



生物质炭施用量对大豆生长及产量的影响

邓 杰^{1,2}, 王文慧¹, 赵启慧³, 蒋志慧¹, 张 纪¹, 张凯迪¹, 张有利^{1,4}

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319; 3. 北大荒集团黑龙江二龙山农场有限公司, 黑龙江 黑河 156433; 4. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要:为明确生物炭施用量对大豆生长发育及产量的影响,以大豆黑河 43 为材料,采用田间小区试验,在常规施肥中混施生物炭 27 kg·hm⁻² (B1)、54 kg·hm⁻² (B2)、81 kg·hm⁻² (B3) 及 108 kg·hm⁻² (B4) 4 个水平,对大豆地上、地下部生长量、干物质积累量及产量指标进行测定。结果表明:施入生物炭对大豆各生育时期株高、茎粗、根长、根系体积、鲜重及干物质积累量均有一定的影响作用,于对照相比增幅分别为 -27.58% ~ 13.13%、6.52% ~ 29.62%、-9.65% ~ 0.78%、17.78% ~ 68.41%、-26.84% ~ 59.79% (地上鲜重)、1.43% ~ 62.88% (地下鲜重)、9.09% ~ 51.49% (地上干重)、-14.07% ~ 62.26% (地下干重)。鼓粒期和成熟期各生物炭处理大豆株高显著提高。各生物炭处理大豆茎粗均增加。B3 处理大豆地上鲜重、干重、地下鲜重、干重以及根长增幅最大。生物炭通过使大豆单株荚数、单株有效荚数、单株粒重及百粒重提高来使单株产量提高,继而使总产量提高,产量增幅为 1.57% ~ 7.74%。总体来看常规施肥混施生物炭 81 kg·hm⁻² (B3 处理) 对大豆生长及产量促进效果最佳。

关键词:生物炭;大豆;生长;生育时期;增产

Effects of Biochar Application Amount on Soybean Growth and Yield

DENG Jie^{1,2}, WANG Wen-hui¹, ZHAO Qi-hui³, JIANG Zhi-hui¹, ZHANG Ji¹, ZHANG Kai-di¹, ZHANG You-li^{1,4}

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China; 3. Beidahuang Group Heilongjiang Erlongshan Farm Co., Ltd, Heihe 156433, China; 4. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to determine the effects of biochar application amount on the growth and yield of soybean, a field plot experiment was conducted with soybean Heihe 43 as the material, and four levels of biochar 27 kg·ha⁻¹ (B1), 54 kg·ha⁻¹ (B2), 81 kg·ha⁻¹ (B3) and 108 kg·ha⁻¹ (B4) mixed with conventional fertilization were set up and the ground and underground growth, dry matter accumulation and yield indicators of soybean were analyzed. The results showed that the application of biochar could affect the plant height, stem diameter, root length, root volume, fresh weight and dry matter accumulation of soybean in each growth period, and the increase rates were respectively -27.58%-13.13%, 6.52%-29.62%, -9.65%-0.78%, 17.78%-68.41%, -26.84%-59.79% (fresh weight above ground), 1.43%-62.88% (fresh weight below ground), 9.09%-51.49% (dry weight above ground), and -14.07%-62.26% (dry weight below ground). The plant height of biochar treatments increased significantly at the seed filling stage and mature stage, stem diameter of all biochar treatments increased, aboveground fresh weight, dry weight, underground fresh weight, dry weight and root length of B3 treatment had the largest increment. Biochar can increased the yield per plant by increasing pods number per plant, effective pods number per plant, seeds weight per plant and 100-seed weight, and then increased the total yield by 1.57%-7.74%. In general, the promotion effect of conventional fertilization combined with 81 kg·ha⁻¹ biochar (B3 treatment) on soybean growth and yield was the best.

