

生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响

陶朋闯^{1,2}, 陈效民¹, 靳泽文¹, 李秋霞¹, 黄欠如³, 张佳宝²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 江西红壤研究所, 江西 进贤 331717)

摘要: 以江西典型旱地红壤为研究对象, 设置生物质炭和氮肥 2 个因素(生物质炭 4 个水平分别为 0 t/hm², 5 t/hm², 20 t/hm², 40 t/hm²; 氮肥 4 个水平分别为 0 kg/hm², 60 kg/hm², 90 kg/hm², 120 kg/hm²), 研究了生物质炭施入大田 3 a 后对旱地红壤微生物量碳、氮及碳氮比的影响。结果表明: 与对照相比, 生物质炭与氮肥配施有效地提高了土壤微生物量碳, 提高幅度为 18.22%~122.74%, 对土壤微生物量氮的提高效果更为明显, 提高幅度为 20.86%~312.91%。生物质炭与氮肥配施后土壤微生物碳氮比有不同程度的降低, 降低幅度为 18.11%~51.56%, 其中以 20 t/hm² 生物质炭与 60 kg/hm² 氮肥以及 40 t/hm² 生物质炭与 120 kg/hm² 氮肥的比例施用后对微生物碳氮比的降低效果最为明显。因此, 通过生物质炭与氮肥配施可以提高旱地红壤中微生物量碳、氮及土壤氮素生物活性。

关键词: 生物质炭; 氮肥; 旱地红壤; 土壤微生物量碳、氮; 碳氮比

中图分类号: S156.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)01-0231-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.01.042

Effects of Biochar Combined with Nitrogen Fertilizers on Microbial Biomass C, N and Carbon-to-nitrogen Ratio of Upland Red Soil

TAO Pengchuang^{1,2}, CHEN Xiaomin¹, JIN Zewen¹, LI Qiuxia¹, HUANG Qianru³, ZHANG Jiabao²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 3. Red Soil Institute, Jinxian, Jiangxi 331717)

Abstract: This study was carried out to investigate the effects of biochar and nitrogen fertilizer on microbial biomass C, microbial biomass N and carbon-to-nitrogen ratio in typical upland red soil in Jiangxi province. The field experiment was conducted with a 4×4 factorial design at biochar application rates of 0 t/hm², 5 t/hm², 20 t/hm² and 40 t/hm², and nitrogen fertilizer application rates of 0 kg/hm², 60 kg/hm², 90 kg/hm² and 120 kg/hm². The microbial biomass C, microbial biomass N and carbon-to-nitrogen ratio under different treatments were determined after 3 years. The results indicated that biochar combined with nitrogen fertilizers could increase soil microbial biomass C and soil microbial biomass N by 18.22%~122.74% and 20.86%~312.91% respectively. The carbon-to-nitrogen ratio was decreased by 18.11%~51.56% after the application of biochar with nitrogen fertilizers. The carbon-to-nitrogen ratio was reduced obviously by applying 20 t/hm² biochar with 60 kg/hm² nitrogen fertilizer, and by applying 40 t/hm² biochar with 120 kg/hm² nitrogen fertilizer. This study illustrated that the application of biochar combined with nitrogen fertilizers could improve the microbial biomass C, N and biological activity of soil nitrogen.

Key words: biochar; nitrogen fertilizer; upland red soil; soil microbial biomass C and N; carbon-to-nitrogen ratio

生物质炭是由有机物料在厌氧条件下经低温热解产生的含碳丰富的固态物质, 是黑碳的一种存在形式。生物质炭孔隙度高、比表面积巨大、带负电荷多、芳香化程度高、而且具有较高的稳定性和吸附性^[1]。因此, 被视为增加土壤碳截留、改善土壤质量的有效改良材

