

生物炭对夏玉米生长和产量的影响

张 娜, 李 佳, 刘学欢, 刘 杨, 王永平, 梁海燕, 廖允成*

(西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过大田试验,在夏玉米(*Zea mays* L.)主要生育时期测定叶片叶绿素含量、净光合速率、叶面积指数(LAI)、干物质重等指标,在成熟期测定产量,分析生物炭不同施用量[0(CK)、1000 kg·hm⁻²(T1)、5000 kg·hm⁻²(T2)、10 000 kg·hm⁻²(T3)]对夏玉米生长和产量的影响。结果表明,不同量的生物炭施用均能显著提高夏玉米产量,其中 T1 增产幅度最大,达 8.8%;产量构成因素表现为穗粒数 T3 显著高于 T1 和 CK,百粒重 T1 显著高于 T3 和 CK。生物炭显著影响 LAI、叶片净光合速率、叶绿素含量、干物质积累等指标, T2、T3 处理能显著增加夏玉米地上部干物质重,在各生育时期分别高于对照 9.2%~20.5%和 11.5%~36.7%;在生长前期表现为高生物炭施用量更有利于叶面积指数的增加和光合速率的提高,但生长后期,较低量的生物炭施用更有利于叶片的持绿和光合作用的持续,而较高量的生物炭施用下生育后期植株有早衰迹象,从收获指数来看, T1 收获指数达 57.4%, 分别显著高于 T2、T3 和 CK 8.3%、13.2%和 6.5%,这表明低施用量生物炭更有利于夏玉米光合产物向籽粒的转运。综合来看,生物炭施用有利于夏玉米的干物质积累,尤其是较低的生物炭施用量更有利于后期叶片光合性能的维持和籽粒产量的提高。

关键词:生物炭;夏玉米;产量;干物质重;收获指数

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1569-06 doi:10.11654/jaes.2014.08.015

Effects of Biochar on Growth and Yield of Summer Maize

ZHANG Na, LI Jia, LIU Xue-huan, LIU Yang, WANG Yong-ping, LIANG Hai-yan, LIAO Yun-cheng*

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Biochar has capacity to increase soil organic carbon content, retain soil nutrients and hold soil water, thus enhancing plant growth and yield. In the present study, a field experiment with four biochar rates was conducted to investigate the effects of biochar on the growth and yield of summer maize: 1000 kg·hm⁻²(T1), 5000 kg·hm⁻²(T2), 10 000 kg·hm⁻²(T3) and control(CK, no biochar). The SPAD(Soil and Plant Analyzer Development) values, leaf area index(LAI), chlorophyll content and net photosynthetic rate of leaves, dry biomass were measured at seeding stage, elongation stage, tasseling stage and filling stage. Grain yield was measured after harvest. Biochar application significantly improved the yield of summer maize, with the highest grain yield observed in the T1 treatment, whose yield was 8.8% higher than that of CK. However, kernels per spike were significantly higher in T3 than in both T1 and CK. Biochar supply increased dry biomass of maize in T2 and T3 treatments by 9.2%~20.5% and 11.5%~36.7%, respectively, relative to CK. At the early growth stage, higher rates of biochar notably increased LAI and leaf net photosynthetic rates, whereas at the later growth stage biochar application at lower rates was favorable to sustain the LAI and net photosynthetic rates, and higher biochar resulted in early senescence. The harvest index was 57.4% in the T1, which was 8.3%, 13.2%, and 6.5% higher than that of T2, T3 and CK, respectively. These results show that low amount of biochar enhances the transfer of photosynthetic product to and accumulation in grains of summer maize.