Keywords: biochar; soybean; growth; growth period; yield

生物质炭 (biochar) 是农作物秸秆和林业废料经热裂解形成的难溶性固体物,生物质炭具有吸附性强、比表面积大和多孔等特性,并含有大量碱性基团,施入土壤后可改善土壤阳离子交换量,提高土壤保肥性^[1-2]。由于生物质炭具有缓解环境污染和提高资源利用率等特性,因此近年来成为黑土保护的重要措施之一^[3]。

目前普遍认为,生物质炭的施入能够增加作物产量,增产效果随作物种类、土壤类型、气候条件等因素的不同而略有差异^[4-5]。生物质炭含有大量有机碳,其化学成分主要由生物质炭源而决定,含养分极少,在实际应用中需与一定比例的有机/无机肥料配施,进而提高作物产量^[6]。有研究发现,生物质炭与 N、P、K 肥减量配施不同处理均使玉米产量显

收稿日期:2022-09-26

基金项目:黑龙江省应用技术与开发计划专项 (GA19B104);黑龙江八一农垦大学大学生创新创业项目 (20210223110)。

第一作者:邓杰 (1990—),女,实验师,博士研究生,主要从事作物高产理论与栽培生理研究。E-mail:dengjiehlau@126.com。

通讯作者:张有利 (1990—),男,硕士,副教授,主要从事测土配方与绿色防控研究。E-mail:441722471@qq.com。

著提高^[7]。将生物质炭应用到花生种植中发现,生物质炭可使花生产量提高 50.63%^[8]。袁晶晶等^[9]发现 10 t·hm⁻² 生物质炭和 300 kg·hm⁻² 氮肥配合施用对大枣产量促进效果最显著。另有研究表明生物质炭对作物生长发育有负作用,如对大豆的研究发现适量施用生物炭对大豆生长发育及产量有促进作用,过量则起到抑制效果^[10]。生物质炭处理对玉米苗期的生长有显著抑制作用,随着玉米生育进程推进,抑制作用逐渐消失^[11]。在小麦和糜子中研究发现生物质炭的增产效果并不稳定,壤土小麦的产量显著增长,但在新积土上用量为 20 t·hm⁻² 时有轻微的抑制作用^[12]。总之,施用生物质炭在一定程度上可以改善土壤化学性质,提高土壤有效养分含量,但生物炭对作物的影响与土壤、作物类型及土壤肥力密切相关。

黑龙江省是中国大豆的主产区^[13],2022 年黑龙江省大豆种植面积达到 4.57 × 10⁶ hm²^[14]。面积虽然占全国总面积的 50% 左右,但单产却不高,其主要原因之一是生产中存在严重的重茬问题,重茬打乱正常的轮作体系,破坏土壤养分平衡。为了进一步明确施入生物质炭对大豆生长发育的影响,以及施入不同浓度生物质炭对大豆生长发育的影响效果,本研究在肥料中混入梯度生物质炭,以研究不同生物质炭施入量对大豆全生育期农艺性状及产量的影响,旨在寻找最有利于大豆生长发育的生物质炭施入量,为生物质炭在大豆生产中的应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为当地主栽品种黑河 43,生育期 115 d,株高 75 cm 左右,亚有限结荚习性,无分枝,百粒重 20 g 左右,具有抗性强、产量稳的特点。生物质炭粉由黑龙江地力农业发展有限公司提供,生物炭含氮(N)13.93 g·kg⁻¹、磷(P₂O₅)6.04 g·kg⁻¹、钾(K₂O)20.33 g·kg⁻¹、碳 61.13%,pH5.16。试验常规肥料为尿素(N≥46%)、磷酸一铵(11-44-0)、氯化钾(≥62%)。

1.2 试验设计

大田试验在黑龙江省二龙山农场进行,前茬作物为大豆,土地以酸性黑钙土为主,pH5.82,有机质 63.11 g·kg⁻¹,碱解氮 385 mg·kg⁻¹,速效磷 48.3 mg·kg⁻¹,速效钾 249.8 mg·kg⁻¹。2021 年 5 月 3 日播种,10 月 2 日收获。试验采用随机区组

设计,小区行长 7 m,行距 0.65 m,4 行区,播种密度为 36 万株·hm⁻²,共设 5 个处理,3 次重复。各处理如下:当地常规施肥(尿素 60 kg·hm⁻²、磷酸一铵 75 kg·hm⁻²、氯化钾 30 kg·hm⁻²),记为 CK;在当地常规施肥基础上添加生物质炭 27 kg·hm⁻²,记为 B1;添加生物质炭 54 kg·hm⁻²,记为 B2;添加生物质炭 81 kg·hm⁻²,记为 B3;添加生物质炭 108 kg·hm⁻²,记为 B4。生物质炭与肥料充分混匀后以基肥一次性施入土壤,人工精量点播,后期进行正常田间管理。