料^[2-3]。研究发现, 长期施用生物质炭能够降低土壤容重, 提高土壤孔隙度和饱和导水率, 还能提升土壤 pH, 增加土壤有机碳、有效磷和阳离子交换量^[4-6]。生物质炭还具有改善微生物细胞附着性能、促进特定类群土壤微生物栖息生长的作用^[7], 能够改变土壤中养分的

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB100506); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目(0812201208); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者: 陶朋闯(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源利用管理及旱地红壤改良研究。E-mail: 2014103073@njau.edu.cn

通信作者: 陈效民(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源与环境物理过程研究。E-mail: xmchen@njau.edu.cn

生物有效性^[8]。李秋霞等^[4]的研究结果还表明,施用生物质炭能够增加旱地红壤中油菜及红薯的产量。另外,生物质炭还能吸附一些对微生物有抑制作用的化合物,使其减少对微生物在生长和繁殖过程中的毒害,增加土壤中微生物丰度^[9]。由于生物质炭的诸多优点,近年来被作为土壤改良剂已成为全球关注的热点。

土壤生态系统中存在着大量的微生物群落,它们对土壤中物质的转化和能量的流动起着重要的作用。在土壤生态系统中,土壤微生物生物量是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,并参与有机质的分解、腐殖质的形成,调控土壤中能量和养分循环等各个生化过程^[10],是重要的植物养分储备库。张雪艳等^[11]的研究表明,微生物量碳和碳氮比与秋冬茬产量呈显著正相关,与早春茬+秋冬茬产量呈极显著正相关,且土壤微生物生物量氮是重要的土壤活性氮的“库”和“源”^[12],直接调节土壤氮素的供给。

红壤是广泛分布于我国亚热带地区的主要土壤类型。但由于红壤存在着酸、瘦、粘的不良性质和分布区域降水时空分布的不均匀等缺点,以及对红壤不合理的开发利用及施肥,导致红壤地区的生态环境进一步恶化,严重影响了整个地区农业及经济的可持续发展。因此,提高旱地红壤生产能力及可持续发展迫在眉睫。提高红壤微生物量及其活性是改善红壤性质的一种有效途径。近年来,我国学者也对土壤微生物进行了大量研究,但是目前关于生物质炭对旱地红壤微生物学特性影响的研究还鲜见报道。因此,本文以江西省红壤研究所典型旱地红壤为对象,研究生物质炭与氮肥配施对土壤微生物量碳、氮及碳氮比的影响,探讨对土壤微生物生长繁殖最有利的配施比例,为旱地红壤的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在江西省红壤研究所的旱地红壤上进行。其地理位置为 116°20′24″N, 28°15′30″E, 属亚热带湿润气候, 气候温和, 雨量充沛, 日照充足, 无霜期长。年平均气温 17.5℃, 年无霜期 282 d, 年日照时间 1 900~2 000 h, 年降雨量 1 587 mm, 降雨主要集中在 3—6 月, 该时期降雨量占全年的 61%~69%; 7—9 月为旱季, 蒸发量占全年的 40%~50%。该区红壤由第四纪红色粘土发育而来, 供试土壤为 0—15 cm 表层土, 其基本理化性质为: pH 4.54, 全氮含量 0.98 g/kg, 阳离子交换量 15.2 cmol/kg, 有效磷含量 13.26 mg/kg, 有机碳含量 7.98 g/kg, 全磷含量 0.45 g/kg, 总孔隙度 53.6%, 容重 1.23 g/cm³。

试验采用河南商丘三利新能源有限公司生产的生物质炭, 以小麦秸秆为原料, 炭化温度 500℃, 原料 35%

转化为生物质炭, 生物质炭的 pH 10.35, 阳离子交换量 217 cmol/kg, 有效磷含量 4.7 g/kg, 有机碳含量 467.1 g/kg, 全氮含量 5.9 g/kg, 容重 0.45 g/cm³, 比表面积 8.9 m²/g。施用前需将生物质炭磨碎并过 2 mm 筛, 然后与土壤充分混合。

