

丁俊男, 于少鹏, 李 鑫, 等. 生物炭对大豆生理指标和农艺性状的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 784-789.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.04.005

生物炭对大豆生理指标和农艺性状的影响

丁俊男¹, 于少鹏¹, 李 鑫², 来永才³

(1. 哈尔滨学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 东北农业大学, 黑龙江 哈尔滨 150036; 3. 黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 以大豆为材料采用盆栽试验, 研究了大豆各生育期生物量和苗期叶绿素含量、初花期光合生理特性和成熟期农艺性状等指标对生物炭施用的响应。结果表明: 施用生物炭处理提高了大豆各生育期的株高, 有助于大豆收获期植株各部位生物量的积累; 生物炭施用后大豆叶片叶绿素 a 含量明显高于不施用生物炭对照, 叶绿素 b 含量增加不明显, 叶绿素 a+b 含量随着生物炭施用量的增加呈现逐渐上升的趋势, 叶绿素 a/b 比值的变化不明显; 生物炭处理维持了大豆较高的光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s), 说明生物炭的施用有利于提高大豆光合作用强度; 较高施用量生物炭显著增加了单株荚数、单株粒数、单株粒质量和百粒质量, 提高大豆产量。

关键词: 生物炭; 大豆; 叶绿素; 光合生理; 农艺性状

中图分类号: S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)04-0784-06

Effects of biochar application on soybean physiological indices and agronomic traits

DING Jun-nan¹, YU Shao-peng¹, LI Xin², LAI Yong-cai³

(1. Harbin University, Harbin 150086, China; 2. Northeast Agricultural University, Harbin 150036, China; 3. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: The effects of biochar application on biomass, chlorophyll content in seedling stage, photosynthetic physiological characteristics in early flowering stage and agronomic characters in mature stage were studied by applying the biochar in pot soybean. The results showed that the plant height of soybean during each growth period was increased by applying the biochar, and the application of the biochar contributed to the accumulation of biomass in all parts of soybean plant at harvest stage. The chlorophyll a content of soybean leaves treated with biochar was higher than that in the control, but the content of chlorophyll b did not increase significantly. The content of chlorophyll a+b gradually increased with the increase of biochar application rate. The change of chlorophyll a/b was not obvious. Biochar treatment maintained high photosynthetic rate (P_n), intercellular CO_2 concentration (C_i), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s), which indicated that the application of biochar was conducive to improving the intensity of photosynthesis. Biochar with higher application rate significantly increased pods per plant, seeds per plant, grain weight per plant and 100-grain weight, and increased soybean yield.

Key words: biochar; soybean; chlorophyll; photosynthetic physiology; agronomic trait

收稿日期: 2018-11-02

基金项目: 哈尔滨学院青年博士科研启动基金项目 (HDF2018102); 国家自然科学基金项目 (41701289)

作者简介: 丁俊男 (1982-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 讲师, 主要从事植物生理生化研究, (E-mail) ding.junnan@163.com

通讯作者: 于少鹏, (E-mail) 446334151@qq.com

生物炭 (Biochar) 通常是指在缺氧条件下将农林废弃物等生物质材料热裂解而形成的稳定的富含芳香烃和单质碳或具有类石墨结构的碳产物, 具有理化性质稳定、抗分解能力较强等特点^[1-2]。生物炭的研究与使用主要集中在农业领域^[3], 围绕土壤、

作物、环境系统互作等方面^[4-5],初步证实生物炭在改善土壤结构与理化性质^[6],提高作物产量,治理环境污染以及增加“农业碳汇”^[7],减少温室气体排放等方面具有重要作用^[8]。中国北方是粮食的主产区,每年大量农业废弃物未得到有效处理和利用,因此将秸秆等农业废弃物合理加工后应用到农业生产上,既可以提高农作物产量,又可以改善土壤生产力,减少农业污染^[9-10]。