1.3 测定项目及方法

试验在苗期(6 月 29 日)、花期(7 月 12 日)、结荚期(7 月 28 日)、鼓粒期(8 月 23 日)、成熟期(9 月 25 日)进行。将植株整体挖出,分别选取有代表性的 10 株植株,将地上部分和地下部分分开,将茎、叶、根系表面冲洗干净并用吸水纸擦拭到无水状态。测定地上鲜重、地下鲜重;用米尺测定株高、根长;用游标卡尺测定茎粗;用排水法测定根系体积。其后,将地上部分和地下部分 105℃ 杀青 30 min,80℃ 下烘干至恒重,称取地上干重和地下干重。收获期,每个处理测定 10 株大豆的单株荚数、有效荚数、单株粒重和百粒重。实收小区中间 2 行 9 m² 大豆籽粒,测定产量后按照种植密度折算产量。

1.4 数据分析

运用 SPSS 26.0 软件对数据进行方差分析和多重比较,并用 Excel 2016 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对大豆地上部性状的影响

2.1.1 株高 由表 1 可知,苗期株高总体表现为: B2 > B4 > CK > B3 > B1, B2、B4 及 CK 3 个处理间未达到显著差异,但是显著高于 B1 和 B3 处理。花期株高处理表现为: B2 > B3 > CK > B4 > B1, B2、B3 及 CK 3 个处理间的株高未达到显著差异,但是显著高于 B1 和 B4 处理; B2 处理的株高最高, B3 和 B4 相对于 B2 均有所减少, B4 比 CK 减少 4.24%。结荚期各处理间株高有差异但不显著。鼓粒期和成熟期生物质炭处理均使大豆株高显著提高,随着生物质炭施用量增加株高表现为先增加后降低的趋势,且均在 B3 处理达到最大值,显著高于其他处理。鼓粒期施用生物质炭处理株高相比于 CK 提高 7.05% ~ 12.76%。成熟期施用生物质炭处理比 CK 增加 8.54% ~ 13.13%,差异均达到显著水平。

表 1 生物质炭对大豆各生育期株高的影响

Table 1 Effects of biochar on plant height of soybean at different growth stages

单位:cm

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	结荚期 Pod setting stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Mature stage
CK	17.37 ± 0.33 a	44.27 ± 1.13 ab	64.22 ± 2.42 a	65.92 ± 0.82 c	67.18 ± 0.44 c
B1	12.58 ± 0.26 c	38.67 ± 0.81 c	63.15 ± 1.33 a	71.22 ± 0.99 b	72.92 ± 1.22 b
B2	17.77 ± 0.16 a	46.15 ± 0.62 a	61.48 ± 2.03 a	72.50 ± 0.89 ab	73.17 ± 0.62 b
B3	14.17 ± 0.42 b	45.20 ± 0.27 a	65.57 ± 2.56 a	74.33 ± 0.43 a	76.00 ± 0.58 a
B4	17.70 ± 0.32 a	42.48 ± 0.27 b	65.48 ± 1.71 a	70.57 ± 0.31 b	73.65 ± 0.52 b

注:不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$),下同。
Note: Different lowercase indicate significant difference($P < 0.05$), the same below.

2.1.2 茎粗 如表 2 所示,各生物质炭处理大豆茎粗均增加,随着生物质炭施用量增加,所有生育期的大豆茎粗呈现先升高后下降的趋势,B3 处理达到最大值。但是,生物质炭未使大豆苗期茎粗显著增

加。花期 B3、B4 的大豆茎粗显著高于 CK;B3 处理的茎粗在结荚期和成熟期显著高于其他处理,较 CK 分别增加 15.04% 和 21.62%;所有添加生物质炭处理在鼓粒期的大豆茎粗均显著高于 CK。

表 2 生物质炭对各生育期大豆茎粗的影响

Table 2 Effects of biochar on stem diameter of soybean at different growth stages

