, significantly increased by 36.61%, 22.58% and 20.72%, respectively, compared to that in the CK. Thus, the biochar-based ammonium nitrate fertilizers, which prepared with biochar and chemical fertilizer can get a good application prospect in agricultural sector.

**Key Words:** Biochar; Biochar-based ammonium nitrate fertilizers; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; enzyme activity

土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动力,它在土壤中起着极其重要的作用,参与许多重要的过程,如参与土壤有机质的分解和腐殖质的形成、促进土壤养分的转化和循环等过程<sup>[1]</sup>。土壤微生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)在土壤全碳中所占比例很小,其含量变化较大,我国土壤微生物量碳的变幅为42.0—2064.0 kg/hm<sup>2</sup>,仅占土壤总碳量的2%—4%<sup>[2]</sup>,但它是土壤有机碳中最活跃的部分;土壤微生物量氮(Microbial Biomass Nitrogen, MBN)一般只占土壤全氮含量的1.0%—5.0%<sup>[2]</sup>。土壤微生物量碳、氮可以综合反映土壤的肥力和生物活性。

土壤酶是土壤中动植物残体分解、植物根系分泌和土壤微生物代谢等的产物,是一类具有生物化学催化活性的特殊物质,它既是土壤有机物转化的执行者,又是植物营养元素的活性库<sup>[3]</sup>,其活性的高低代表了土壤中物质代谢的旺盛程度,是衡量土壤理化性质、微生物学特征、养分含量水平和吸收利用以及土壤污染状况等的重要灵敏指标<sup>[4-10]</sup>。大量研究表明,土壤微生物和土壤酶活性极易受到施肥制度、作物根系分泌物、耕作措施等土壤环境因子和土地利用方式的影响<sup>[11-16]</sup>。

生物质炭是生物有机材料(或生物质)在缺氧或低氧环境中经热裂解后产生的固体产物,多为粉状颗粒<sup>[17-18]</sup>。生物质炭拥有较大的孔隙度和比表面积<sup>[19]</sup>,通气、透水性特别好,有利于保水保肥,还含有多种矿质元素,可以提供作物所需的营养元素,提高土壤肥力,同时可以改善微生物的生存环境,为多种重要微生物的生长和繁殖提供了有利的条件<sup>[20]</sup>。近年来,将生物质炭农用作为肥料的缓释载体备受关注,应用前景非常广阔。因此,将生物质炭与硝酸铵复合制备成生物炭基氮肥是一个新的发展方向,本研究在实验室采用小试工艺制备了三种生物炭基氮肥,通过田间试验分析其对土壤微生物量碳、氮和酶活性的影响,以为不同生物炭基氮肥的生产及应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况及试验设计

#### 1.1.1 试验区概况

本试验地设在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学试验田,该地区年均日照时数2150 h,年平均气温12—14℃,年平均降雨量为621 mm,雨量主要集中在7—9月份,春季降水偏少,属于暖温带半湿润性气候,无霜期为200—220 d。试验开始时土壤的基本性质为有机质14.69 g/kg, pH值为7.53,全氮0.83 g/kg,全磷1.01 g/kg,全钾21.23 g/kg,有效磷24.50 mg/kg,速效钾211.03 mg/kg。

#### 1.1.2 试验材料

供试生物炭:供试生物炭材料来自于陕西省亿鑫生物能源科技开发有限公司,由废弃的果树枝条、树干在裂解炉、限氧环境下(450℃)热裂解制成,其pH值为9.99,比重为1.11 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为86.70 m<sup>2</sup>/g,灰分含

