

生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响

张 星¹, 刘杏认^{1*}, 张晴雯¹, 张庆忠¹, 任建强²

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 基于华北农田长期定位试验, 研究了长期施用生物炭和秸秆还田对整个玉米生育期内土壤微生物量的影响。试验共设 4 个处理: CK(单施氮磷钾肥)、C1(生物炭 $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 氮磷钾肥)、C2(生物炭 $9.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + 氮磷钾肥)和 SR(秸秆还田 + 氮磷钾肥)。结果表明, 各处理土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)动态变化趋势基本一致, 均在玉米拔节期达到最高值, 施用生物炭和秸秆还田均显著提高了土壤 MBC、MBN 含量($P < 0.05$), 并且随着施炭量的增加而增加。与 CK 相比, C1、C2 和 SR 处理的土壤 MBC 和 MBN 分别提高了 105.2%、146.5%、96.4% 和 123.9%、183.6%、114.3%; 与秸秆直接还田相比, 施用高量生物炭更有利于增加土壤 MBC、MBN 含量。土壤 MBC、MBN 均与土壤温度呈现显著的正相关关系, 而与土壤水分的相关性较差, 说明在玉米生育期土壤温度是影响土壤微生物量变化的主要因素之一。施用生物炭显著降低了 MBC、MBN 的季节波动, 而对土壤微生物量碳氮比(MBC/MBN)没有显著影响。综上所述, 施用生物炭更有利于维持较高的微生物活性和较稳定的土壤环境。

关键词: 生物炭; 秸秆还田; MBC; MBN

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)10-1943-08 doi:10.11654/jaes.2015.10.015

Effects of Biochar and Straw Direct Return on Soil Microbial Biomass During Maize Growth Season in North China Plain

ZHANG Xing¹, LIU Xing-ren^{1*}, ZHANG Qing-wen¹, ZHANG Qing-zhong¹, REN Jian-qiang²

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture P.R. China, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Biochar and straw direct return to field can increase soil organic carbon and may thus improve soil microbial biomass. In a long-term experiment in the North China Plain, we studied the effects of biochar and straw direct return to field on soil microbial biomass during maize growth period. This experiment consisted of four treatments (CK, C1, C2, SR) with three replication: CK (NPK fertilizer alone), C1 (biochar $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + NPK fertilizer), C2 (biochar $9.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ + NPK fertilizer) and SR (straw return + NPK fertilizer). Results showed that soil microbial biomass carbon and nitrogen (MBC, MBN) had similar seasonal variations and they reached the highest at maize jointing stage. Biochar addition and straw return significantly increased the content of soil MBC and MBN. Such effects increased with biochar rates. Compared with CK, soil MBC and MBN in C1, C2 and SR treatments were increased by 105.2%, 146.5%, and 96.4% and 123.9%, 183.6%, and 114.3%, respectively. High amount of biochar was more helpful to increase soil MBC and MBN than straw return was. Soil MBC and MBN was positively correlated with soil temperature, but had no correlation with soil moisture. Soil temperature was one of the main factors affecting soil microbial biomass during maize growth period. Furthermore, biochar significantly reduced the seasonal fluctuation of MBC and MBN, but showed no significant effects on soil MBC/MBN ratio. In summary, applying biochar would be helpful to maintain high and stable microbial biomass of soil.

Keywords: biochar; straw return; MBC; MBN

收稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31300375); 中央公益型科研院所基本科研业务费专项资金(BSRF201505)

作者简介: 张 星(1989—), 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事农田生态系统氮素循环的研究。E-mail: 13241321965@163.com

* 通信作者: 刘杏认 E-mail: liuxingren@caas.cn

生物炭(Biochar)是由生物质在部分或完全缺氧的情况下经低温热裂解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质。具有极高的化学稳定性、热稳定性和微生物稳定性^[1-2],是黑碳的一种存在形式^[3]。作为土壤改良的理想材料,生物炭因具有提高土壤肥力^[4]和土壤 C/N 比^[5]、改善土壤持水性^[6]、吸附土壤污染物^[7]、为植物提供矿质养分^[8]和增加作物产量^[9]等作用受到人们极大的关注,成为目前研究的热点。

在土壤生态系统中,土壤微生物不仅是土壤有机质分解与腐殖质形成过程的主要参与者,为土壤有机质和 N、P、S 等的转化和循环提供动力^[3,10],而且也是土壤质量可持续性演变的重要指标,对土壤肥力的形成和维持生态系统稳定性发挥着重要的作用。长期施用生物炭,可以显著提高土壤微生物量^[5,11],改善土壤微生物的生存环境,进而为土壤微生物生长提供良好的栖息场所,促进微生物活动,增加土壤生物多样性^[12-13]。基于室内培养试验,Dempster 等^[14]发现高量木材生物炭施用后相比对照能够显著降低微生物量碳;而 Castaldi 等^[15]在田间试验中发现,添加热解温度为 500 ℃的木材生物炭 3 个月和 14 个月后,土壤微生物量并无显著变化。以上结论说明生物炭对土壤微生物量的影响差异较大,这种差异性可能与生物炭自身性质(材料类型、热解温度、相对稳定性)、试验条件与施用时间等有关^[16]。