1.2 试验设计

试验设生物质炭和氮肥 2 个因素, 生物质炭 4 个水平, 分别为 C0(0 t/hm², 不施用生物质炭)、C2(5 t/hm²)、C4(20 t/hm²)、C6(40 t/hm²); 氮肥(纯氮)处理的 4 个水平分别为 N0(0 kg/hm² 不施用氮肥)、N1(60 kg/hm²)、N2(90 kg/hm²)、N3(120 kg/hm²), 所用氮肥为尿素。随机组合后共 16 个处理, 每处理 3 次重复, 随机分布。小区面积为 5 m×4 m, 试验区四周设 1 m 宽保护行, 小区间设 0.5 m 宽排水沟。

生物质炭于 2011 年 9 月 22 日一次性施于土壤并翻耕混匀至约 15 cm 土层深度, 后期不再添加生物质炭。根据当地农民施肥习惯, 施用的无机肥料为尿素、氯化钾(195 kg/hm²)、钙镁磷肥(375 kg/hm²)及硼砂(15 kg/hm², 仅在油菜季施用), 各处理磷钾肥及硼砂施用量相同。作物种植方式为油菜和红薯轮作, 油菜季为 10 月初至次年 5 月中旬, 红薯季为 5 月中下旬至 9 月下旬。油菜品种为德油 5 号, 红薯品种为苏薯 8 号。无机肥于每季油菜和红薯播种或扦插前作为基肥一次性施入, 并与表层土壤混匀。

1.3 土样采集与测定方法

于 2014 年 10 月 5 日采集 0—15 cm 土层新鲜土样, 各小区采集 5 点混合样。土样采集完成后, 一部分过 2 mm 筛用于测定土壤微生物生物量碳和生物量氮, 测定方法采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法^[13]。另一部分土样风干后测定基本理化性质, 土壤容重及土壤总孔隙度分别采用环刀法和容重—密度计算法(土壤密度为 2.65 g/cm³)测定; 土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤 pH 值采用 pH 计电位法测定(水土比为 5:1); 土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定; 土壤全氮采用半微量开氏法测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件对数据进行处理并绘图。采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行相关性分析, 方差分析, 多重比较采用 LSD 法。显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

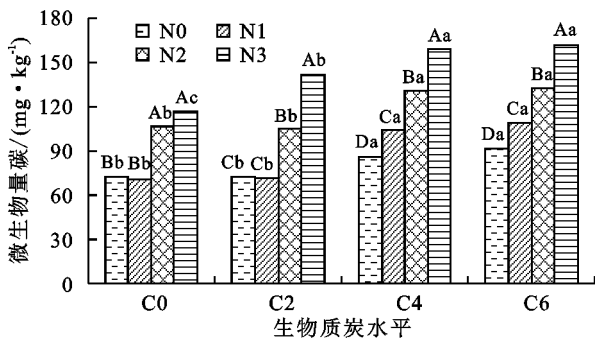
2 结果与分析

2.1 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物量碳的影响

由图 1 可知, 在同一生物质炭施用量下, 土壤微生物量碳随着氮肥施用量的提高呈增加趋势。在所有处理中 C4N3 和 C6N3 处理相比于对照处理的增长最为显著, 微生物量碳分别增加了 86.44 mg/kg 和 89.04 mg/kg, 增幅分别高达 119.16% 和 122.74%。在 C0、