Keywords: biochar; summer maize; grain yield; dry biomass; harvest index

收稿日期:2014-01-17

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题(2013BAD20B03);国家自然科学基金项目(31071375);高等学校学科创新引智计划资助(B12007);大学生科学创新实验项目(201210712002)

作者简介:张 娜(1988—),女,在读硕士,研究方向为作物高效栽培。E-mail:zhangna200709@163.com

*通信作者:廖允成 E-mail:yunchengliao@163.com

陕西关中平原是我国重要的粮食产区,夏玉米(*Zea mays* L.)是该地区主要的粮食作物,为了维持较高的产量,当地夏玉米种植过程中化肥用量大,利用施肥维持地力。虽然化肥施用能显著提高产量,但长期过多的施用化肥不仅会使肥料利用率低,还会给生态环境造成危害。因而,探究能可持续维持地力,又减轻环境压力的技术方法十分重要。生物炭作为一种新型的土壤改良剂,近年来备受关注。生物炭(Biochar)一般是指生物质如木材、农作物废弃物等在完全或部分缺氧和相对温度“较低”($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下热裂解而形成的固态产物^[1]。高度的羧酸酯化和芳香化结构,使生物炭表现出高度的非生物和生物惰性^[2-3],施入土壤后可产生20%的“碳负性”,从而实现碳的减排^[4-6],并提高土壤有机碳含量^[1,7];较大的孔隙度和比表面积,可增加土壤通气性和持水量,保持土壤养分离子^[8-10],还可为菌根和微生物提供良好的生存和繁殖环境^[11],维持土壤生态系统的养分循环;此外,生物炭表面大量的负电荷使其具有较高的阳离子交换量,能提高土壤对养分的吸附利用^[12-13]。基于以上多方面的原因,生物炭对于耕地固碳、培肥具有重要意义。

近年来,关于生物炭对作物生长和产量的影响,一些学者做了相关研究。有研究发现,生物炭对作物生长或产量的影响与生物炭的种类有关,例如含高挥发性物质的生物炭大多会抑制作物生长^[14],也有研究指出,在相同的环境条件下,同一种生物炭施用于不同作物,对产量的影响不同^[15]。还有一些研究发现,生物炭对作物生长或产量的影响与土壤类型有关。唐光木等^[16]在新疆灰漠土上的研究表明,作物产量随生物炭施用量的增加而增加,但 Uzoma 等^[17]将生物炭应用在种植于沙质土壤的玉米中,结果 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的产量高于 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理。还有研究表明,生物炭与肥料混合施用较单施生物炭显著提高肥料利用率,从而改善玉米产量性状、提高玉米产量^[18]。Liu 等^[19]分析发现生物炭的作用在不同土壤、作物以及不同生物炭种类之间变异很大,而且关于生物炭的作用机制目前还不清楚。Jeffery 等^[20]也指出,因为试验条件和设计不同,目前关于生物炭对作物影响方面的结论存在不一致性。因此,关于生物炭对作物生长和产量的影响还需要开展进一步的研究。而且,有关生物炭的研究目前大部分还停留在盆栽试验,需开展更多的大田长期定位试验。本研究以关中地区大田栽培玉米为研究对象,田间施用不同量生物炭,测定玉米关键生育期植株叶绿素含量、叶片净光合速率、群体叶面积指数、

地上部干物质重及产量,分析不同量生物炭对关中夏玉米生长发育和产量形成的影响,试图了解生物炭对作物的影响,同时探明本地区适宜的生物炭农田施用量,为生物炭在农业生产中的有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2013年在陕西省杨凌示范区标本区($108^{\circ}24'\text{E}$, $34^{\circ}20'\text{N}$, 海拔 521 m)进行。该地区属暖温带季风性气候,年均日照时数 2196 h ,年均气温 $11\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 210 d ,年均降雨量 $500\sim 700\text{ mm}$ 。试验区土壤属壤土(Cumulic anthrosol),含粘粒 36.5% ,粉粒 61.1% ,砂粒 2.4% ,耕层($0\sim 30\text{ cm}$)土壤含有机质 $14.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $51.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $150.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值 7.58 。试验用生物炭由河南三利新能源公司采用小麦秸秆为原料 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 厌氧热解制备得到,其基本理化性质为有机碳 $467.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $5.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾含量 $26.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,钙含量 $10.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N 为 79.10 ,灰分含量 20.8% ,pH 值 10.40 。