单位:mm

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	结荚期 Pod setting stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Mature stage
CK	2.92 ± 0.11 a	3.95 ± 0.23 b	5.52 ± 0.21 bc	5.05 ± 0.04 b	5.92 ± 0.17 c
B1	2.98 ± 0.07 a	4.25 ± 0.15 ab	5.32 ± 0.12 c	5.35 ± 0.05 a	6.13 ± 0.18 c
B2	3.05 ± 0.09 a	4.52 ± 0.38 ab	5.63 ± 0.20 bc	5.43 ± 0.02 a	6.27 ± 0.08 c
B3	3.17 ± 0.03 a	5.12 ± 0.42 a	6.35 ± 0.09 a	5.48 ± 0.06 a	7.20 ± 0.14 a
B4	3.03 ± 0.08 a	4.95 ± 0.25 a	5.98 ± 0.14 ab	5.38 ± 0.06 a	6.68 ± 0.09 b

2.1.3 地上鲜重 由表 3 可知,生物质炭施入对除花期外的其他生育期大豆地上鲜重均有显著影响。苗期,B3、B4 的地上鲜重显著高于 CK,B1、B2 处理高于 CK 但无显著性差异;B3 处理鲜重较 CK 提高 46.75%。花期,各生物质炭处理地上鲜重高于对照但无显著差异。结荚期,各生物质炭处理鲜重与 CK 存在显著性差异,且各生物质炭处理之间差异显著;B1、B2、B3、B4 处理地上鲜重与 CK 相比分别提

高 18.51%、30.52%、59.79%、42.81%。鼓粒期,生物质炭处理(除 B1 外),大豆地上鲜重显著提高,B3 处理的地上鲜重达到最大,添加生物质炭处理较 CK 分别提高 5.25%、27.81%、35.45% 和 19.31%。成熟期,B2、B3 及 B4 处理的地上鲜重分别比 CK 低 12.48%、26.84% 和 21.37%,但仅 B3 与 CK 差异达到显著水平,B1 的地上鲜重较 CK 有所提高,但无显著差异。

表 3 生物质炭对各生育期大豆地上鲜重的影响

Table 3 Effects of biochar on aboveground fresh weight of soybean at different growth stages

单位:g

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	结荚期 Pod setting stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Mature stage
CK	3.85 ± 0.30 c	18.75 ± 2.61 a	35.39 ± 0.41 e	67.99 ± 1.69 c	30.44 ± 2.92 ab
B1	4.24 ± 0.32 bc	18.84 ± 2.41 a	41.94 ± 0.11 d	71.56 ± 0.57 c	32.46 ± 2.76 a
B2	4.58 ± 0.29 bc	23.38 ± 2.03 a	46.19 ± 0.15 c	86.90 ± 1.90 a	26.64 ± 2.14 ab
B3	5.65 ± 0.35 a	24.79 ± 2.76 a	56.55 ± 0.22 a	92.09 ± 2.41 a	22.27 ± 3.60 c
B4	5.18 ± 0.38 ab	21.16 ± 2.16 a	50.54 ± 0.12 b	81.12 ± 1.92 b	25.08 ± 2.52 ab

2.1.4 地上部干重 由表 4 可知,生物质炭对各时期大豆地上部干重均有一定促进作用,随着生物质炭施用量增加,所有生育期大豆地上干重呈现先升高后下降趋势,在 B3 处理时达到最大值。苗期,B2 和 B3 的地上干重较 CK 显著增加,分别增加 22.73% 和 45.45%。花期,B3 处理与 CK 相比显著增加 43%,B1、B2、B4 与 CK 相比增加但不显著。结

荚期,B2、B3、B4 地上干重比 CK、B1 显著增加,B2、B3 和 B4 较 CK 分别提高 49.32%、51.49% 和 30.49%。鼓粒期,B2、B3、B4 地上干重较 CK 显著增加,分别增加 20.34%、46.04% 和 41.43%。成熟期,各生物质炭处理地上干重与 CK 相比均存在显著差异,其中 B3 处理提高达到 20.26%。纵观大豆整个生育期,B3 生物质炭处理使大豆地上部干重增幅最大。

表 4 生物质炭对各生育期大豆地上干重的影响

Table 4 Effects of biochar on aboveground dry weight of soybean at different growth stages