C2 水平下, 只有 N2 和 N3 处理中的微生物量碳与 N0 处理相比有显著的提高。而在 C4、C6 水平下, 任何氮肥施用量都会显著提高微生物量碳。

在 N0、N1、N3 水平下, 施用生物质炭均能提高土壤中微生物量碳, 且随着施用量的增加微生物量碳逐渐升高。在不施氮肥(N0)或者 N1 水平下, 与 C0 处理相比, C2 处理虽能提高土壤微生物量碳, 但是提高幅度不显著, 而 C4 和 C6 处理都能显著提高土壤微生物量碳, 提高幅度分别为 47.05%, 54.7%, 其中 C6 处理均达到极显著水平($P < 0.01$)。在 N3 水平下, 施用生物质炭均能显著增加土壤微生物量碳, 且都达到极显著水平, 其增幅分别为 21.47%, 36.07%, 38.3%。在 N2 水平下, 与 C0 处理相比, C4 和 C6 处理均提高了土壤微生物量碳, 且达到极显著水平($P < 0.01$), 增幅分别为 22.85% 和 24.55%, 但是 C2 处理土壤微生物量碳与 C0 相比无显著性差异。



注: 不同大写字母表示同一生物质炭施用量水平下氮肥施用量不同对土壤微生物量碳的影响差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一氮肥施用量水平下生物质炭施用量不同对土壤微生物量碳的影响差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物量碳的影响

2.2 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物量氮的影响

由图 2 可知, 在同一生物质炭施用量水平下, 施用氮肥对土壤微生物量氮均有不同程度的提高, 其中以 C6N3 处理微生物量氮最高, 与对照相比增加了 11.01 mg/kg, 增幅高达 312.91%。在 C6 水平下, 增加氮肥施用量, 能显著提高土壤微生物量氮。而在不施生物质炭(C0)以及 C2 水平下, N3 处理与 N2 处理相比, 微生物量氮提高效果均不显著, 提高量分别为 0.33 mg/kg 和 0.93 mg/kg。

C2 处理与 C0 处理相比, 在所有氮肥施用量水平中, 只有 N3 水平下微生物量氮有显著提高, 增幅为 20.5%。在 N0、N2、N3 水平下, 随着生物质炭施用量的增加, 各处理微生物量氮随之增长。在 N0 水平下, 与 C0 处理相比, 施用生物质炭都能增加土壤微生物量氮, 其中 C4 和 C6 处理对微生物量氮的提升达到极显著水平, 增幅分别为 63.39% 和 71.02%。在 N2 水平下, 与 C0 处理相比, 只有 C6 处理能显著提高土壤微生物

量氮, 且达到极显著水平, 增幅为 41.64%, C2 和 C4 处理对微生物量氮增加效果都不显著, 微生物量氮分别只增加了 1.08 mg/kg 和 1.43 mg/kg。在 N3 水平下, 相对于 C0 处理, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤微生物量氮都显著提高, 其中以 C6 处理的效果最为明显, 增加了 6.37 mg/kg, 增幅高达 78.09%。在 N1 水平下, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤微生物量氮呈上升趋势, 但该水平下, C4 处理对土壤微生物量氮的提高效果最显著, 增幅达到 78.07%。

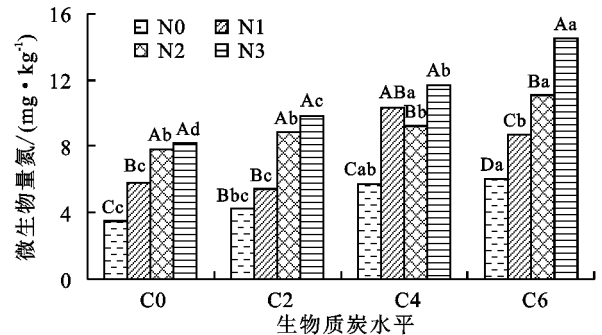


图 2 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物量氮的影响

2.3 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物碳氮比的影响

由图 3 可知, 在生物质炭施用量相同水平下, N0 处理中微生物碳氮比均高于其他氮水平处理, 其中对照处理中微生物碳氮比最高, 达到 20.86, 而 C4N1 处理最低, 为 10.1。