试验设4个处理,生物炭施用量 $1000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T1)、 $5000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T2)、 $10\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T3)、对照不施生物炭(CK)。采用随机区组设计,每一处理重复3次,小区面积 $5\text{ m}\times 4\text{ m}=20\text{ m}^2$ 。试验供试玉米品种为郑单958,播种量每公顷 $60\ 000$ 株,基肥每公顷施用 187.5 kg 尿素 $[\omega(\text{N})=46\%]$ 和 375 kg 磷酸二胺 $[\omega(\text{P}_2\text{O}_5)=46\%]$,拔节期每公顷追施尿素 112.5 kg 。其他管理同当地常规管理方式,处理间一致。玉米于2013年6月9日播种,2013年9月25日收获,生长时间 108 d 。

1.2 测定项目与方法

分别在苗期(6月25日)、拔节期(7月19日)、抽雄期(8月4日)、灌浆期(8月22日)、蜡熟期(9月10日)和成熟期(9月25日)测定群体叶面积指数、叶绿素含量(以SPAD值表示)、叶片净光合速率(Pn)、地上部干物质重等指标,成熟期考种测产。

1.2.1 叶片 SPAD 值和净光合速率

于玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和蜡熟期(此期仅测叶绿素)利用 LI-6400 便携式光合系统分析仪和 SPAD-502 型叶绿素计,于晴天的 $9:00\sim 11:00$ 每小区选取3株(叶绿素测定10株)生长均匀一致的植株,开花前测定最上部展开叶,抽雄后测定穗位叶的SPAD值和叶片净光合速率。

1.2.2 叶面积指数(LAI)

在玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和蜡熟期每小区分别选取 5 株代表性植株,采用长宽系数法测量单株绿叶面积,单叶叶面积=长×宽×0.75, LAI=单株叶面积×单位土地面积内株数÷单位土地面积。

1.2.3 地上部干物质质量与产量

分别在苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期每小区选取生长均匀一致的植株 5 株,将其地上部分茎叶和籽粒分别在 105 ℃下杀青 30 min 后于烘箱中 80 ℃烘干至恒重,测定植株地上部分干物质质量。玉米成熟期每小区随机选取 2 行全部收获测产,并选取具有代表性的 10 株果穗,待风干后考种。

1.3 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 整理数据及 Origin 8.0 绘制图表, DPS 7.05 软件对数据进行单因素方差分析和 LSD 显著性检验,显著水平为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 对夏玉米产量的影响

由表 1 可知,与 CK 相比,不同用量生物炭的施用均显著提高夏玉米产量。其中 T1 增产效果最大,较 CK 增长 8.8%, T2、T3 分别较 CK 增产 7.7%和 7.1%,但 T1、T2、T3 间差异性不显著。

此外,生物炭处理对产量构成因素也有不同程度的影响,其中,穗粒数表现为 T3 比 T1 和 CK 分别显著高 6.6 %和 8.1%, T1 和 CK 间无显著差异性,说明高量的生物炭施用(T3)有利于夏玉米穗粒数的发育,而低量的生物炭施用(T1)对穗粒数无明显促进作用。百粒重表现为 T1 比 T3 和 CK 分别显著高 8.4%和 7.3%, T3 与 CK 间无显著差异性,说明一定量的生物炭施用(T1)有利于增加库容,过高施用(T3)反而不

表 1 生物炭施用量对夏玉米产量及产量构成因素的影响

Table 1 Effects of biochar rates on yield and its components of summer maize

处理	穗粒数	百粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
T1	553.1±9.3bc	32.3±0.6a	10 708.5±166.5a
T2	569.6±8.8ab	30.6±0.6ab	10 599.3±198.3a
T3	590.6±13.8a	29.8±1.1b	10 534.5±185.3a
CK	545.4±12.6c	30.1±0.4b	9 839.7±242.7b