农作物秸秆作为重要的有机肥源之一,其还田后能够向土壤中输送大量的可溶性有机碳、氮,为土壤微生物繁殖提供所需营养,从而加强微生物活性,提高土壤微生物量^[17-18]。张静等^[19]认为秸秆还田能够使土壤微生物固持碳、氮的效果增强,从而提高土壤的供肥水平。周文新等^[20]研究发现,秸秆还田有利于改善土壤微生物群落结构和功能,增加土壤细菌数量,提高土壤微生物群落的代谢能力与功能多样性。

然而到目前为止,关于添加生物炭与秸秆还田对土壤微生物量的影响缺乏深入的对比分析,且大多数研究为短期培养试验,基于长期定位试验的研究还很少。本研究在华北高产农田连续 7 年施用生物炭试验的基础上,测定了 2014 年整个玉米生育期土壤微生物

量碳、氮(MBC、MBN)的动态变化,试图明确添加不同量生物炭及秸秆还田对土壤微生物量的影响,为深入研究生物炭在农业生产上的综合应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区地处华北平原,位于山东省淄博市桓台县华北集约农业生态系统试验站,坐标 117°58'E,36°57'N,海拔 17.0 m;气候属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 11.8~12.9 ℃,年平均日照时数 2 832.7 h,日照率 62%,年平均降水量 542.8 mm,主要集中在 6 至 9 月。作物种植方式为冬小麦(10 月初至次年 6 月初)—夏玉米(6 月中旬至 9 月中旬)一年两熟制。土壤类型为砂姜潮湿锥形土,供试土壤的基本性质见表 1。

1.2 试验材料

本试验选用的生物炭是以玉米秸秆为原料,在 360 ℃条件下经过 24 h 不完全燃烧制成的黑色粉末,购自辽宁金和福农业开发有限公司,其 pH 8.2,密度为 0.297 g·cm⁻³,含碳量 65.7%,含氮量 0.9%,有效钾含量 1.6%,有效磷含量 0.08%,灰分含量 72.0%。供试玉米品种为郑单-958。

1.3 试验设计

生物炭长期定位试验布置于 2007 年 6 月,共设置 4 个处理,采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,小区面积为 6 m×6 m=36 m²。具体处理为:对照,单施氮磷钾肥(CK);生物炭 4.5 t·hm⁻²·a⁻¹+氮磷钾肥(C1);生物炭 9.0 t·hm⁻²·a⁻¹+氮磷钾肥(C2);秸秆还田+氮磷钾肥(SR)。其中秸秆全量粉碎还田量全部转化为生物炭大约为 4.5 t·hm⁻²,可以和 C1 处理形成对比。

所有处理均为等量氮、磷、钾设计,不同处理按照施入秸秆或生物炭氮、磷、钾的含量补充施用化肥,各处理氮磷钾肥平均用量分别为:N 200 kg·hm⁻²·a⁻¹、P₂O₅ 52.5 kg·hm⁻²·a⁻¹、K₂O 37.5 kg·hm⁻²·a⁻¹,其中氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。氮磷钾肥和生物炭的用量平均分配冬小麦季和夏玉米季,氮肥一半作为基肥,一半作为追肥。生物炭和氮磷钾肥均撒施后,进行 15 cm 深度旋耕,秸秆还田在上一季小麦

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

pH(土水比=1:2.5)	有机碳 Organic C/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹
8.1	10.8	0.7	48.0	11.5	210.1

收获时粉碎还田,其余处理则移出上一季小麦秸秆。试验期间田间基本管理措施如下:夏玉米播种于2014年6月13日,7月27日进行追肥灌水,9月30日收获。

1.4 样品采集及测定

1.4.1 土壤样品的采集处理

玉米播种后,每周采样一次,各处理随机选取5个点,采集0~10 cm土样进行混匀,手工拣去植物砾石、残体等,过2 mm筛,装入自封袋,一部分4℃下保存用于测定土壤MBC、MBN,另一部分土样用于测定土壤含水量。