单位:g

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	结荚期 Pod setting stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Mature stage
CK	0.44 ± 0.01 c	3.86 ± 0.35 b	7.38 ± 0.10 c	18.44 ± 0.43 c	17.72 ± 0.20 d
B1	0.48 ± 0.02 c	4.14 ± 0.36 b	7.74 ± 0.07 c	19.10 ± 0.27 c	19.22 ± 0.47 c
B2	0.54 ± 0.01 b	4.85 ± 0.36 ab	11.02 ± 0.35 a	22.19 ± 0.41 b	20.34 ± 0.12 b
B3	0.64 ± 0.02 a	5.52 ± 0.62 a	11.18 ± 0.42 a	26.93 ± 0.29 a	21.31 ± 0.35 a
B4	0.48 ± 0.02 c	4.66 ± 0.24 ab	9.63 ± 0.13 b	26.08 ± 0.62 a	19.13 ± 0.12 c

2.2 生物质炭对大豆地下部性状的影响

2.2.1 根长 由表 5 可知,随生物质炭施用量增加,4 个生育时期的大豆根长呈现先升高后下降的趋势,但苗期各处理之间大豆根长无显著差异。花期,B4 处理较 CK 增加 22.53%,存在显著性差异。结荚期,所有生物质炭处理之间根长均无显著性差异,仅 B2 处理的根长较 CK 显著增加 14.89%。鼓

粒期,B3、B4 与 CK 根长相比显著增加,较 CK 分别提高 34.64% 和 14.98%。成熟期,各生物质炭处理根长与 CK 相比均达到显著性差异,增幅表现为 B3 > B2 > B1 > B4,分别增加 40.78%、37.46%、12.37% 和 11.66%。总体而言,生物质炭对大豆整个生育期根长的影响随生育期的变化而变化,在鼓粒期与成熟期 B3 处理根长增长最为显著。

表 5 生物质炭对各生育期大豆根长的影响

Table 5 Effects of biochar on root length of soybean at different growth stages

单位:cm

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	结荚期 Pod setting stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Mature stage
CK	31.55 ± 2.50 a	29.83 ± 2.36 bc	19.00 ± 0.70 b	19.42 ± 0.35 c	14.15 ± 0.21 c
B1	29.83 ± 2.36 a	26.95 ± 1.38 c	20.15 ± 0.77 ab	19.83 ± 0.40 bc	15.90 ± 0.23 b
B2	36.95 ± 3.77 a	31.55 ± 2.5 abc	21.83 ± 0.53 a	21.13 ± 1.68 bc	19.45 ± 0.15 a
B3	36.55 ± 2.51 a	34.98 ± 1.42 ab	20.90 ± 0.97 ab	26.15 ± 0.17 a	19.92 ± 0.33 a
B4	34.23 ± 2.47 a	36.55 ± 2.51 a	19.58 ± 0.74 ab	22.33 ± 0.61 b	15.80 ± 0.17 b

2.2.2 根体积 由表 6 可知,生物质炭对各个时期大豆根体积均具有一定促进作用,随生物质炭施用量增加,各生育期(除成熟期)大豆的根体积呈现先升高后下降的趋势,B3 处理的根体积最大。苗期,B3 处理的根体积与 CK 相比显著增加 67.49%,后 4 个生育时期各生物质炭处理与 CK 相比均存在显著性差异。花期,B1、B2、B3 和 B4 处理的根体积与 CK

相比分别提高 32.38%、55.87%、68.41% 和 44.39%。结荚期,根体积分别较 CK 提高 21.1%、25.87%、52.17% 和 39.88%。鼓粒期,各处理较 CK 分别显著增加 49.02%、56.1%、77.68% 和 49.15%,B3 处理增幅最大。成熟期,各处理根体积较 CK 增加 13.93%~40.45%,B2 处理增幅最大,B3 处理次之,B2 和 B3 处理之间无显著差异。

表 6 生物质炭对各生育期大豆根体积的影响

Table 6 Effects of biochar on root volume of soybean at different growth stages 单位:mL

处理	苗期	花期	结荚期	鼓粒期	成熟期
Treatment	Seedling stage	Flowering stage	Pod setting stage	Seed filling stage	Mature stage
CK	2.03 ±0.24 b	3.83 ±0.31 d	6.92 ±0.22 d	8.20 ±0.16 c	4.45 ±0.12 c
B1	2.57 ±0.18 ab	5.07 ±0.13 c	8.38 ±0.19 c	12.22 ±0.55 b	5.40 ±0.18 b
B2	2.63 ±0.19 ab	5.97 ±0.06 ab	8.71 ±0.15 c	12.80 ±0.33 b	6.25 ±0.18 a
B3	3.40 ±0.56 a	6.45 ±0.20 a	10.53 ±0.33 a	14.57 ±0.25 a	5.90 ±0.06 a
B4	2.68 ±0.23 ab	5.53 ±0.25 bc	9.68 ±0.20 b	12.23 ±0.27 b	5.07 ±0.22 b