植物生长发育有赖于良好的土壤环境,但在自然界中土壤往往存在着各种障碍因素,限制着植物生长^[11]。根据不同土壤的主要障碍因子,选择合适的生物炭对土壤进行改性,能够提高土壤养分的有效性,增加植物吸收养分的效率^[12]。东北地区是中国粮食主要产区之一,拥有广泛的农业生物质资源,且具有面积大、耕地相对集中、生物质易于收集等显著特点。而目前,在东北地区乃至全国生物质资源利用率还相对较低,特别是耕地生产力持续下降成为制约农业生产发展的“瓶颈”问题。因此,在东北气候环境与土壤条件下,开展生物炭在作物生产上的应用研究,对促进耕地可持续发展,提高作物生产能力等都具有重要的科学价值和现实意义。本试验采用盆栽试验研究生物炭对大豆生育期内生理指标、光合特性和产量的影响,旨在为北方大豆高产措施提供技术参考,同时也为中国东北部大豆主产区提高农业资源利用效率和减少农业废弃物污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年5月在黑龙江省农业科学院现代农业示范园区盆栽场进行,环境平均温度为22.7℃,相对湿度为60%。土壤采集于黑龙江省农业科学院现代农业示范园区。供试土壤为典型的黑土类型,pH 6.52,全氮(T-N)含量1.6 g/kg,碱解氮(A-N)含量159 mg/kg,有效磷(A-P)含量29.3 g/kg,速效钾(A-K)含量219.0 g/kg,有机质(OM)含量21.2 g/kg。

供试生物炭是将秸秆、花生壳等农林废弃生物质在亚高温和缺氧条件下热解得到的稳定的富碳产物。购于辽宁金和福农业科技有限公司,pH 8.69,总养分 $\geq 34\%$,N:P₂O₅:K₂O=8:11:15。

供试大豆:所选品种为绥农35,无限结荚习性,由黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所大豆研究室提供。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,选取高与直径均为30 cm的聚丙烯塑料盆,将生物炭与风干黑土充分混合后装入盆中。设4个处理:处理1(CK),不添加生物炭;处理2(T1),每1 kg黑土添加生物炭10 g,折合每盆添加生物炭75 g;处理3(T2),每1 kg黑土添加生物炭20 g,折合每盆添加生物炭150 g;处理4(T3),每1 kg黑土添加生物炭40 g,折合每盆添加生物炭300 g。将成熟饱满、大小相对一致的大豆种子均匀播种到含有不同用量生物炭的盆中,每盆播种6粒大豆种子,每个处理3次重复。每盆均施氮肥(尿素,300 kg/hm²)、磷肥(磷酸二铵,225 kg/hm²)、钾肥(氯化钾,150 kg/hm²),定期浇水,病虫害管理按常规进行。

1.3 大豆生物量和叶绿素含量的测定

将大豆幼苗培养基质连同盆一起浸泡在水中,待基质松软后将大豆幼苗从培养基质中小心拔出,洗净根系后测定根系长度和地上部株高。将植株地上部和地下部分别放在铝盒内杀青(105℃,30 min),烘干(60℃,30 h)至恒质量后,称量单株地上部生物量、地下部生物量和总生物量。大豆幼苗叶片叶绿素a(Chl.a)和叶绿素b(Chl.b)含量按照乙醇浸泡提取法测定,计算总叶绿素含量(Chl.a+Chl.b)和叶绿素a/b比值(Chl.a/b),重复3次。

1.4 大豆光合生理特性的测定

大豆初花期时,用美国Licor-6400便携式光合测定仪测定光合生理指数,LED红蓝光源,叶室内温度保持在25℃,固定光照度为1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。于天气晴好时上午9:00-11:00测定植株顶部第4完全展开叶片的主要光合生理指标:光合速率(P_n)、胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s),每盆选择长势一致的3株大豆植株进行测定。

1.5 大豆产量的测定

于大豆成熟期(2017年9月30日),将植株整株拔出后标记编号,带回室内进行农艺性状考种测定。

1.6 数据统计

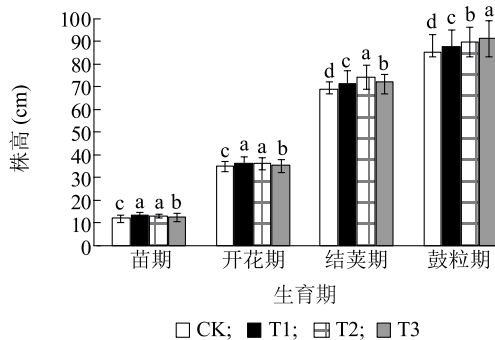
采用Office 2007 Excel和SPSS 16软件对数据进行统计分析,并采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对大豆生长的影响