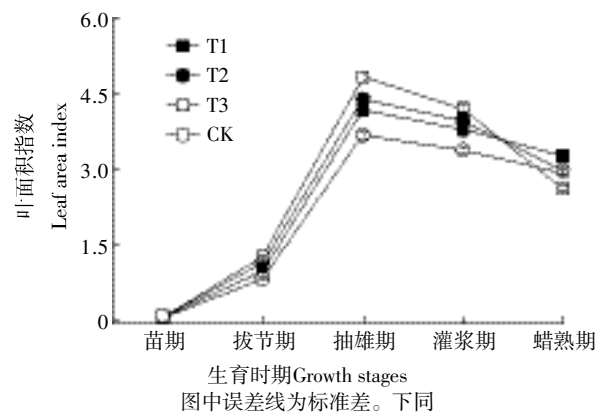
注:表中数据为平均值±标准差,同一列内不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Data are mean±standard error. Different letters within a column indicate significant difference($P<0.05$). The same below.

利于籽粒库的充实。

2.2 对夏玉米群体叶面积指数和地上部干物质重的影响

各处理 LAI 均随生育期的推进呈单峰曲线变化,在抽雄期达最大值,之后逐步下降(图 1)。具体表现为,在苗期,处理 T1、T2、T3 间无显著差异性,但分别显著高于 CK 7.2%、7.5%、11.1%。在拔节期, T3 和 T2 处理 LAI 分别比 T1、CK 显著高 27.1%、51.9%和 16.7%、39.5%, T1 比 CK 显著高 19.6%, T3、T2 间差异不显著。抽雄期和灌浆期 T1、T2、T3 比 CK 分别高 13.5%、19.3%、31.5%和 12.4%、17.3%、24.3%, 但抽雄期 T3 比 T1、T2 显著高 15.9%、10.2%, 而灌浆期 T3、T2、T1 间无显著差异性。至蜡熟期, T1 处理 LAI 最大,而 T3 处理的 LAI 则为所有处理中最小,比 T1、T2、CK 分别显著低 25.1%、12.3%、10.6%。



Error bars mean standard deviation of data. The same below

图 1 生物炭施用量对夏玉米群体叶面积指数的影响

Figure 1 Effects of biochar rates on LAI of summer maize

在夏玉米的各个生育时期,夏玉米地上部干物质重均表现为 T3 最大,CK 最小(图 2)。由此可见,生物炭施用有利于地上部分干物质的积累。从不同施用量的总体影响来看,各生育时期 T1 的地上部干物质重与 CK 间未达到显著差异,苗期 T3 显著高于 CK 22.0%, T2 与 CK 间无显著差异性,拔节期至成熟期 T3、T2 均显著增加夏玉米地上部干物质重,分别高于对照 9.2%~20.5%和 11.5%~36.7%。

2.3 对夏玉米叶绿素含量和光合速率的影响

图 3 表明,从苗期至抽雄期,随着植株的生长,各处理下叶片 SPAD 值均有所增加,其中 T3 增长幅度最大,达 38.5%, T1、T2 和 CK 依次增长 35.4%、38.2%、32.7%。具体表现为:在苗期,各处理间差异性不显著;在拔节期 T3 显著高于 CK 5.0%, T1、T2、T3 间无显著

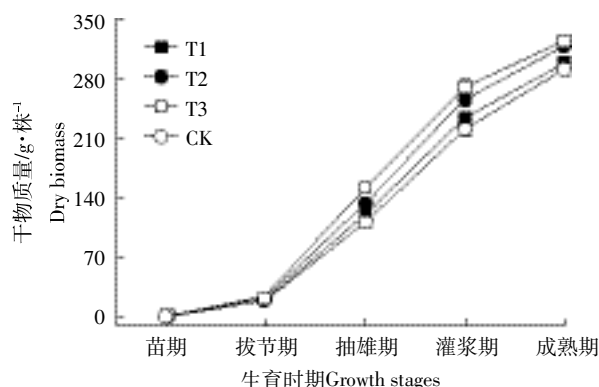
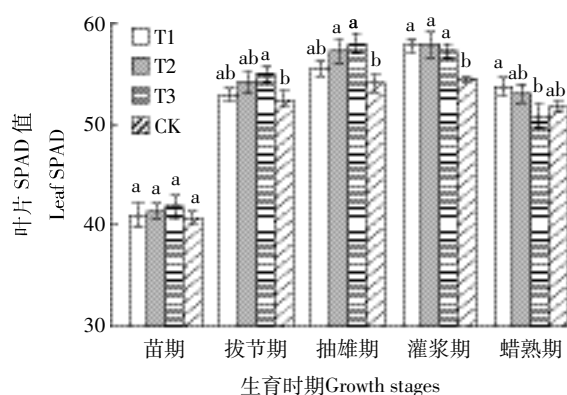