2.2.3 地下鲜重 由表 7 可知,随生物质炭施用量增加,所有生育期的大豆地下鲜重呈先升高后下降的趋势,在 B3 处理时达到最大。苗期,B3 处理大豆地下鲜重与其他各处理均存在显著性差异,较 CK 提高 57.42%,B1、B2、B4 与 CK 相比略有增加但无显著性差异。花期,各处理间有差异但不显著。结荚期,大豆地下鲜重表现为 B3 > B4 > B2 > B1 > CK,且各处理间均存在显著差异,B1、B2、B3、B4 分别较

CK 提高 27.54%、33.69%、82.75% 和 44.39%。鼓粒期,各生物质炭处理与 CK 均存在显著性差异,B3 处理比 CK 高 62.88%,增幅最大,B2 处理增幅最小,为 35.67%。成熟期,B2 和 B3 处理与 CK 相比分别显著增加 55.47% 和 26.44%,B1、B4 与 CK 相比略提高但无显著差异。纵观整个生育期,生物质炭的添加对大豆地下鲜重影响显著,均表现为 B3 处理增幅最大。

表 7 生物质炭对各生育期大豆地下鲜重的影响

Table 7 Effects of biochar on underground fresh weight of soybean at different growth stages 单位:g

处理	苗期	花期	结荚期	鼓粒期	成熟期
Treatment	Seedling stage	Flowering stage	Pod setting stage	Seed filling stage	Mature stage
CK	2.09 ±0.22 b	3.96 ±0.12 a	7.48 ±0.06 e	7.57 ±0.15 c	5.03 ±0.24 c
B1	2.12 ±0.19 b	4.10 ±0.28 a	9.54 ±0.13 d	11.77 ±0.37 a	5.39 ±0.12 c
B2	2.54 ±0.18 b	4.22 ±0.40 a	10.00 ±0.04 c	10.27 ±0.20 b	6.36 ±0.13 b
B3	3.29 ±0.09 a	4.65 ±0.30 a	13.67 ±0.10 a	12.33 ±0.37 a	7.82 ±0.27 a
B4	2.64 ±0.19 b	4.16 ±0.21 a	10.80 ±0.19 b	11.70 ±0.45 a	5.44 ±0.06 c

2.2.4 地下干重 由表 8 可知,苗期和结荚期仅 B3 生物质炭处理地下干重与 CK 有显著差异,较 CK 分别增加 52.08% 和 57.66%,其他处理与 CK 相比略有增加但不显著。添加生物质炭对花期地下干重有一定促进作用,但各处理间均未达到显著性差异。鼓粒期,各生物质炭处理地下干重与 CK

相比均存在显著差异,增加 31.91% ~ 62.26%,且 B3 处理的地下干重最高,为 4.17 g·株⁻¹。成熟期,B3 处理地下干重较 CK 显著增加 26.67%,B4 与 CK 相比略有增加,增幅为 8.89%,B1、B2 与 CK 相比均显著降低了 14.07%。总体而言,B3 处理各个时期大豆地下干重增加最多。

表 8 生物质炭对各生育期大豆地下干重的影响

Table 8 Effects of biochar on underground dry weight of soybean at different growth stages 单位:g

处理	苗期	花期	结荚期	鼓粒期	成熟期
Treatment	Seedling stage	Flowering stage	Pod setting stage	Seed filling stage	Mature stage
CK	0.48 ±0.06 b	1.08 ±0.09 a	2.22 ±0.23 b	2.57 ±0.20 c	1.35 ±0.05 b
B1	0.52 ±0.05 b	1.30 ±0.11 a	2.34 ±0.05 b	3.61 ±0.22 b	1.16 ±0.04 c
B2	0.54 ±0.05 b	1.36 ±0.15 a	2.63 ±0.31 b	3.78 ±0.13 ab	1.16 ±0.04 c
B3	0.73 ±0.07 a	1.32 ±0.16 a	3.50 ±0.11 a	4.17 ±0.20 a	1.71 ±0.06 a
B4	0.62 ±0.05 ab	1.22 ±0.12 a	2.32 ±0.21 b	3.39 ±0.12 b	1.47 ±0.01 b