不施用生物质炭(C0)时, 除 N0 处理土壤微生物碳氮比最高外, 随着氮肥的施入, 其微生物碳氮比逐渐上升。当生物质炭施用量达到最大(C6)时, 随着氮肥施用量的增加, 土壤微生物碳氮比逐渐降低, N3 处理达到最低, 其微生物碳氮比为 11.2。在 N0 水平下, 与 C0 处理相比, 施用生物质炭会显著降低土壤微生物碳氮比, 其中以 C4 处理降低幅度最大, 达到 25.23%。当氮肥施用量达到最大值(N3)时, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤微生物碳氮比呈下降趋势。

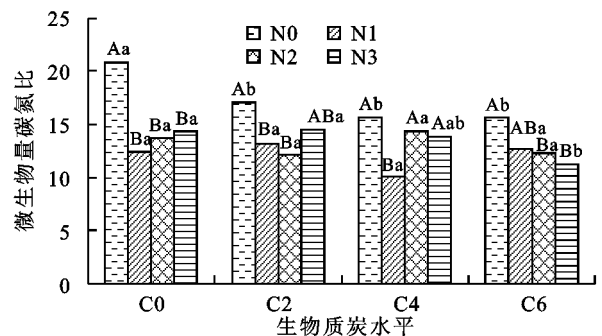


图 3 生物质炭与氮肥配施对土壤微生物碳氮比的影响

2.4 不同生物质炭和氮肥配施及其交互作用对土壤微生物量的影响

由表 1 可知施用生物质炭对土壤微生物量碳、氮以及碳氮比都有显著影响, 其中对微生物量碳、氮的影响达到极显著水平($P < 0.001$)。施用氮肥对土壤

微生物量碳、氮以及碳氮比都有极显著的影响 ($P < 0.001$)。生物质炭与氮肥交互作用能显著影响土壤微生物量碳、氮,但对微生物碳氮比却没有显著影响。

表 1 不同生物质炭和氮肥施用量对土壤微生物量碳、氮以及碳氮比影响的方差分析

变异来源	微生物量碳	微生物量氮	微生物碳氮比
生物质炭施用量	65.23***	44.24***	3.60*
氮肥施用量	220.57***	97.48***	17.70***
生物质炭×氮肥	3.27**	4.49***	2.01

注:表中数值为双因素方差分析 F 值;***表示 $P < 0.001$, **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$ 。下同。

2.5 生物质炭和氮肥施用量与土壤微生物量碳、氮及碳氮比的相关性

由表 2 可知,土壤微生物量碳、土壤微生物量氮与氮肥施用量呈极显著的正相关,相关系数分别为 0.798 和 0.791,回归方程分别为: $y = 0.5289x + 72.564$ 和 $y = 0.051x + 4.7497$ 。生物质炭与土壤微生物量氮呈显著正相关,回归方程为: $y = 0.0942x + 6.6607$,而与微生物量碳相关性不显著。

土壤微生物碳氮比与生物质炭和氮肥的施用量都呈负相关,其中与氮肥施用量呈显著的负相关,回归方程为: $y = -0.0325x + 16.199$ 。综上所述,氮肥施用量与土壤微生物量碳、氮及碳氮比的相关性要高于生物质炭施用量。

表 2 生物质炭和氮肥施用量与土壤微生物量碳、氮及碳氮比的相关性

指标	生物质炭	氮肥
微生物量碳	0.437	0.798**
微生物量氮	0.512*	0.791**
微生物碳氮比	-0.329	-0.587*

3 讨论

本研究表明,生物质炭与氮肥配施能有效增加土壤微生物量碳、氮,且随着生物质炭与氮肥施用量的提高呈增加趋势,这与相关性分析的结果一致(见表 2)。生物质炭可以提高土壤 pH、土壤有机碳、阳离子交换量、孔隙度,并且能够降低土壤容重^[4,14]。本研究中,在氮肥施用量相同的情况下,土壤微生物量碳、氮随生物质炭施用量的增加而增加,这可能是因为生物质炭具有巨大的比表面积以及疏松多孔的结构,能够保持水分和空气,当足量的生物质炭施入土壤后,能够降低土壤容重,增加土壤孔隙度和饱和导水率,提高土壤团聚体稳定性,从而更好地协调了土壤水、肥、气、热等条件,为微生物的生长与繁殖提供了优良的生活环境。另外,生物质炭具有的孔隙结构、比表面积和化学官能团等特性使其具有高吸附性能,因此可视为肥料控/缓释载体,使养分在土壤中缓慢连续释放^[15],为微生物生长持续提供养分,再者由于红壤酸性较强,施用生物