量为 13.98%, 含氮量为 1.19%, 含碳量为 72.38%。

供试肥料:(1)分析纯硝酸铵试剂(简称 AN), 含氮量为 35%。(2)掺混型生物炭基氮肥:将 65 份上述过 1mm 筛的生物炭与 35 份分析纯的硝酸铵置于搅拌器中充分搅拌混匀, 即得含氮量为 12%的目标生物炭基氮肥。(3)固-液吸附型生物炭基氮肥:将 35 份分析纯硝酸铵充分溶解于 100 份蒸馏水中, 再倾入 65 份过 1 mm 筛的供试生物炭, 边加边搅拌 30 min, 搅拌完成后平衡 24 h, 然后将已吸附好硝酸铵的生物炭自然风干或置于烘箱(60 ℃)内烘干, 即得含氮量为 12%的目标生物炭基氮肥。(4)化学反应型生物炭基硝酸铵氮肥:向反应釜中加入 9.5 份 30%的硝酸溶液, 随后加入 6.5 份生物炭, 边加边搅拌 15 min; 再向上述反应釜中加入 7 份 15%的氨水溶液, 继续搅拌 30 min; 搅拌完成后平衡 24h 后调节收集产物的 pH 值为中性, 将反应产物自然风干或置于烘箱(60 ℃)内烘干, 即得含氮量为 12%的目标生物炭基氮肥。

### 1.1.3 试验设计

试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月进行, 共设置 6 个处理, 分别为:(1)对照(施磷、钾肥, CK);(2)BC(施磷、钾肥和生物炭);(3)AN(施磷、钾肥和硝酸铵);(4)CH(施磷、钾肥和掺混型生物炭基氮肥);(5)XF(施磷、钾肥和固-液吸附型生物炭基氮肥);(6)FY(施磷、钾肥和反应型生物炭基氮肥), 每个处理四次重复, 试验小区面积为 1.2×3.5 m<sup>2</sup>, 采用一年两熟轮作方式(小麦-玉米)。所有处理均施用磷、钾肥(磷酸二氢钙, 含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 56%; 硫酸钾, 含 K<sub>2</sub>O 54%), 且施用量相同, 生物炭用量为 1232 kg/hm<sup>2</sup>, 3 种炭基氮肥的施用量相同, 所有肥料均作为基肥一次性施入, 氮、磷、钾肥料施用量折合成纯养分 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为 225-150-180 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.2 土样采集与测定方法

### 1.2.1 供试土壤

于冬小麦成熟收获后(2014 年 6 月 8 日)采集 0—20 cm 土层土样, 每个小区采用土钻 5 点取样混合作为一个样品。样品采集后带回实验室捡去植物残体及小麦根系等杂物, 过 2 mm 筛, 一部分新鲜土样保存于 4℃ 冰箱中用于土壤微生物量碳、氮的测定, 其余土壤自然风干后磨细、过筛、混匀、装瓶备用。

### 1.2.2 样品测定方法

土壤基本化学性质的测定: 土壤基本化学性质的测定参照土壤农化分析的常规方法<sup>[21]</sup>, 有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化外加加热法(180℃油浴); 全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定; 土壤速效磷(AP)含量采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾(AK)含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定。

土壤微生物量碳、氮的测定: 参照 Vance 等的方法<sup>[22]</sup>, 采用氯仿熏蒸浸提法, 其含量计算用熏蒸和未熏蒸土样之差除以系数 K<sub>c</sub>=0.38 和 K<sub>N</sub>=0.54。

土壤酶活性的测定: 参照关松荫<sup>[6]</sup>的方法。土壤蔗糖酶活性用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 以每克土 24 h 产生的葡萄糖(Glucose)毫克数表示; 脲酶活性用靛酚蓝比色法测定, 以每克土 24 h 产生的 NH<sub>3</sub>-N 的质量(mg)表示; 碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定, 以每克土 24 h 产生的酚(PhOH)毫克数表示; 过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定, 以每克土消耗 0.02 mol/L KMnO<sub>4</sub>溶液毫升数表示。

## 1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 和 DPS v7.05 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 多重比较采用最小显著差异法(LSD), 显著性水平设定为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分

由表 1 可见, 施用生物炭及生物炭基氮肥显著影响土壤有机碳的含量。其中, BC 处理的有机碳含量最高, FY 处理有机碳含量次之, 且 BC 和 FY 处理的有机碳含量显著高于其他施肥处理, AN、CH、XF 处理的有机碳含量相似, 但均与 CK 处理差异显著; AN 处理全氮含量最高, 但仅与 CK 处理差异达显著水平, 与其他处理差异均不显著; CK、BC、FY 处理有效磷含量均显著高于 AN、XF 处理; 各处理速效钾含量差异均不显著; CK 处