施用生物炭对大豆不同生育时期植株株高的影

响如图 1 所示。大豆苗期株高各生物炭处理均高于对照;大豆开花期各处理与对照相比变化趋势与苗期相同,生物炭处理大豆株高均高于对照;大豆结荚期株高表现为 $T_2>T_3>T_1>CK$, T_2 、 T_3 和 T_1 处理分别比对照增加了 7.23%、4.48% 和 3.17%。从结果可知,适宜的生物炭施用对大豆的生长有一定的促进作用,鼓粒期大豆株高随着生物炭施用量的增加而增加。从全生育期来看,施用生物炭处理的株高均高于对照,同时生育前期适宜的生物炭施用能提高大豆生长,各施用生物炭处理间均无明显差异。



CK:不添加生物炭; T1:每 1 kg 黑土添加生物炭 10 g; T2:每 1 kg 黑土添加生物炭 20 g; T3:每 1 kg 黑土添加生物炭 40 g。同一生育时期不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

图 1 生物炭对不同生育时期大豆株高的影响

Fig.1 Effect of biochar on soybean plant height in different growth stage

2.2 施用生物炭对大豆生物量的影响

生物炭对大豆收获期植株茎、根、叶和荚生物量均有影响(表 1)。各施生物炭处理组茎、根、叶和荚鲜质量和干质量均大于对照,除根部外其余各组织质量均随着施生物炭量的增加而增加。根部鲜质量

表 1 生物炭对大豆植株生物量的影响

Table 1 Effects of biochar on plant biomass of soybean

处理	茎		根		叶		荚	
	鲜质量 (g)	干质量 (g)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	鲜质量 (g)	干质量 (g)
CK	37.95d	10.50d	15.52c	5.96d	76.71d	27.65d	50.74d	10.06c
T1	38.05c	11.62c	16.88b	6.62c	80.95c	28.37c	51.05c	11.17b
T2	40.71b	11.83b	15.53c	6.47b	84.23b	29.24b	53.59b	11.69b
T3	44.18a	13.82a	17.61a	7.51a	91.96a	30.55a	55.63a	12.72a

CK、T1~T3 见图 1 注。同一列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

2.3.2 生物炭对大豆光合特性的影响 在大豆开花期,施用生物炭处理的光合速率均高于对照(图 3)。T3 处理的平均光合速率达到 $21.92 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,高出对照 11.95%。随着生物炭量的增加光合速率也随之升高,可见施用生物炭能在开花期提高大豆的