1.4.2 测定方法

土壤温度和水分:土壤温度采用自动传感器(HOBO-H8,北京)进行原位监测,监测深度为5 cm;土壤含水量使用烘干法进行测定(105℃,24 h)^[21]。

土壤MBC(MBN):采用氯仿熏蒸提取法^[22],称取2份10 g的鲜土置于培养箱中25℃培养10 d。培养过程中密闭容器内的土壤样品调节到40%左右的田间持水量,并在其中放置装有NaOH溶液的小烧杯,用于吸收土壤培养过程中释放的CO₂。培养结束后,取出各处理中一份土壤用氯仿进行熏蒸,另外一份土壤不进行熏蒸作为对照。避光放置24 h后用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄振荡0.5 h后过滤(土水比=1:4)放入离心管中,提取液先过滤膜再使用multi N/C 2100/2100S TOC分析仪(Jena,德国)测定,然后计算土壤MBC(MBN)含量,公式^[22]为:

$$\text{MBC(MBN)} = \frac{40 \times [\text{C(N)}_{\text{熏蒸}} - \text{C(N)}_{\text{未熏蒸}}]}{K_E \times \text{鲜土重} / (1 + \text{土壤含水量})}$$

式中: $\text{C(N)}_{\text{熏蒸}}$ 和 $\text{C(N)}_{\text{未熏蒸}}$ 分别表示熏蒸土壤和未经熏蒸土壤的浸提液中全碳(氮)的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; K_E 为转换系数,均取值0.45;MBC(MBN)为每单位干土所

含微生物量碳(氮)的量, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.5 数据分析

利用Microsoft Office Excel 2007进行数据整理、相关数据回归分析和图形制作,相关性分析和方差分析用SPSS 20.0完成,显著性水平选择 $P < 0.05$,季节变异程度用变异系数(CV)来描述。

2 结果

2.1 不同处理土壤MBC的变化

如图1所示,在玉米的生育期内,各处理土壤MBC的变化趋势基本一致,均呈现双峰波动曲线,两次峰值分别出现在7月13日和9月7日。7月13日之前,与CK相比,C1和SR处理对土壤MBC含量的影响较小,其增加幅度分别为37.20%~62.20%和29.29%~52.65%;而C2处理下的土壤MBC含量较CK显著增加($P < 0.05$),增加幅度为43.43%到108.75%。将SR处理与C1处理相比,土壤MBC含量无显著差异($P > 0.05$);比较SR与C2处理,SR处理下MBC含量却显著低于C2处理($P < 0.05$)。7月13日,各处理MBC均达到了最高值,分别为 $242.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (CK)、 $352.44 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (C1)、 $496.81 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (C2)和 $402.43 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (SR),且C1、C2和SR处理与CK相比呈现显著增加趋势($P < 0.05$);相比SR,C2处理的MBC显著高于SR处理($P < 0.05$),而C1处理的MBC显著低于SR处理($P < 0.05$)。此后各处理MBC含量逐渐降低,其中在7月27日进行追肥后土壤MBC的变化不明显,到8月24日达到最低值,之后逐渐回升,9月中旬出现第二个峰值。总体来看,添加生物炭(C1、C2)和秸秆还田(SR)处理的土壤MBC与CK相比差异显著($P < 0.05$),分别比CK提高了105.2%、146.5%和96.4%,且C2处理的土壤MBC含量显著高于其他处理($P < 0.05$),土壤MBC含量的大

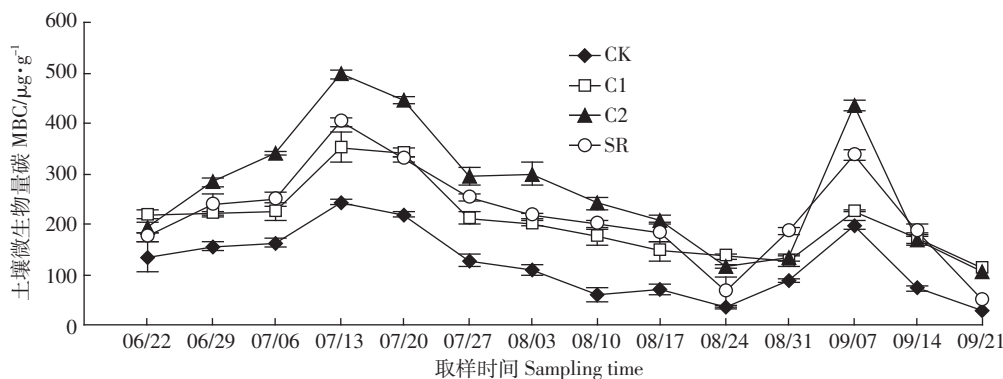


图1 不同处理下整个玉米生育期土壤微生物量碳(MBC)的变化

Figure 1 Variation of soil microbial biomass carbon(MBC) in different treatments during maize growing season