2.3 生物质炭对大豆产量的影响

施加生物质炭对大豆产量(图 1)及产量构成因素(表 9)均有不同程度的促进作用。不同生物质炭施用量对大豆产量影响显著,B1、B2、B3、B4 与 CK 相比分别显著增加 1.57%、2.63%、7.74% 和 3.6%,其中 B3 处理增产效果最为显著。单株荚数、单株有效荚数、单株粒重及百粒重随生物质炭施用量增加呈先增加后降低趋势。生物质炭施用对大豆单株荚数的影响表现为 B3 > B2 > B4 > B1 > CK,且各处理间均有显著差异,B3 处理单株荚数较 CK 显著增加 7.17 个。各生物质炭处理单株有效荚数均显著高于 CK,B3 处理增加最显著,较 CK 增加 45.73%,B1 与 B4 处理间未达到显著差异,其余处理间均达到显著差异水平。只有 B3 处理单株粒重与对照达到显著差异,较对照显著增加 17.41%,其他处理均

未有显著变化。各处理百粒重较 CK 增加幅度为 0.89%~7.80%,其中 B3 处理增加最多,且与其他处理差异显著。

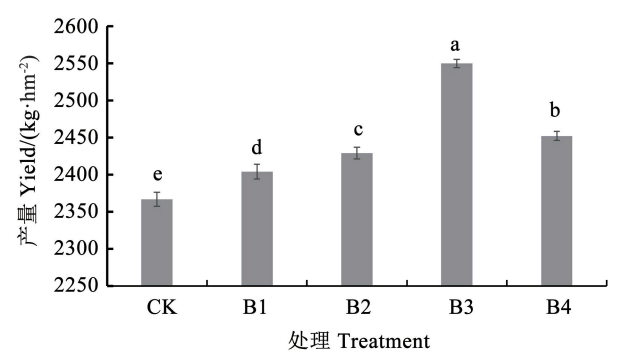


图 1 生物质炭对大豆产量的影响
Fig.1 Effects of biochar on soybean yield

表 9 生物质炭对大豆产量及产量构成因素的影响				
Table 9 Effects of biochar on the yield and its component factors of soybean				
处理	单株荚数	单株有效荚数	单株粒重	百粒重
Treatment	Pods number per plant	Effective pods number per plant	Seeds weight per plant/g	100-seed weight/g
CK	22.33 ±0.84 d	19.33 ±1.12 d	10.28 ±0.64 b	16.92 ±0.08 c
B1	25.00 ±0.37 c	22.83 ±0.83 bc	10.08 ±0.35 b	17.21 ±0.13 bc
B2	27.33 ±0.56 b	25.17 ±1.05 b	10.85 ±0.21 ab	17.64 ±0.15 b
B3	29.50 ±0.43 a	28.17 ±0.48 a	12.07 ±0.51 a	18.24 ±0.25 a
B4	25.17 ±0.31 c	22.33 ±0.56 c	10.45 ±0.18 b	17.07 ±0.22 bc

3 讨论

土壤是植物生长发育的基础,改善土壤环境。增加土壤中肥料含量、提高土壤养分利用率能够促进作物生长,提高作物产量与质量^[15]。本研究结果显示,生物质炭能够促进大豆根系伸长、根系体积增大,使根系生物量提高,可能原因是生物质炭施入使土壤容重降低、土壤空隙度增加、土壤结构改善,大豆根系生长阻力减少,进而促进根系生长。施用适量生物质炭后大豆根系发达,植株更易汲取养分与水分,向上运输给植株茎秆和叶片,地上部营养充沛、同化能力强,干物质积累多,为生育后期籽粒产量的提高提供良好的源动力。通过产量及构成因素结果发现施用生物质炭会扩大库容量,即增加单株荚数和有效荚数,并且提升籽粒代谢活性和转化同化物的能力,从而提升产量。

随生物质炭施用量增加,多个性状生物量在多个时期都表现出先增加后降低的趋势,这一结果与前人研究结果一致^[16-18],说明生物质炭过多可能会破坏土壤结构、养分平衡,反而不利于大豆的生长,为此探索使土壤结构、养分综合性较好的施炭量是