理碳氮比除与 BC 处理差异不显著,与其他处理均具显著性差异,其他各处理碳氮比差异均不显著。

表 1 不同处理土壤养分含量的差异

Table 1 Effect of different treatments on soil nutrient contents

处理 Treatment	有机碳 SOC/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	有效磷 AP/ (mg/kg)	速效钾 AK/ (mg/kg)	有机碳/全氮 SOC/TN
CK	8.33 d	0.60 b	35.83 a	123.71 a	15.52 a
BC	9.19 a	0.69 ab	35.97 a	115.12 a	14.19 ab
AN	8.70 c	0.86 a	24.78 b	109.97 a	10.31 b
CH	8.68 c	0.78 ab	28.76 ab	120.96 a	11.14 b
XF	8.55 c	0.77 ab	25.52 b	116.84 a	11.10 b
FY	8.88 b	0.79 ab	34.35 a	110.31 a	11.29 b

CK:对照(不施氮肥);BC:生物炭 Biochar;AN:硝酸铵 Ammonium nitrate;CH:掺混型生物炭基氮肥 Simple mixed type of biochar-based nitrogen;XF:固-液吸附型生物炭基氮肥 Solid-liquid adsorption type biochar-based nitrogen;FY:反应型生物炭基氮肥 Chemical reaction type biochar-based nitrogen,下同;SOC:有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;AP:有效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium,同列数字后面的不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level.

## 2.2 土壤微生物量碳、氮

### 2.2.1 土壤微生物量碳

由图 1 可见,不同施肥处理微生物量碳含量大小顺序为 CH>BC>CK>FY>AN>XF。与 CK 处理比较而言,CH、BC 处理分别增加 22.10%、17.45%,而 FY、AN、XF 处理分别减少 10.86%、9.09%、1.46%,产生这一差异的主要原因可能是投入的不同肥料的养分组成差异较大。CH 处理除与 BC 处理差异不显著外,与其他处理均具显著性差异,其他处理间差异均不显著。从图 2 可知,不同施肥处理土壤微生物量碳占土壤有机碳的比例(MBC/SOC)的变化范围为 1.75%—2.40%,其中 CH 的 MBC/SOC 显著高于其他处理,BC 的 MBC/SOC 与 AN、XF、FY 处理差异显著,XF、FY、CK、AN 4 个处理的 MBC/SOC 差异均不显著。

### 2.2.2 土壤微生物量氮

土壤微生物量氮含量可以综合反映土壤微生物对氮素的矿化和固持作用<sup>[23]</sup>,土壤中大部分的矿化氮来自于微生物量氮,故微生物量氮是植物吸收利用氮素的主要来源。由图 3 可知,各施肥处理微生物量氮含量较 CK 处理均有不同程度的提高,其中 BC 处理的增幅最大,为 66.53%,XF 处理的增幅次之,达到了 62.78%,AN 处理的增幅最小,为 24.86%。BC 处理 MBN 除与 XF、FY 处理差异不显著,与其他处理均具显著性差异。由图 4 可知,各施肥处理微生物量氮占土壤全氮比例(MBN/TN)的变化范围为 1.00%—1.93%。其中 BC 处理的 MBN/TN 比例最大,达到了 1.93%,显著高于 AN、CH、FY 3 个处理。各施肥处理间土壤 MBC/MBN 比率差异见图 5,CK 处理的 MBC/MBN 最大,除与 CH 处理差异不显著外,与其他处理均具有显著性差异,XF 处理的 MBC/MBN 最小。CH 处理的 MBC/MBN 与 BC、XF、FY 处理均具显著性差异,而 BC、AN、XF、FY 处理的 MBC/MBN 差异不显著。

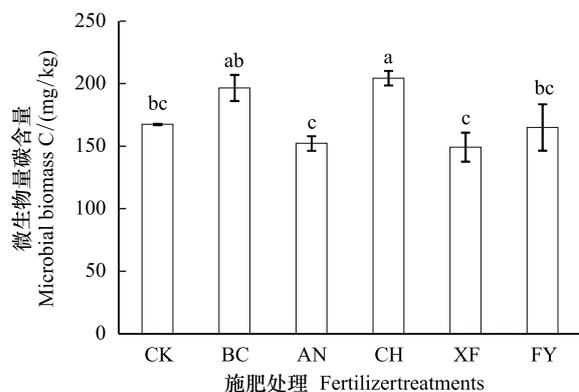


图 1 不同施肥处理微生物量碳含量

Fig. 1 Content of microbial biomass C of different fertilization treatments

CK:对照(不施氮肥);BC:生物炭 Biochar;AN:硝酸铵 Ammonium nitrate;CH:掺混型生物炭基氮肥 Simple mixed type of biochar-based nitrogen;XF:固-液吸附型生物炭基氮肥 Solid-liquid adsorption type biochar-based nitrogen;FY:反应型生物炭基氮肥 Chemical reaction type biochar-based nitrogen,下同;不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