小为 $C2 > SR > C1 > CK$, 但 SR 处理的土壤 MBC 与 C1 处理相比, 没有达到显著水平 ($P > 0.05$)。

2.2 不同处理土壤 MBN 的变化

图 2 表示的是整个玉米生育期不同处理土壤 MBN 含量的变化。在玉米生育期内, 各处理土壤 MBN 含量的动态变化趋势基本一致, 呈现双峰波动曲线, 与土壤 MBC 的变化相似, 两次峰值也分别出现在 7 月 13 日和 9 月 7 日。7 月 13 日之前, 与 CK 对比, C1、C2 和 SR 处理均显著增加了土壤 MBN 含量 ($P < 0.05$), 其增加幅度分别为 99.49%~158.74%、62.30%~190.85% 和 56.03%~102.39%; C1 和 C2 处理下的 MBN 含量均高于 SR 处理, 且均达到显著性差异 ($P < 0.05$)。最高峰值出现在 7 月 13 日, 分别为 81.0 (CK)、121.1 (C1)、172.6 (C2)、134.7 (SR) $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 且 C1、C2 和 SR 处理与 CK 相比显著增加 ($P < 0.05$), 相比 SR, C2 处理的 MBN 显著高于 SR 处理 ($P < 0.05$), 而 C1 处理的 MBN 与 SR 处理无显著差异 ($P > 0.05$)。此后各处理土壤 MBN 含量逐渐下降, 其中在 7 月 27 日进行追肥后土壤 MBN 的变化不明显, 到 8 月 24 日达到最低值, 之后

又有回升的趋势, 9 月 7 日达到第二个峰值。在整个玉米生育期, 生物炭处理和秸秆还田处理的土壤 MBN 含量显著高于单施化肥处理 ($P < 0.05$), 与 CK 相比, C1、C2 和 SR 处理的土壤 MBN 含量分别提高了 123.9%、183.6% 和 114.3%, 且 C2 处理的土壤 MBN 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 土壤 MBN 含量的大小为 $C2 > SR > C1 > CK$, 但 SR 与 C1 处理下的土壤 MBN 相比, 没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.3 不同处理土壤微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 的变化

不同处理土壤 MBC/MBN 的变化见图 3。各处理土壤 MBC/MBN 的变化均以不规则的多峰波动曲线为主, 且各处理波动趋势不相同。CK、C1 和 C2 处理的土壤 MBC/MBN 到 8 月初均出现第一个峰值, 其大小顺序为 $CK > C1 > C2$, 而 SR 处理在 6 月底出现。CK 和 SR 处理的土壤 MBC/MBN 在 9 月中旬达到最高峰, 其值分别为 8.5、8.0; C1 和 C2 处理在 9 月中下旬均达到最高峰, 其值分别为 8.2 和 8.4。统计分析表明, 整个玉米生育期中各处理的土壤 MBC/MBN 较低, 大

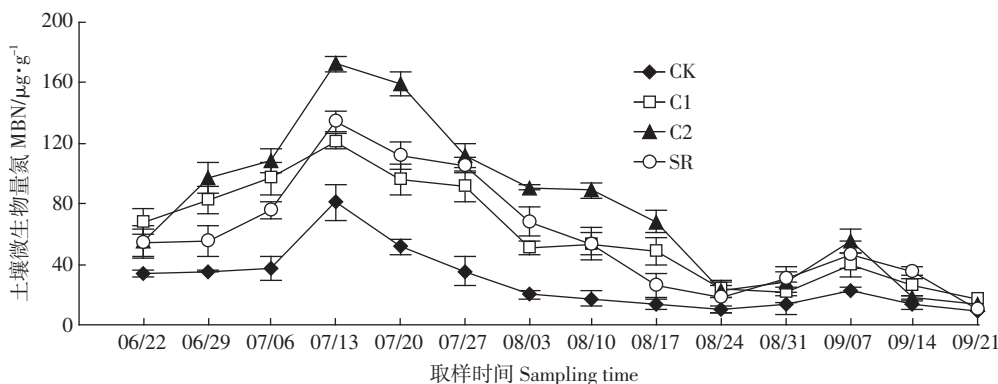


图 2 不同处理下整个玉米生育期土壤微生物量氮 (MBN) 的变化

Figure 2 Variation of soil microbial biomass nitrogen (MBN) in different treatments during maize growing season