质炭后能够提高土壤 pH,从而改善微生物生活环境,促进微生物的生长和繁殖,提高土壤微生物量,这种效果在 20 t/hm² (C4) 和 40 t/hm² (C6) 的生物质炭施用量下更为显著。生物质炭表面具有大量负电荷及高电荷密度,能吸附一些对微生物有毒害作用的物质,从而促进微生物的生长繁殖,提高微生物量,前人的研究结果也证实了这一点^[9]。靖彦等^[16]的研究表明,生物质炭能够有效降低土壤中铵态氮和硝态氮的淋失,因此施用生物质炭对土壤微生物量的提升还可能是因为生物质炭对养分的保持能力,为微生物生长和繁殖提供了一定的氮源,促进了微生物的生长,提高了微生物量。也有研究表明,当氮素成为土壤中养分供应的限制因子时,微生物的代谢活动会相应减弱,从而使土壤微生物量降低^[17]。而在本研究中 N0 水平下各施用生物质炭处理的微生物量碳、氮均未随生物质炭的施用呈下降趋势,进一步说明生物质炭可能通过对氮素的吸附及转化等满足微生物对氮素的需求,从而消除了氮素缺乏这一限制因素。

在 C0 水平下,微生物量碳在 N0 与 N1 处理之间以及 N2 与 N3 处理之间都没有表现出显著性差异。但是随着生物质炭施用量的增加,不仅 N0 与 N1 处理之间产生显著性差异,N2 和 N3 处理之间也出现显著性差异。这可能是因为随着生物质炭施用量的增加,会提高土壤微生物量。因此,微生物对氮肥的利用潜力也随之增加,所以此时增加氮肥的施用量会促进微生物的生长与繁殖,使土壤微生物量进一步提高。土壤微生物量氮也随生物质炭与氮肥施用量的增加成增加趋势,这也表明经同化作用进入微生物体内暂时固定下来的氮素增多,即生物质炭能提高氮肥利用率。但是与微生物量碳不同的是,在不施用生物质炭时,少量施用氮肥(60 kg/km²),土壤中微生物量氮即有显著提升,这可能是由于土壤速效氮含量低,氮素成为微生物生长的限制因素,此时少量施用氮肥,即能使微生物对氮素的同化量增加,从而显著提高微生物量氮。

有研究表明,土壤微生物生物量碳氮比的高低反映了土壤氮素供应能力,微生物碳氮比较小时土壤氮素有较高的生物有效性,可以提高土壤氮素利用率^[18]。本研究发现生物质炭与氮肥配施能降低土壤微生物碳氮比。在不施用生物质炭时,除对照处理土壤微生物碳氮比最高外,其他处理微生物碳氮比随着氮肥的施入逐渐上升,这可能是因为不施用生物质炭时,土壤中微生物的丰度以及活性都不高,当增加氮肥施用量时,土壤中氮素的生物有效性会降低。而当生物质炭施用量达到最大(40 t/hm²)时,随着氮肥施用量的增加,土壤微生物碳氮比逐渐降低,这就说明,此时土壤中微生物丰度以及活性足够大,需要大量的氮