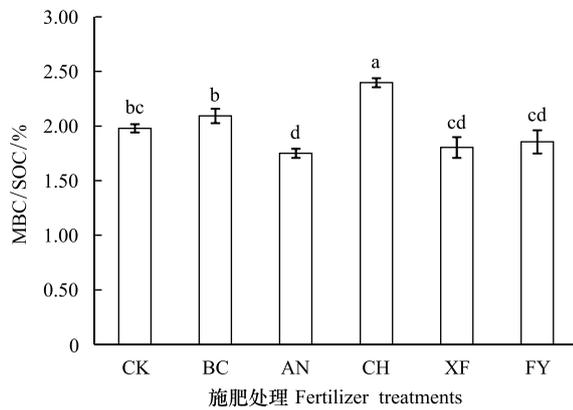


图 2 不同施肥处理 MBC/SOC 值

Fig. 2 MBC/SOC of different fertilization treatments

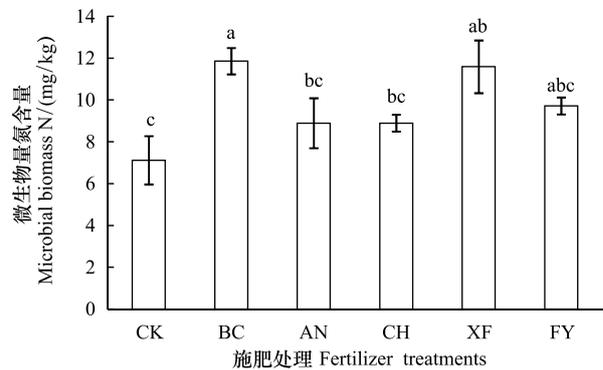


图 3 不同施肥处理微生物量氮含量

Fig. 3 Content of microbial biomass N of different fertilization treatments

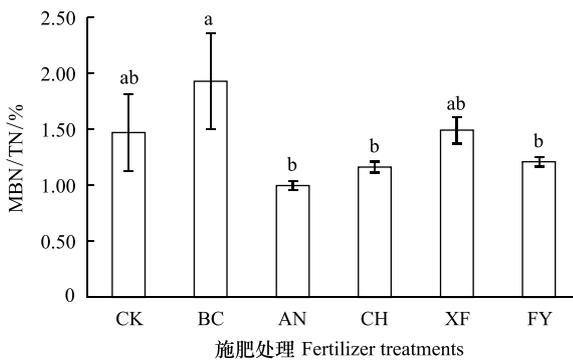


图 4 不同施肥处理 MBN/TN 值

Fig. 4 MBN/TN of different fertilization treatments

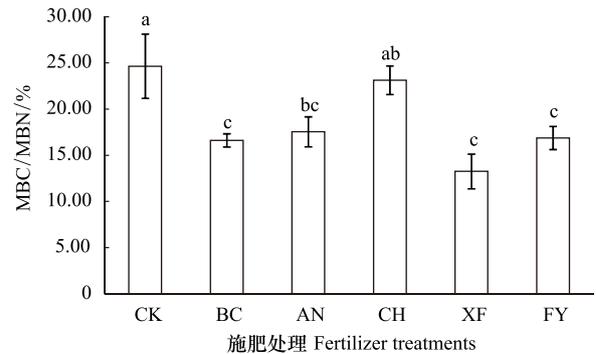


图 5 不同施肥处理 MBC/MBN 值

Fig. 5 Value of MBC/MBN of different fertilization treatments

### 2.3 土壤酶活性

由图 6 可知,3 种炭基氮肥 FY、XF、CH 处理蔗糖酶活性均显著高于 AN 处理的蔗糖酶活性, FY 处理的蔗糖酶活性显著高于 BC、AN 处理,而其他处理间差异均不显著。各处理间蔗糖酶活性的总体趋势表现为 FY>XF>CH>CK>BC>AN。FY、XF 和 CH 处理脲酶活性显著高于其他处理, BC 处理脲酶活性显著高于 AN 和 CK 处理。各处理间脲酶活性的大小顺序依次为 FY>XF>CH>BC>CK>AN。不同施肥处理对土壤碱性磷酸酶活性的影响不大, FY 处理碱性磷酸酶活性与其他处理均达到显著性差异,各处理的影响效应依次为 FY>XF>CK>AN>CH>BC。BC 处理的碱性磷酸酶活性最低,产生上述效应的原因可能是由于生物炭具有极强的保水性, BC 的施入相比其他处理增加了耕层土壤含水量,导致土壤湿度过大、透气性差,进而造成土壤碱性磷酸酶活性较低。FY 处理过氧化氢酶活性显著高于其他处理,除 XF 处理外, AN 处理与其他处理均达到显著性差异,各处理过氧化氢酶活性的影响效应依次为 FY>AN>XF>BC>CH>CK。

### 2.4 作物产量

由图 7 可知, AN 和 3 种生物炭基氮肥处理小麦产量均显著高于 CK、BC 处理,其中 FY、XF、CH、AN、BC 5 个处理小麦产量较 CK 的增产率分别为 36.61%、22.58%、20.72%、10.49%、6.03%, FY、XF、CH 3 个处理较 BC 的增产范围为 660.71—1375.16 kg/hm<sup>2</sup>,这主要是因为虽然生物炭可以改良土壤,但因其自身含有较少的矿物质元素,故其增产效果不明显,而将生物炭与硝酸铵制备成炭基氮肥恰好弥补了这一缺陷,表现出了更好的增产效果;3 种炭基氮肥处理的小麦产量均显著高于 AN 处理,增产率分别为 FY 23.64%, XF 10.94%, CH