图2 生物炭施用量对夏玉米地上部干物质重的影响

Figure 2 Effect of biochar rates on dry biomass of summer maize



同一生育时期不同处理标以不同字母的值在 $P=0.05$ 水平上差异显著。下同

Values for the different treatments at each growth stage followed by different letters are significantly different at $P=0.05$. The same below

图3 生物炭施用量对夏玉米叶片叶绿素含量的影响

Figure 3 Effect of biochar rates on chlorophyll content in leaves of summer maize

差异；在抽雄期，T3、T2 显著高于 CK 7.2%和 5.9%，T1、T2、T3 间无显著差异，此期，T3 处理的 SPAD 值达到最大值。灌浆期之后，由于植株的衰老，各处理的 SPAD 值均有所降低，T3 的 SPAD 值下降幅度最大。至蜡熟期 T3 的 SPAD 值较灌浆期下降 11.2%，T1、T2 和 CK 分别下降 6.9%、8.3% 和 4.9%，此期，T1 的 SPAD 值为所有处理中最大，并显著高于 T3 5.7%。以上结果表明，在玉米生长前期，较高量的生物炭施用更能促进叶片叶绿素含量的增加，但在生长后期，较低量的生物炭施用反而有利于叶片的持绿。

图 4 表明，施用生物炭处理均提高了夏玉米植株净光合速率。在苗期，各处理间无显著性差异。在拔节期，T3 显著高于 T1 和 CK 8.8%和 10.2%；在抽雄期，T3、T2、T1 分别显著高于 CK 10.3%、9.9%、8.9%，T1、T2、

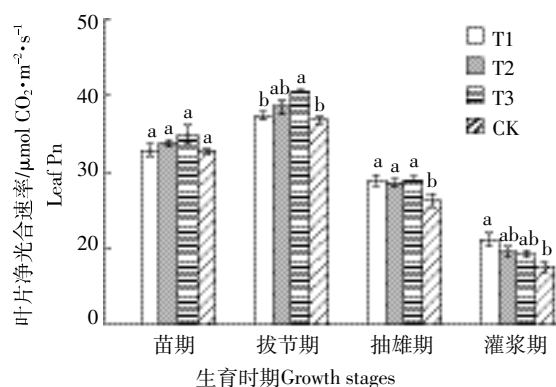


图4 生物炭施用量对夏玉米叶片净光合速率的影响

Figure 4 Effect of biochar rates on net photosynthetic rate in leaves of summer maize

T3 间无显著性差异性。至灌浆期，生物炭施用量最小的 T1 叶片净光合速率在所有处理中最大，显著高于 CK 20.7%，T2、T3 与 CK 间无显著性差异。以上结果表明，在玉米生长前期，高量的生物炭施用更有利于光合作用的提高，但后期，较低量的生物炭施用更有利于维持较强的光合作用，随着施用量的增加，光合作用下降。

2.4 对夏玉米收获指数的影响

收获指数既与地上部干物质的积累量有关，也与干物质向籽粒的分配有关。由表 2 可知，在成熟期，T1 的地上部干物质质量虽低于 T2、T3，但籽粒产量高，收获指数达到 57.4%，较 T2、T3、CK 分别显著提高 8.3%、13.2%、6.5%，说明生物炭低施用量较高施用量更有利于夏玉米光合产物向籽粒的转运。