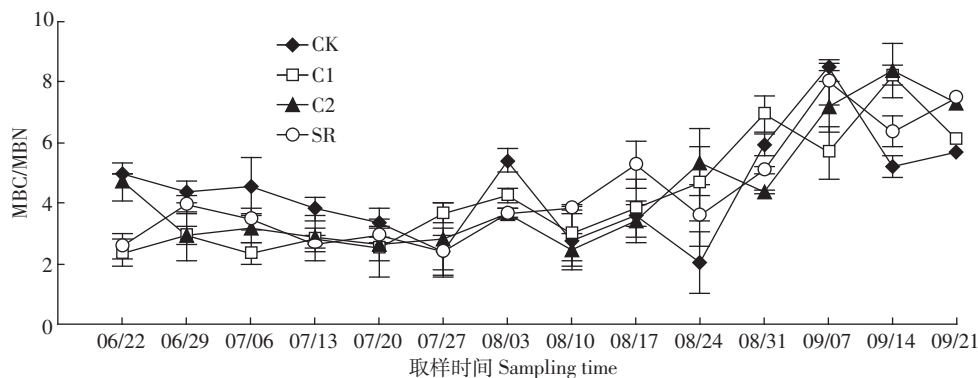


图 3 不同处理下整个玉米生育期土壤微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 的变化

Figure 3 Variation of soil microbial biomass carbon (MBC) to soil microbial biomass nitrogen (MBN) ratios in different treatments during maize growing season

部分时间其值都在 4 左右波动且基本处于同一水平,分别为 4.46 ± 1.66 (CK)、 4.24 ± 1.86 (C1)、 4.36 ± 1.96 (C2) 和 4.38 ± 1.81 (SR)。不同处理下土壤 MBC/MBN 相对于 CK 的降幅仅为 1.99%~5.08%。

2.4 土壤 MBC、MBN 及 MBC/MBN 的变异程度

表 2 给出不同处理下,土壤 MBC、MBN 及 MBC/MBN 的变异系数。相对于 CK 处理,施用生物炭可显著减少土壤 MBC 和 MBN 季节波动 ($P < 0.05$),MBC 和 MBN 的降幅分别为 15.39% (C1)、36.99% (C2) 和 8.00% (C1)、20.39% (C2),均随着施用量的增加而增大,其中 MBC 的季节变化比 MBN 小。与 CK 相比,SR 处理也表现为显著减少 MBC 和 MBN 的季节波动 ($P < 0.05$),其降幅分别为 21.26% 和 9.97%。C2 处理下土壤 MBC/MBN 的变异系数最大,为 44.98%,其余处理下土壤 MBC/MBN 则变化相对较少,其中 CK 处理下土壤 MBC/MBN 最小,变异系数为 37.93%。总体上看,土壤 MBC/MBN 的季节变化较 MBC 和 MBN 低,

表 2 不同处理下土壤微生物量碳、微生物量氮及碳氮比的变异系数 (%)

Table 2 Variation coefficients of MBC, MBN and MBC/MBN ratios in different treatments (%)

处理 Treatments	微生物量碳 MBC	微生物量氮 MBN	微生物量碳氮比 MBC/MBN
CK	55.49b	69.85b	37.93a
C1	34.96a	55.61a	43.49a
C2	46.95a	64.27a	44.98a
SR	43.70a	62.89a	41.33a

注:同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters within a column indicate significant difference between different treatments at $P < 0.05$.

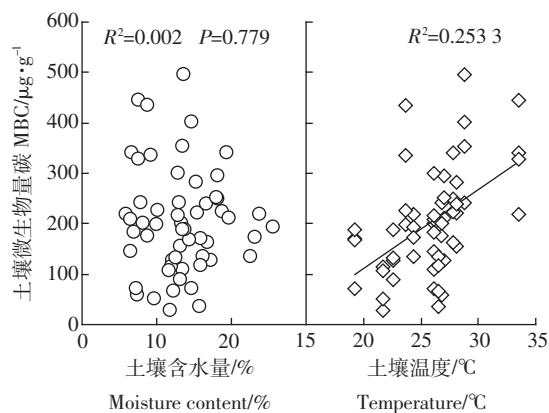


图 4 土壤含水量和土壤温度与土壤微生物量碳的相关性分析
Figure 4 Correlations between soil moisture/soil temperature and MBC

施用生物炭和秸秆还田处理下土壤 MBC/MBN 的季节波动无显著变化 ($P > 0.05$)。

2.5 土壤温度和土壤水分与土壤微生物量的关系

土壤 MBC、MBN 与土壤温度的相关分析见图 4、图 5。土壤 MBC 与土壤温度表现出极显著的正相关关系 (图 4, $R^2=0.253$, $P < 0.001$), 土壤 MBN 与土壤温度也表现出极显著的正相关关系 (图 5, $R^2=0.489$, $P < 0.001$); 而对土壤微生物量与土壤水分的相关性进行分析可以看出, 土壤 MBC (图 4, $R^2=0.002$, $P=0.779$) 和 MBN (图 5, $R^2=0.001$, $P=0.779$) 均与土壤水分相关性很低。