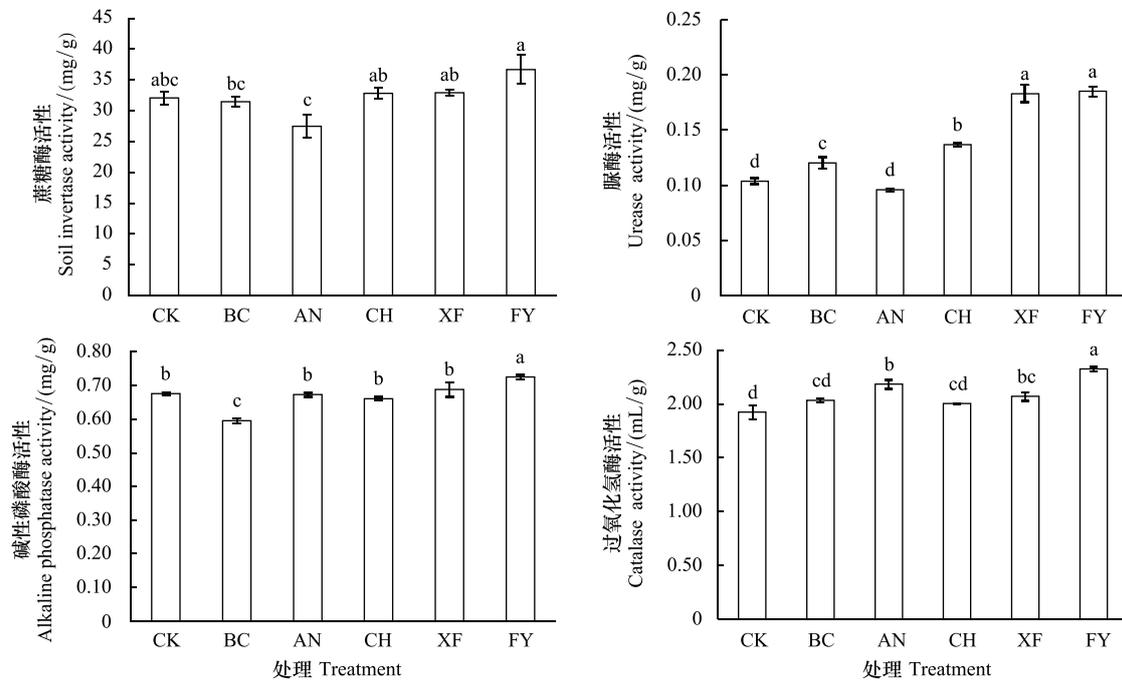


图6 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

Fig. 6 Enzymatic activities of soils under different fertilization treatments

9.26%,这主要是因为生物炭基氮肥可以延缓吸附在生物炭孔隙中的养分释放,延长养分有效期,甚至可能与作物对养分的吸收基本同步;FY处理小麦产量显著高于XF、CH处理。

### 3 讨论

土壤微生物是土壤养分循环的主要推动力,调控着土壤有机化合物的转化和利用以及养分的吸持和释放,且土壤中的一系列过程均以碳、氮循环为中心,宋秋华等<sup>[24]</sup>和李东坡等<sup>[25]</sup>人研究发现微生物量碳对不同培肥措施非常敏感。李芳芳等<sup>[26]</sup>研究表明,黑碳的添加在一定程度上缓解了土壤MBC和MBN含量的减少,并随黑碳添加量的增加二者的含量呈增加趋势。Wardle等<sup>[27]</sup>对瑞典北部的森林土壤研究发现,添加黑碳后土壤腐殖质的损失量增加,认为黑碳能够促进微生物的生长。但也有研究表明<sup>[28]</sup>黑碳的添加减少了土壤MBC和MBN的含量,并认为产生这一现象的原因可能是黑碳对某些有机碳、氮化合物的吸附作用所导致。