和干质量的变化趋势表现为 $T_3>T_1>T_2>CK$ 。总体来看,施用生物炭有助于大豆植株各部位生物量的积累。

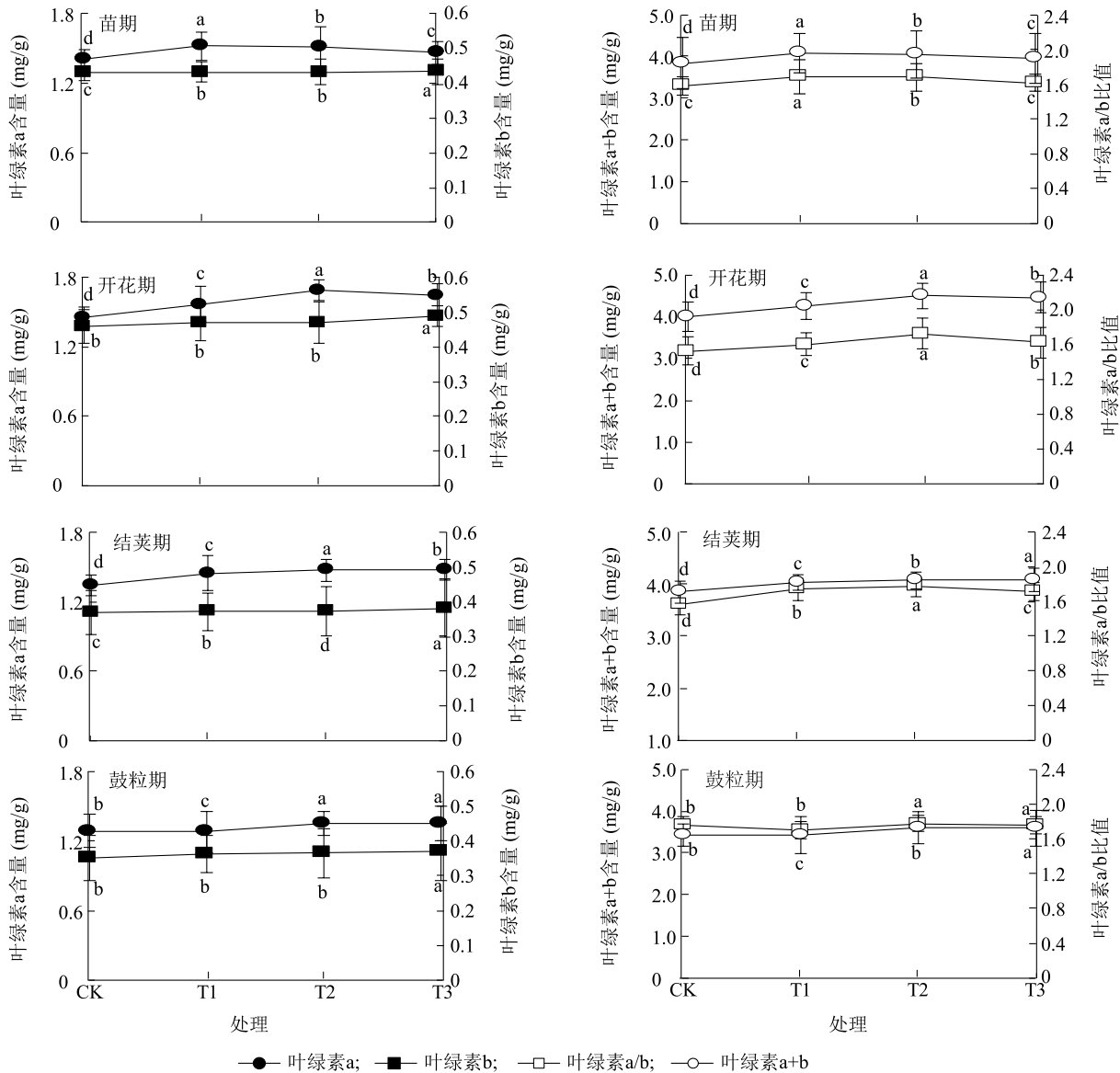
2.3 施用生物炭对大豆生理特性的影响

2.3.1 生物炭对大豆叶绿素含量的影响 营养生理指标是作物生长状况的重要内在体现。生物炭对不同时期大豆叶绿素含量的影响如图 2 所示。生物炭对大豆叶绿素 a 含量的影响比较明显,施用生物炭对大豆苗期叶绿素 a 含量的影响表现为 $T_1>T_2>T_3>CK$,叶绿素 a 含量明显高于叶绿素 b 含量,施用不同用量的生物炭对大豆苗期叶绿素 b 含量的影响不明显;叶绿素 a+b 和 a/b 的变化趋势同样表现为 $T_1>T_2>T_3>CK$ 。生物炭对大豆开花期叶绿素含量的影响较为明显,其中叶绿素 a 的变化趋势表现为 $T_3>T_2>T_1>CK$,T3 处理的叶绿素 a 含量为对照的 0.94 倍,叶绿素 b 的变化趋势表现为 $T_3>T_1>CK>T_2$ 。可见,高生物炭量有利于提高大豆开花期叶片的光合作用能力,积累更多光合作用产物。在大豆结荚期各生物炭处理的叶绿素含量较生育前期有较大幅度的下降,叶绿素 a 含量大于叶绿素 b 含量,叶绿素 b 和 a+b 的变化趋势与叶绿素 a 的相同,叶绿素 a/b 基本无变化。生物炭对大豆鼓粒期叶绿素含量的影响较为明显,叶绿素 a 的变化表现为 $T_2>T_3>T_1>CK$,叶绿素 b 的变化表现为 $T_3>T_2>T_1>CK$,叶绿素 a+b 含量随着生物炭量的增加呈现逐渐上升的趋势,在生物炭的作用下叶绿素 a/b 的变化不明显。总体来看,施用较高用量生物炭可维持大豆生育后期叶片叶绿素的含量,延缓叶片的衰败,保持叶片的光合作用能力;较低用量生物炭对叶绿素含量的影响不明显。