3 讨论

土壤微生物量的变化是表征土壤微生物对生物炭响应的重要指标之一^[23]。生物炭自身特有的结构特征能够为微生物提供较大的栖息生存空间, 调控并影响土壤微生物的生长发育, 进而改变土壤微生物量。土壤 MBC 不仅是土壤碳库中最活跃的部分, 而且也是土壤生物肥力的重要标志^[24]。土壤 MBN 作为土壤有机氮的重要组成部分, 其数量虽少, 却控制着土壤中碳、氮养分循环, 因此对养分的供给与转化起重要作用^[25-26]。本研究表明, 施用生物炭显著提高了土壤 MBC 含量, 与前人的结论一致^[12, 16, 27-29]。C2 处理的土壤 MBC、MBN 含量整体变化趋势明显高于 CK、C1 和 SR 处理, 说明施用高量生物炭有利于维持较高的微生物活性, 能够提高土壤肥力, 与陈心想等^[23]的报道类似。而 Dempster 等^[14]研究认为, 高量生物炭抑制了土壤 MBC, 其原因或许是施用量 ($25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 远高于本研究的生物炭用量, 也可能与生物炭类型或土壤类型

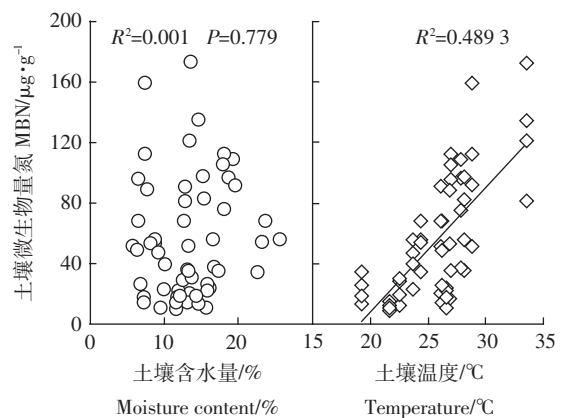


图 5 土壤含水量和土壤温度与土壤微生物量氮的相关性分析
Figure 5 Correlations between soil moisture/soil temperature and MBN

有关。SR 处理在一定程度上也能提高土壤 MBC 和 MBN 含量。这是由于秸秆自身含有丰富的矿质养分及有机碳^[27,30-31],能够促进微生物活动,进而增加土壤 MBC 和 MBN 含量^[32-33],但与 C1 处理的土壤 MBC 和 MBN 相比,均无显著性差异。各处理的土壤 MBC 和 MBN 含量在 7 月、9 月中旬均出现峰值,和鲁宁^[34]的报道一致。这可能是由于 7 月中旬土壤水热条件较好,作物生长迅速,微生物活动旺盛,分解产生了大量的 MBC、MBN,9 月中旬处于灌浆成熟期,作物需要的养分逐渐减少,土壤中多余的碳源、氮源被固定在微生物体内,从而增加了土壤 MBC 和 MBN 含量。追肥后各处理的土壤 MBC 和 MBN 含量变化不明显,可能由于土壤微生物量对施氮作用反应较为缓慢而复杂,其原因还需进一步研究证实。本试验结果还显示,生物炭施用增加了土壤 MBN,虽与陈心想等^[23]的结果一致,但与黄剑^[27]的结果却不尽相同。这可能是由于研究阶段和作物类型不同所导致,黄剑等研究的是冬小麦生育期间土壤 MBC 和 MBN 的变化情况,因冬季低温土壤冰冻,小麦的生长基本处于停滞状态,吸收养分较少,微生物活动减弱,故而通过同化作用转入微生物体内的氮素减少。

土壤 MBC/MBN 常常用来反映微生物群落的结构信息^[35]。本试验在生长季内土壤 MBC/MBN 基本处于同一水平,与 Chan 等^[36]的报道结果相吻合,说明向土壤中输入有机碳对土壤 MBC/MBN 影响较小^[37]。一般认为土壤微生物组成的不同是导致土壤 MBC/MBN 变化的缘由。诸多研究表明,细菌的 MBC/MBN 范围在 3~6,而真菌的 MBC/MBN 范围在 7~12^[38-40]。本文各处理下的土壤 MBC/MBN 在 9 月中旬或中下旬(处于秋季)达到最高峰,其值为 8.0 左右,可能是由于微生物量中含有较多的真菌。在整个玉米生育期中,各处理的土壤 MBC/MBN 值较低,多数在 4 左右,可能是微生物量中细菌占优势,Nemergut 等^[41]发现夏季温度较高,促使植物代谢旺盛,向土壤中释放一些根际分泌物来刺激细菌繁殖,但到秋季植物停止生长,微生物主要以能够利用植物掉落物的真菌形式存在,这可能是出现该结果的另一个原因。生物炭施用量不同,会导致土壤 MBC/MBN 的变化也有所不同,这或许是因为微生物组成发生了变化,对此还需要通过分子生物学的方法来进行进一步确定。