产生上述差异可能与供试土壤质地、原有微生物生物量和养分以及黑碳的种类等因素密切相关。本研究结果显示,生物炭和生物炭基氮肥的施用不仅可以增加微生物生物量,而且还可以增强土壤酶活性,这一方面是因为生物炭拥有的多孔结构为微生物提供了良好的生存条件,另一方面可能是因为生物炭自身富含碳可以为微生物提供充足的碳源,同时生物炭基氮肥所吸附的硝酸铵也可以适当地补充氮源,施肥可以直接增加根系生物量及根系分泌物,从而促进微生物的生长<sup>[29]</sup>。本研究结果表明,不同施肥处理对土壤微生物量碳含量均有不同的影响效应,其中AN处理的微生物量碳含量显著低于CH和BC处理,而与XF、FY处理相近,这可能是由于生物炭具有极大的孔隙度、巨大的表面积和极强的吸附性能,可以储存水分和养分,为微生物提供了很好的栖息场所,而XF、FY 2种生物炭基氮肥对硝酸铵的吸附较CH强,致使生物炭的孔隙大多被所吸附的硝酸铵占

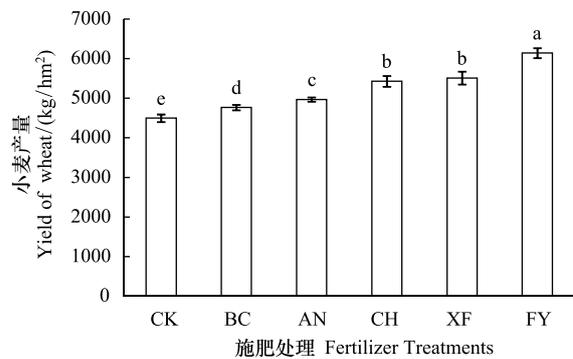


图7 不同施肥处理对小麦产量的影响

Fig. 7 Yield of different fertilizer treatments

据,从而影响了微生物的栖息生活空间,进而阻碍了微生物的生长,其具体作用机理还有待进一步的研究。本研究中 MBC/SOC 的变异范围为 1.75%—2.40%,这与金发会等<sup>[30]</sup>人对黄土高原石灰性土壤的研究结果相近。