表 2 不同生物炭施用量下夏玉米收获指数

Table 2 Grain harvest index of summer maize under different biochar rates

处理	地上部干物质重/kg·hm ⁻²	籽粒重/kg·hm ⁻²	收获指数/%
T1	17 877.6ab	10 267.2a	57.4a
T2	19 041.6a	10 104.6a	53.0bc
T3	19 433.4a	9 818.4ab	50.7c
CK	17 134.8b	9 242.4c	53.9b

3 讨论

本研究结果显示，生物炭的施用能显著提高夏玉米产量，这与 Uzoma 等^[17]和 Major 等^[21]研究结论一致。在日本鸟取大学旱地研究中心的温室中，Uzoma 等通过将牛粪制备的生物炭添加入沙质土中，发现生物炭的添加对玉米产量有促进作用，且随着添加比例的增加，产量明显提高。与此不同，Major 等采用木材制备

生物炭在哥伦比亚热带草原上进行的田间试验表明,添加生物炭当年玉米产量较对照无显著差异,但是从第二年开始产量显著增加。这些试验在不同的气候、土壤环境中进行且使用不同材料的生物炭,但产量均表现为增加,可能是因为生物炭的施用增加了土壤中有益菌群数量,增强了土壤生态系统功能,为作物根系提供良好的生长环境^[11,22-23];也可能是因为生物炭改善了土壤理化性状,特别是提高了土壤有效养分含量,从而促进了作物生长^[24-25];或者生物炭的施用降低了有毒离子对植物的毒害作用^[22,26]。但本研究发现,生物炭施用 $1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可显著提高产量,当施用量增大到 $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米产量并未随生物炭施用量的增加而增加,这与唐光木等^[16]的研究结论不尽相同,这可能是由于在本试验条件下,生物炭的施用显著提高了土壤有机质含量,进而提高了土壤肥力,但是高施用量的生物炭对土壤肥力的提升已经达到或超过了作物养分吸收的高限,所以与较低生物炭施用量相比,高生物炭施用对作物生长发育无显著影响,甚至由于作物前期生长过旺不利于高产群体的形成。此外,前人研究表明,禾谷类作物的穗粒数决定于抽穗开花、受精结实过程,而粒重决定时期是受精结实、籽粒发育成熟期^[27],本研究 T3 处理穗粒数较对照显著增加,而百粒重与对照间无显著差异性,可能是因为在生长前期 T3 处理较多的生物炭促进了玉米的生长,形成了较多的穗粒数,而在籽粒成熟期 T3 处理的玉米下部叶片早衰使得有效叶面积持续时间短、光合产物积累不足。前人大量研究表明,生物炭对产量的影响不仅与生物炭用量有关,还与土壤质地、生物炭类型、作物种类、以及是否施用底肥等有关关系,这种复杂的交互作用会使得试验结果不尽相同,因此,关于本试验结论的具体原因还有待进一步研究。

玉米库的充实与叶片光合积累和干物质转运密切相关。叶片是玉米光合作用最主要的器官,叶面积的大小和叶绿素含量直接影响干物质积累和产量^[27]。本研究显示,生物炭的施用对玉米生长前期 LAI 增大有一定的促进作用,不同施用量对 LAI 的促进程度依次为 $T3>T2>T1$,但从抽雄以后,较低量的生物炭施用处理(T1)绿叶面积维持时间较其他处理长,比 T2、T3 下降缓慢,而 T3 处理 LAI 快速下降,至蜡熟期为所有处理中最小。叶片叶绿素含量和光合作用也表现出相同的趋势,即在抽雄前,高生物炭施用更有利于叶绿素含量的增加和光合速率的提高,但灌浆后会随生物炭施用量的增大呈下降趋势。这表明,在生长发育

前期,高生物炭施用量(T3)处理促进了玉米光合作用,但是在生长发育期尤其是抽雄后,高生物炭施用量(T3)处理叶片呈现出明显的早衰迹象,使得高生物炭施用量的大库潜力无法充分发挥。