光合速率。不同施用量生物炭处理对大豆开花期蒸腾速率的影响整体表现为随施用量的增加而有所提高,各处理均高于对照,T3 处理的平均蒸腾速率为 $11.13 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,高出对照组 28.52%。总体来看,生物炭处理维持了较高的蒸腾速率,有利于提高

大豆光合作用强度,增加光合产物积累,促进作物生长。生物炭不同用量处理对大豆开花期胞间 CO_2 浓度的影响不明显,其中 T2 处理的胞间 CO_2 浓度最大,比 CK、T1 处理和 T3 处理分别增加了 3.39%、1.48%

和 0.96%。气孔导度变化趋势与蒸腾速率相同,随着生物炭量的增加气孔导度随之增加,T3 处理分别比 CK、T1 处理和 T2 处理增加了 18.75%、14.64% 和 8.41%。



各处理见图 1 注。不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 2 生物炭对不同生育时期大豆叶绿素含量的影响

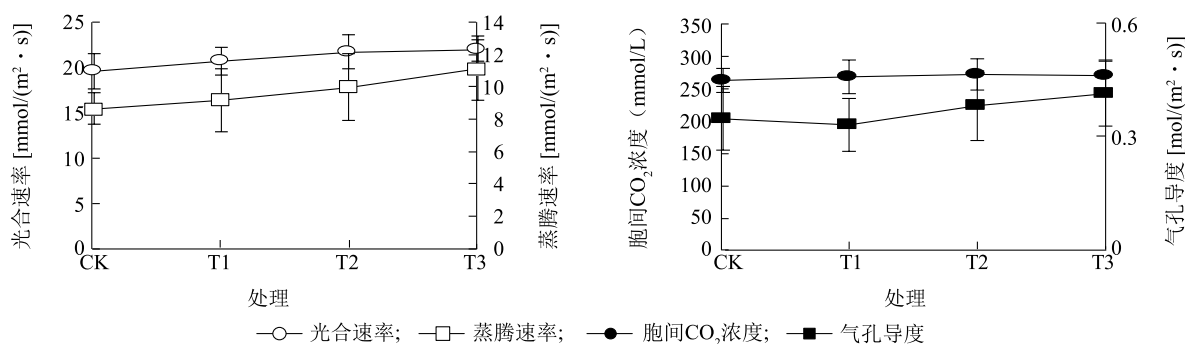
Fig.2 Effects of biochar on soybean chlorophyll content at different growth stages

2.4 施用生物炭对大豆农艺性状的影响

生物炭对大豆农艺性状的影响如表 2 所示。生物炭对各处理大豆底荚高的影响表现为 $\text{T3} > \text{T2} > \text{CK} > \text{T1}$, 但各处理间差异不明显; T2 和 T3 生物炭处理主茎节数均大于对照, 与 T1 处理差异显著; 大豆分枝数表现为 $\text{T2} > \text{T1}$ 、 $\text{T3} > \text{CK}$; 生物炭各处理大豆 4

粒、3 粒、2 粒和 1 粒荚数都高于对照; 秕荚数对照最高, T1 处理最少, 可见适当地施用生物炭可减少大豆的秕荚数。

生物炭对大豆产量构成因素的影响结果如表 3 所示。生物炭处理的单株荚数均高于对照, 表现为 $\text{T3} > \text{T2} > \text{T1} > \text{CK}$; 单株粒数也随着生物炭施用量的增



各处理见图1注。不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图3 生物炭对大豆开花期光合特性的影响