本研究结果显示,各施肥处理对土壤微生物量氮含量和微生物量碳含量的影响效应不同,各施肥处理微生物量氮含量较 CK 处理均有不同程度的提高,其中 BC 处理的增幅最大,AN 处理最小。究其原因可能是由于生物炭具有多孔性和极强的吸附特性,一方面生物炭吸附了一部分有机物质<sup>[28]</sup>,另一方面可能是有些微生物附着在生物炭的孔隙中<sup>[31]</sup>,随着时间的延长,部分微生物代谢死亡的产物可作为剩余微生物的有效养分,从而使微生物数量增加,另外还可能是由于生物炭的添加在一定程度上刺激了部分微生物的活性<sup>[28]</sup>,从而使微生物的活动和生长繁殖均相对旺盛。各施肥处理 MBN/TN 的变化范围为 1.00%—1.93%,这与周建斌等<sup>[32]</sup>和汪文霞等<sup>[33]</sup>人在 3 类土壤(红油土、黑垆土、淋溶褐土)的研究结果近似,但远低于 Anderson 等<sup>[34]</sup>和 Azam 等<sup>[35]</sup>人的研究结果,这可能与供试土壤类型、肥力特性和种植的作物种类不同有关。

土壤微生物主要参与土壤当中的物质循环和能量转化过程,而土壤酶主要参与土壤中许多重要的生物化学过程,二者共同完成土壤中的代谢过程。土壤转化酶又名蔗糖酶,是一种能够催化蔗糖水解为葡萄糖的酶,可以加速土壤碳素循环,脲酶与土壤中 N 的转化密切相关,碱性磷酸酶与 P 转化密切相关,可以促进有机磷化合物的分解,过氧化氢酶能酶促过氧化氢分解为水和氧,有利于解除过氧化氢的毒害作用<sup>[6]</sup>。本实验结果表明,各施肥处理对土壤酶活性的影响具有显著性差异。各处理对蔗糖酶、脲酶活性的影响效应均为三种炭基氮肥酶活性最强,且 FY>XF>CH,碱性磷酸酶和过氧化氢酶仅 FY 的影响效应最强,而 XF 和 CH 的作用比较复杂,施用生物炭及炭基氮肥对土壤酶活性产生的这种复杂多变的效应,主要可能是因为一方面生物炭具有极强的吸附性能,可以吸附酶促反应的反应底物,进而促进酶促反应而提高土壤酶活性,另一方面生物炭还可以吸附保护酶促反应的结合位点,从而抑制了酶促反应的进行<sup>[36]</sup>。

#### 4 结论

(1)生物炭和掺混型生物炭基氮肥显著增加土壤微生物量碳含量,且后者的增加效果优于前者,而化学反应型和固-液吸附型的生物炭基氮肥降低土壤微生物量碳含量,但作用不显著。生物炭和 3 种生物炭基氮肥均显著增加土壤微生物量氮的含量,且生物炭的增加效果最强。

(2)生物炭和 3 种生物炭基氮肥均可以增加土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶的活性,但对碱性磷酸酶仅化学反应型和固-液吸附型的生物炭基氮肥可以增加其活性。但总体来看,三种生物炭基氮肥对 4 种土壤酶活性的影响效应均为 FY 最强,XF 次之,CH 最弱。

(3)3 种生物炭基硝酸铵氮肥 CH、XF、FY 均能显著增加小麦产量,且增产效果依次增强。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨劲峰,韩晓日,阴红彬,战秀梅,刘小虎.不同施肥条件对玉米生长季耕层土壤微生物量碳的影响.中国农学通报,2006,22(1):173-175.
- [2] 赵先丽,程海涛,吕国红,贾庆宇.土壤微生物生物量研究进展.气象与环境学报,2006,22(4):68-72.
- [3] Srivastava S C, Singh J S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land-uses and nutrient flux. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(2): 117-124.
- [4] Weir T L, Park S W, Vivanco J M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. Current Opinion in Plant Biology, 2004, 7(4): 472-479.
- [5] 胡开辉,罗庆国,汪世华,林旋,林文雄.化感水稻根际微生物类群及酶活性变化.应用生态学报,2006,17(6):1060-1064.
- [6] 关松荫.土壤酶及其研究法.北京:农业出版社,1986:3-25,271-319.
- [7] 张旭辉,潘根兴,李恋卿,郭巧生,张绍君.连续多年栽培叶用银杏下土壤养分及酶活性变化.土壤通报,2004,35(1):21-25.
- [8] Badiane N N Y., Chotte J L, Pate E, Masse D, Rouland C. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semiarid tropical regions. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 229-238.