本课题组前期研究表明,生物炭的施用能够显著提高土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量^[28]。关于高量生物炭施用造成后期玉米早衰的原因,笔者推测可能是较高的生物炭施用量使得土壤养分含量显著提高,从而造成玉米前期生长过旺、群体过大,使得上部叶片间彼此遮阴严重,抑制了包括穗三叶在内的中下部叶片生长发育,造成玉米植株早衰、光合产物反而积累少,最终导致了玉米籽粒灌浆差、粒重低。崔海岩等^[29]研究发现,遮阴后夏玉米叶片的光合速率叶绿体色素含量显著降低。史建国等^[30]研究发现,花粒期遮阴通过降低夏玉米的干物质积累量、籽粒最大灌浆速率,显著降低了夏玉米产量。张吉旺等^[31]也发现花粒期遮阴会造成夏玉米叶片早衰、枯死,成熟期提前,而且会显著降低千粒重和产量。由于本试验只是就玉米的生长进行了研究,要清楚地说明产生以上结论的原因,还需要更深入的研究。

4 结论

生物炭的施用有利于提高夏玉米生育期尤其是前中期叶片叶面积指数、叶绿素含量以及净光合速率,进而提高干物质积累以及玉米穗粒数。生物炭高施用量会造成玉米早衰,与低施用量生物炭相比不利于玉米粒重的形成,生产上要根据具体的土壤及气候条件选择适宜的生物炭施用量。

参考文献:

- [1] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*, 2006, 11(2):403-427.
- [2] 潘根兴,周萍,李恋卿,等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2):327-337.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing, et al. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2):327-337.
- [3] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7):577-585.
- [4] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141):143-144.
- [5] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon(charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1):190-206.

- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, 1:56.
- [7] Bruun S, El-Zahery T, Jensen L. Carbon sequestration with biochar: Stability and effect on decomposition of soil organic matter [C]//Climate change: Global risks, challenges and decisions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2009.
- [8] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos; 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2009, 111(1): 81–84.
- [9] Glaser B, Lehmann J, Steiner C, et al. Potential of pyrolyzed organic matter in soil amelioration[C]//People's Republic of China Ministry of Water Resources. 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Ministry of Water Resources, 2002.
- [10] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [11] Steiner C, Das K C, Garcia M, et al. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferral soil[J]. *Pedobiologia*, 2008, 51(5): 359–366.
- [12] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477–1488.
- [13] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [14] Zakaria M, Solaiman, Daniel V, et al. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2): 273–287.
- [15] Baronti S, Alberti G, Genesio L, et al. The Italian Biochar Initiative: Effects on soil fertility and on crops production[C]//2nd International Biochar Conference-IBI. Newcastle: 2008.
- [16] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1797–1802.
TANG Guang-mu, GE Chun-hui, XU Wan-li, et al. Effect of applying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1797–1802.
- [17] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205–212.
- [18] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. 2007. 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*, 291(1–2): 275–290.
- [19] Liu X, Zhang A, Ji C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1–2): 583–594.
- [20] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175–187.
- [21] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2): 117–128.
- [22] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multielement polluted soil[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2282–2287.
- [23] 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 *malus hupehensis rehd* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18): 3850–3856.
- [24] Wang H L, Lin K D, Hou Z N, et al. Sorption of the herbicide terbutylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(2): 283–289.
- [25] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324–3333.
- [26] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2501–2510.
- [27] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
CAO Wei-xing. Crop cultivation science in general[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [28] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009–1015.
ZENG Ai, LIAO Yun-cheng, ZHANG Jun-li, et al. Effect of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient in manural loessial soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1009–1015.
- [29] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 等. 大田遮阴对夏玉米光合特性和叶黄素循环的影响[J]. 作物学报, 2013(3): 478–485.
CUI Hai-Yan, JIN Li-Bin, LI Bo, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and xanthophyll cycle of summer maize in the field[J]. *The Crop Journal*, 2013(3): 478–485.
- [30] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427–4434.
SHI Jian-guo, CUI Hai-yan, ZHAO Bin, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21): 4427–4434.
- [31] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 遮荫对夏玉米产量及生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 657–662.
ZHANG Ji-wang, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Effects of shading on the growth, development and grain yield of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 657–662.