Fig.3 Effects of biochar on soybean photosynthetic characteristics in flowering stage

加而增多,其中 T2 处理的单株粒数最多(平均 153 个);T1 处理、T2 处理和 T3 处理单株粒质量分别比对照高 1.05、1.10 和 1.09 倍,平均提高 1.08 倍;百

表 2 生物炭对大豆农艺性状的影响

Table 2 Effects of biochar on the soybean agronomic traits

处理	底荚高 (cm)	主茎节数 (个)	分枝数 (个)	4 粒荚数 (个)	3 粒荚数 (个)	2 粒荚数 (个)	1 粒荚数 (个)	秕荚数 (个)
CK	18.53ab	20.67b	0.67c	9.33d	18.00d	12.00d	7.33c	8.66a
T1	17.56ab	19.00c	1.00b	11.33a	20.00c	15.00c	7.00d	4.33d
T2	19.00a	22.00a	1.33a	10.33c	22.00b	18.33a	9.00b	7.33b
T3	19.83a	22.00a	1.00b	11.00b	24.00a	16.00b	9.67a	6.33c

各处理见图1注。同一列不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。

表 3 生物炭对大豆经济产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of biochar on economic yield of soybean and its component factors

处理	单株荚数 (个)	单株粒数 (个)	单株粒质量 (g)	百粒质量 (g)	经济产量 (g)
CK	57.00c	129.33d	32.67c	22.45c	33.40d
T1	57.67c	142.33c	34.33b	23.70b	34.51c
T2	63.33b	153.00a	35.80a	25.34a	39.86b
T3	65.33a	151.00b	35.74a	25.45a	41.19a

各处理见图1注。同一列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

3 讨论

植物生长依赖良好的土壤环境,生物炭具有土壤改良剂的作用,从而促进植物的生长发育。由试验结果可知,不同施用量的生物炭处理对盆栽大豆的生理和光合特性均有不同程度的影响。生物炭促进了不同生育期大豆植株的增高,增加了茎、根、叶和荚的生物量,较高生物炭量处理对延缓植株衰老、促进干物质积累的作用相对明显。生物炭对作物生长具有一定促进作用,这与土壤微生态环境的优化密切相关。刘世杰等发现生物炭能够促进玉米苗期的生长,株高

粒质量同样随着生物炭施用量的增加而增大。由此可见,生物炭对大豆单株荚数、单株粒数、单株粒质量和百粒质量等产量因素均有促进作用。

比对照增加4.31~13.13 cm^[13]。房彬等施用生物炭增加了玉米和油菜的籽实率及茎叶等生物量^[14]。但由于作物营养特性的差异,不同作物类型对生物炭施用的反馈作用不尽相同。单施生物炭对萝卜有增产效果,对小麦和糜子产量则无显著影响^[15-16]。

叶片是大豆产量形成的重要“源”器官,叶绿素含量是衡量作物光合能力的重要指标,叶绿素含量的提高有助于光合组织更有效地捕获光能,从而提高大豆的光合利用率^[17]。生物炭的施用使各生育期内大豆叶绿素含量发生不同变化。苗期时较低用量的生物炭处理(T1)促使叶绿素 a 含量增加;开花期时较高用量的生物炭处理(T3)对叶绿素 a 含量的影响较大,但 T2 处理较 T1 处理叶绿素 a 含量略有下降;生育后期较高用量的生物炭使大豆叶绿素含量维持在较高水平,进而延缓叶片衰老,维持正常的光合利用率,延长光合时间,提高光合效率,促进大豆干物质的积累和转化。

光合特性是叶片光合能力的有效表征,对作物产量的形成至关重要^[18]。施用生物炭同样对开花期大豆光合特性产生了重要影响。生物炭使大豆光合速

率和蒸腾速率在关键生育时期保持稳定增加,光合作用与蒸腾作用的生理协同能力增强,有利于积累更多光合产物,促进作物生长。生物炭对大豆胞间 CO_2 浓度的影响不明显,气孔导度则随着生物炭用量的增加而增大。有研究结果表明适量施加生物炭可提高植物的光合能力,施入 $1\ 500\ \text{mg/kg}$ 生物炭后黄连叶片净光合速率比对照提高了 10% ,气孔导度也随着生物炭量的增大而提高,说明施用生物炭处理有助于提高作物光合固碳能力,有利于光合作用的进行^[19]。