- [ 9 ] Andreoni V., Cavalcal, Rao M-A, Nocerino G, Bernasconi S, Dell'Amico E, Colombo M, Gianfreda L. Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere*, 2004, 57(5) : 401-412.
- [ 10 ] 薛冬, 姚槐应, 黄昌勇. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(2) : 84-87.
- [ 11 ] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 关春林, 郜春花, 石彦琴. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4) : 700-705.
- [ 12 ] Böhme L, Langer U, Böhme F. Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1/2) : 141-152.
- [ 13 ] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1) : 9-13.
- [ 14 ] Yusuf A A, Abaidoo R C, Iwuafor E N O, Olufajo O O, Sangina N. Rotation effects of grain legumes and fallow on maize yield, microbial biomass and chemical properties of an Alfisol in the Nigerian savanna. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1/3) : 325-331.
- [ 15 ] Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, So H B, Li X Y. Effects of no-tillage management on soil biochemical characteristics in northern China[J]. *Agric. Sci. Camb.*, 2010, 148:217-223.
- [ 16 ] Wang X L, Jia Y, Li X G, Long R J, Ma Q F, Li F M, Song Y J. Effects of land use on soil total and light fraction organic, and microbial biomass C and N in a semi-arid ecosystem of northwest China. *Geoderma*, 2009, 153(1/2) : 285-290.
- [ 17 ] Tenenbaum D J. 黑色的希望: 生物炭. 资源与人居环境, 2010, (7) : 55-57.
- [ 18 ] 刘玉学, 刘薇, 吴伟祥, 钟哲科, 陈英旭. 土壤生物质炭环境行为与环境效应. *应用生态学报*, 2009, 20(4) : 977-982.
- [ 19 ] Cornelissen G, Kukulka Z, Kalaitzidis S, Christanis K, Gustafsson Ö. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13) : 3632-3640.
- [ 20 ] 张忠河, 林振衡, 付娅琦, 付娅琦, 王宏海, 康全德, 尤希凤. 生物炭在农业上的应用. *安徽农业科学*, 2010, 38(22) : 11880-11882.
- [ 21 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [ 22 ] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6) : 703-707.
- [ 23 ] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 王雪. 施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4) : 466-472.
- [ 24 ] 宋秋华, 李凤民, 刘洪升, 王俊, 李世清. 黄土区地膜覆盖对麦田土壤微生物体碳的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(9) : 1512-1516.
- [ 25 ] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 朱平, 任军, 彭畅, 梁成华. 长期培肥黑土微生物量碳动态变化及影响因素. *应用生态学报*, 2004, 15(8) : 1334-1338.
- [ 26 ] 李芳芳, 高人, 尹云锋, 杨玉盛, 马红亮, 李淑香. 黑碳添加对杉木人工林土壤微生物量碳氮的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(4) : 49-54.
- [ 27 ] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science*, 2008, 320(5876) : 629-629.
- [ 28 ] Durenkamp M, Luo Y, Brookes P. C. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(11) : 2026-2029.
- [ 29 ] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 李花, 张树兰, 孙本华, 杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(17) : 5502-5511.
- [ 30 ] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 黄土高原不同土壤微生物量碳、氮与氮素矿化势的差异. *生态学报*, 2008, 28(1) : 227-236.
- [ 31 ] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, Thies J E, O'Neill B, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Grossman J, Neves E G, Luizão F. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 2009, 41(2) : 206-213.
- [ 32 ] Zhou J B, Li S X. Relationship between soil microbial biomass C and N and mineralizable nitrogen in some arable soils on Loess Plateau. *Pedosphere*, 1998, 8(4) : 349-354.
- [ 33 ] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 马勤安. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系. *水土保持学报*, 2006, 20(6) : 103-106, 132-132.
- [ 34 ] Anderson J P E, Domash K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, 1980, 130(4) : 211-216.
- [ 35 ] Azam F, Yousaf M, Hussain F, Malik K A. Determination of biomass N in some agricultural soils of Punjab, Pakistan. *Plant and Soil*, 1989, 113(2) : 223-228.
- [ 36 ] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3), doi: 10.1029/2006GB002798.