在本研究中,整个玉米季土壤 MBC 和 MBN 呈现出明显的季节波动,与 Zhang 等^[42]的研究结论一致。变异系数可以用来表示季节波动的剧烈程度,有研究认为,施用生物炭显著增加土壤 MBN 的季节波动,这

或许是源于高水平惰性碳能够固持土壤氮素及促进土壤微生物生长的综合效应,也可能是由生物炭的吸附性而带来的测量误差造成的^[23,27]。而本试验发现,施用生物炭和秸秆还田均明显减少了土壤 MBC 和 MBN 的季节波动,说明施用生物炭和秸秆还田在一定程度上能够增加土壤环境的稳定性,其原因可能与添加的生物炭和秸秆本身的结构、特性有关,施用之后能够很好地被土壤微生物利用,改善了土壤环境,进而增强土壤组成的稳定性,对此还需要进一步的实验来加以验证。Kallenbach 等^[37]研究发现,在生长季内土壤 MBC/MBN 基本上保持不变,处于相对稳定的比例。本文中各处理的土壤 MBC/MBN 的季节波动均无显著性的变化,结果与之相吻合。

微生物量对环境变化很敏感^[13],如土壤温度和水分等,许多相关研究表明,土壤温度是影响微生物量碳氮的主要因素^[43-46]。本试验土壤 MBC、MBN 与土壤温度均表现极其显著的正相关关系,与上述研究的结论相同。这可能是因为生物炭加深了土壤的颜色,使得土壤温度升高,进而促进土壤微生物的代谢活动^[47]。土壤 MBC 和 MBN 均与土壤水分相关性很低,与李世清等^[46]观点相符,而与 Zhang 等^[42]结果不同。Russell^[48]发现,在土壤颗粒表面只要有一定的水膜,就可以满足微生物的正常活动,同时由于田间试验的水分变化比室内试验复杂,而且受其他环境因素(如土壤 pH、土壤养分物质等)的制约,也可能产生这样的结果。

4 结论

本文基于华北农田长期定位试验,研究了长期施用生物炭和秸秆还田对整个玉米生育期土壤微生物量的影响,主要结论如下:

(1)在玉米生育期内,不同处理下土壤 MBC、MBN 均呈现出相同的动态变化趋势,且各处理的土壤 MBC、MBN 含量均在拔节期达到最高峰。施用生物炭和秸秆还田可显著提高土壤 MBC、MBN 含量,与秸秆直接还田相比,施用高量生物炭有利于增加土壤 MBC、MBN 含量。

(2)施用生物炭显著降低了土壤 MBC、MBN 的季节波动,使土壤环境的稳定性增加。施用生物炭和秸秆还田对土壤 MBC/MBN 没有显著影响,各处理基本处于同一水平。

(3)在玉米生育期内,土壤 MBC 和 MBN 均与土壤温度有显著的正相关关系,而与土壤水分无明显相

关性,说明土壤温度是影响玉米生育期土壤微生物量变化的主要环境因素。

参考文献:

- [1] Rutigliano F A, Romano M, Marzaioli R, et al. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 60: 9–15.
- [2] 宋延静, 龚 骏. 施用生物炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2010(4): 361–365.
SONG Yan-jing, Gong Jun. Effects of biochar application on soil ecosystem functions[J]. *Ludong University Journal (Natural Science Edition)*, 2010(4): 361–365.
- [3] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570–575.
KUANG Chong-ting, JIANG Chun-yu, LI Zhong-pei, et al. Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddy soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4): 570–575.
- [4] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235–246.
- [5] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. *Science*, 2008, 320(5876): 629–629.
- [6] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 526–530.
- [7] Nguyen T H, Brown R A, Ball W P. An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(3): 217–234.
- [8] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105–112.
- [9] Kimetu J M, Lehmann J, Ngoze S O, et al. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(5): 726–739.
- [10] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 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[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502–5511.
MA Xiao-xia, WANG Lian-lian, LI Qing-hui, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502–5511.
- [11] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206–213.
- [12] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 91–118.
- [13] 韩光明. 生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 沈阳农业大学, 2013.
HAN Guang-ming. Effect of biochar on soil physicochemical property and microbial diversity in different soil types[D]. Shenyang Agricultural University, 2013.
- [14] 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(1–2): 311–324.
- [15] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, et al. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(9): 1464–1471.
- [16] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1173–1181.
- [17] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192–2199.
HAN Xin-zhong, ZHU Li-qun, YANG Min-fang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192–2199.
- [18] 慕 平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 25(5): 81–85.
MU Ping, ZHANG En-he, WANG Han-ning, et al. Effects of continuous returning straw to maize tillage soil on chemical character and microbial biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 25(5): 81–85.
- [19] 张 静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612–619.
ZHANG Jing, WEN Xiao-xia, LIAO Yun-cheng, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter-wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 612–619.
- [20] 周文新, 陈冬林, 卜毓坚, 等. 稻草还田对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 326–330.
ZHOU Wen-xin, CHEN Dong-lin, BU Yu-jian, et al. Effects of rice-straw returning to the field on the metabolic diversity of soil microbial-communities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 326–330.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20–50.
BAO Shi-dan. Soil and agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 20–50.
- [22] 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: 54–79.
WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Qiao-yun, et al. Soil microbial biomass—methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54–79.
- [23] 陈心想, 耿增超, 王 森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 751–758.
CHEN Xin-xiang, GENG Zeng-chao, WANG Sen, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 751–758.
- [24] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 81–83.
ZHANG Chun-xia, HAO Ming-de, WEI Xiao-rong, et al. Change of soil microbial biomass carbon in different agroecosystems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 81–83.
- [25] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量