生物炭对大豆的农艺性状和产量构成因素均表现出明显的促进作用。施用生物炭提高了大豆的底荚高、节数和分枝数,增加了 4 粒、 3 粒和 2 粒荚数,减少了秕荚数量,从而为产量的增加奠定了基础。较高施用量生物炭显著增加了单株荚数、单株粒数、单株粒质量和百粒质量,提高了大豆产量。作物产量对生物炭的响应与作物的品种有关。Iswaran 等施用 $500\ \text{kg/hm}^2$ 生物炭后,豌豆生物量增加 60% ,大豆和绿豆的产量分别增加了 50% 和 22% ^[20]。成小琳等发现稻田养鸡和施用生物炭以及养鸡配施生物炭处理均可提高双季稻的根系分蘖数、叶面积指数、有效穗数与每穗粒数,最终实现水稻产量的提高^[21]。施用生物炭有利于分蘖期与拔节期水稻生长和吸收养分,有利于水稻稳产高产^[20]。刘国玲等施用氮肥和生物炭处理使玉米产量提高 $3.7\%\sim 10.23\%$,但当生物炭用量相同、氮肥用量减半时玉米产量却降低了 6.16% ,可见合理的施用氮肥和生物炭配比可有效提高玉米的产量^[22]。

黑龙江是中国的农业大省,秸秆等农业废弃物的合理利用已成为黑龙江省现代农业发展和环境污染治理的重要目标。本试验结果表明生物炭能有效地提高大豆株高、叶绿素含量、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率和产量。

参考文献:

- [1] ANTAL M J, GRONLI M. The art, science and technology of charcoal production [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42: 1619-1640.
- [2] 季雅岚,索龙,解钰,等. 3 种豆科植物生物质炭对海南砖红壤性质及 N_2O 排放的影响 [J]. *南方农业学报*, 2017, 48 (8): 1381-1387.
- [3] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭进展与前景 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (16): 3324-3333.
- [4] BATJES N H. Mitigation of atmospheric CO_2 concentrations by increased carbon sequestration in the soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27 (3): 230-235.
- [5] 陈温福,张伟明,孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (5): 821-828.
- [6] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [7] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447: 143-144.
- [8] GOLDBERG E D. Black carbon in the environment: Properties and distribution [M]. New York: John Wiley, 1985.
- [9] 彭辉辉,刘强,荣湘民,等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米光合特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44 (7): 132-135.
- [10] 韩梦颖,王雨桐,高丽,等. 降解秸秆微生物及秸秆腐熟剂的研究进展 [J]. *南方农业学报*, 2017, 48 (6): 1024-1030.
- [11] 王光华,金剑,徐美娜,等. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 25 (5): 550-556.
- [12] 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, 26 (4): 361-365.
- [13] 刘世杰,窦森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 22 (1): 79-82.
- [14] 房彬,李心清,赵斌,等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (8): 1292-1297.
- [15] 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.
- [16] 陈心想,何绪生,耿增超,等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (20): 6534-6542.
- [17] 李瑞平,郑金玉,罗洋,等. 不同密度对利民 33 光合特性和产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2014, 22 (6): 97-101.
- [18] 杨文钰,屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [19] 吴志庄,王道金,厉月桥,等. 施用生物炭肥对黄连木生长及光合特性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24 (6): 992-997.
- [20] ISWARAN V, JAUHRI K, SEN A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1980, 12 (2): 191-192.
- [21] 成小琳,周玲红,徐华勤,等. 稻田冬季培肥对双季稻生长和土壤养分的影响 [J]. *湖南农业大学学报*, 2018, 44 (1): 1-6.
- [22] 周运来,张振华,范如芹,等. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2016, 32 (4): 786-790.
- [23] 刘国玲,王宏伟,蒋健,等. 生物炭对郑单 958 生理生化指标及产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2016, 24 (4): 105-109.

(责任编辑:张震林)