素,所以增加氮肥施用量,土壤中氮素生物有效性就提高。试验表明,20 t/hm² 生物质炭与 60 kg/hm² 氮肥配合施用或 40 t/hm² 生物质炭与 120 kg/hm² 氮肥配合施用对微生物碳氮比的降低效果最为显著。这可能是因为生物质炭与氮肥以这种比例进行配施时,土壤氮素的生物活性增大,从而更多的氮素被微生物同化,使微生物体内氮含量升高,造成微生物碳氮比下降。也有可能是因为一般情况下土壤微生物碳氮比的大小为真菌>放线菌>细菌,生物质炭与氮肥以这种比例施入土壤后,更有利于细菌的生长与繁殖,使细菌在土壤微生物群体中的比例增加,造成微生物碳氮比下降。也有研究表明,细菌较易吸附到生物质炭的表面,使它们不易受土壤淋洗的影响^[19],从而增加细菌在土壤中的比例,使微生物碳氮比降低。

本研究中,相关性分析表明,氮肥与微生物量碳、氮的相关性要高于生物质炭(见表2),这并不是说明生物质炭对土壤微生物的影响小,而是因为氮肥对微生物的影响更为直接,生物质炭对微生物的影响则主要是通过改善土壤物理化学性质,提高氮肥的利用率等间接作用来实现。生物质炭与氮肥交互作用对微生物碳氮比没有显著影响(见表1),相关性分析也表明,生物质炭与微生物碳氮比没有显著的相关性,而氮肥与微生物碳氮比的相关性也低于其与微生物量碳、氮的相关性(见表2)。说明生物质炭或者氮肥的施用量都不是决定微生物碳氮比的因素,生物质炭与氮肥的施用比例才是决定微生物碳氮比的因素。

4 结论

(1) 生物质炭与氮肥配施能有效提高土壤微生物量碳、氮。其中生物质炭与氮肥配施量较低时(5 t/hm² 生物质炭与 60 kg/hm² 氮肥)对土壤微生物量碳、氮的作用较小,土壤微生物量碳、氮量都较低,土壤活性差,不利于土壤中氮素的矿化。随着生物质炭与氮肥施用量的增加,土壤微生物量碳、氮也随之增加。当生物质炭与氮肥施用量都达到最高时(40 t/hm² 生物质炭与 120 kg/hm² 氮肥),土壤微生物量碳、氮含量也最高。

(2) 生物质炭与氮肥配施后,各处理的微生物碳氮比与对照相比都有所降低,其中 20 t/hm² 生物质炭与 60 kg/hm² 氮肥以及 40 t/hm² 生物质炭与 120 kg/hm² 氮肥配合施用对微生物碳氮比的降低效果最为明显,此时土壤氮素生物活性较高,有利于作物对氮素的吸收利用。

参考文献:

- [1] Rebecca R. Rethinking biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [2] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M, et al. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [3] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1224-1235.
- [4] 李秋霞, 陈效民, 靳译文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性质和作物产量的持续效应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 208-213.
- [5] 靖彦, 陈效民, 刘祖香, 等. 生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤有效磷含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 989-994.
- [6] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [7] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301-1310.
- [8] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3311-3317.
- [9] Chen H, Yao J, Wang F, et al. Study on the toxic effects of diphenol compounds on soil microbial activity by a combination of methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/3): 846-851.
- [10] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 247-250.
- [11] 张雪艳, 曹云娥, 田蕾, 等. 不同栽培方式对温室连作黄瓜土壤微生物量碳氮和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 562-569.
- [12] 王淑平, 周广胜, 孙长占. 土壤微生物量氮的动态及其生物有效性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 87-90.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 农业科技出版社, 2000: 150-152.
- [14] 杜臻杰, 齐学斌, 陈效民, 等. 生物质炭和猪场沼液对潮土水力特征参数的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 189-192.
- [15] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 275-290.
- [16] 靖彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 265-269.
- [17] Wang C, Feng X, Guo P, et al. Response of degradative enzymes to N fertilization during litter decomposition in a subtropical forest through a microcosm experiment [J]. *Ecological Research*, 2010, 25(6): 1121-1128.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 71-74.
- [19] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. *Oikos*, 2000, 89: 231-242.