- 氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 765-772.
- HAN Xiao-ri, ZHENG Guo-di, LIU Xiao-yan, et al. Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 765-772.
- [26] Paul J W, Beauchamp E G. Short communication: Soil microbial biomass C, N mineralization, and N uptake by corn in dairy cattle slurry- and urea-amended soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(4): 469-472.
- [27] 黄 剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- HUANG Jian. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [28] 陈 伟, 周 波, 束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3850-3856.
- CHEN Wei, ZHOU Bo, SHU Huai-rui. Effects of organic fertilizer and biochar on root system and microbial functional diversity of *Malushu-pehensis Rehd*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18): 3850-3856.
- [29] 李 明, 李忠佩, 刘 明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1361-1369.
- LI Ming, LI Zhong-pei, LIU Ming, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [30] 邵月红, 潘剑君, 孙 波. 长期施肥对红壤不同形态碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 125-127.
- SHAO Yue-hong, PAN Jian-jun, SUN Bo. Effect of a long-term organic manure application on the different available carbons in red soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 125-127.
- [31] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 806-809.
- CHEN Shang-hong, ZHU Zhong-lin, LIU Ding-hui, et al. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 806-809.
- [32] 李 娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.
- LI Juan, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144-152.
- [33] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 等. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 162-167.
- LI Gui-tong, ZHAO Zi-juan, HUANG Yuan-fang, et al. Effect of straw returning on soil nitrogen transformation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 162-167.
- [34] 鲁 宁. 生物炭对华北高产农田土壤碳和作物产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- LU Ning. The effect of biochar application on soil carbon and grain yield in a high yield farmland of the North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [35] 贾国梅. 黄土高原地区植被演替和土地管理对土壤养分、微生物活性和群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- JIA Guo-mei. The effects of vegetation succession and land management on soil nutrient, activity and structure of microbial community in the Loess Plateau of Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [36] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Soil Research*, 2008, 45(8): 629-634.
- [37] Kallenbach C, Grandy A S. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 241-252.
- [38] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils[J]. *Soil Science*, 1980, 130(4): 211-216.
- [39] Campbell C A, Biederbeck V O, Zentner R P, et al. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin black chernozem[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 363-376.
- [40] Jenkinson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—IV. The decomposition of fumigated organisms in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 203-208.
- [41] Nemergut D R, Costello E K, Meyer A F, et al. Structure and function of alpine and arctic soil microbial communities[J]. *Research in Microbiology*, 2005, 156(7): 775-784.
- [42] Zhang Q, Dijkstra F A, Liu X, et al. Effects of biochar on soil microbial biomass after four years of consecutive application in the North China Plain[J]. *PloS One*, 2014, 9(7): e102062.
- [43] Kaiser E A, Martens R, Heinemeyer O. Temporal changes in soil microbial biomass carbon in an arable soil: Consequences for soil sampling[J]. *Plant and Soil*, 1995, 170(2): 287-295.
- [44] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. *Nature*, 1989, 338(6215): 499-500.
- [45] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil[J]. *Biological Reviews*, 1992, 67(3): 321-358.
- [46] 李世清, 任书杰, 李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 18-23.
- LI Shi-qing, REN Shu-jie, LI Sheng-xiu. Seasonal change of soil microbial biomass and the relationship between soil microbial biomass and soil moisture and temperature[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 18-23.
- [47] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395-419.
- [48] Russell J E. Soil conditions and plants growth[M]. Daya Books, 2002: 269-322.