必要的。混施生物质炭的所有处理中,对大豆生长发育及产量的提升效果最显著的是 B3 处理。通过对多个时期的比较发现生物质炭对大豆结荚期和鼓粒期生长有显著促进作用,可能是在营养生长阶段大豆植株所处生长环境条件充分,生物质炭对土壤环境作用尚未发生显著性影响,而到生殖生长时期,需求养分大量增加,而生物质炭能够有效调节土壤环境、提高根系对土壤中养分的利用率。值得注意的是,尽管 B3 处理的大豆地上、地下生物量及产量整体显著增加,但是表现出地下生物量 > 地上生物量 > 产量的趋势,产量比对照增加较少,仅 7.74%,原因可能是短期试验效果不理想,对大豆重迎茬导致的土壤肥力下降的缓解作用不够,应开展多年定位试验,以便明晰生物质炭对大豆生长发育的影响。

施用生物质炭可以降低成熟期大豆植株的鲜重,原因可能是植物生长末期根系活力降低,施用生物质炭使土壤疏松、含水量降低,加速了植株的脱水速率。后续研究将关注生物质炭对大豆同化物转运、抗倒伏、脱水速率、籽粒品质等的影响。

4 结论

生物质炭对大豆各生育期株高、茎粗、根长、根系体积、鲜重及干物质积累量有一定促进作用,对结荚期和鼓粒期性状的促进效果最显著。生物质炭通过促进大豆单株荚数、有效荚数、单株粒重及百粒重提高来使单株产量提高,继而提高总产量。常规施肥混施生物质炭 81 kg·hm⁻² (B3 处理)对大豆生长及产量促进效果最显著。

参考文献

[1] 于衷浦,李飞跃. 生物炭在农业资源与环境领域中的应用[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 171-178. (YU Z P, LI F Y. Biochar application in the field of agricultural resources and environment[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2022, 38(2): 171-178.)

[2] 刘长涛. 生物炭基复合肥料特性及增效机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021. (LIU C T. Study on characteristics and synergism mechanism of biochar based compound fertilizer[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.)

[3] 吴迪,袁鹤翀,顾闻琦,等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报,2023,42(1):37-45. (WU D, YUAN H C, GU W Q, et al. Photosynthetic physiological metabolism and yield response of continuous soybean Cropping mediated by long-term application of biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science,2023,42(1):37-45.)

[4] 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 W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324-3333.)

[5] 段建军,郭琴波,徐彬,等. 氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(6):298-308. (DUAN J J, GUO Q B, XU B, et al. Effects of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on rice yield and nutrient utilization[J]. Journal of Soil Water Conservation,2022, 36(6):298-308.)

[6] YU H, ZOU W, CHEN J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 15(232): 8-21.

[7] 田福,聂金锐,周子渝,等. 生物炭与化肥减量配施对玉米干物质、产量及氮、磷、钾积累转运的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 158-165. (TIAN F, NIE J R, ZHOU Z Y, et al. Effects of combined application of biochar and relatively low-level chemical fertilizer on dry matter, yield, accumulation and transport of nitrogen, phosphorus and potassium in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 158-165.)

[8] 战秀梅,彭靖,王月,等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1633-1641. (ZHAN X M, PENG J, WANG Y, et al. Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on

brown soil physiochemical properties and peanut yields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1633-1641.)

[9] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 468-475. (YUAN J J, TONG Y A, LU S H, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 468-475.)

[10] 侯伟男,刘靖愉,邢一唱,等. 生物炭施入量对大豆生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(15):14-19. (HOU W N, LIU J Y, XING Y C, et al. Biochar application amount: Effects on growth, development and yield of soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(15): 14-19.)

[11] 张哈芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010(11): 2713-2717. (ZHANG H Z, HUANG Y, LIU G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010(11): 2713-2717.)

[12] 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. (CHEN X X, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6534-6542.)

[13] 宫丽娟,姜蓝齐,李秀芬,等. 基于气候生产潜力的黑龙江省大豆种植空间优化[J]. 大豆科学, 2021, 40(5): 643-652. (GONG L J, JIANG L Q, LI X F, et al. Optimization of soybean planting space in Heilongjiang province based on climate potential productivity[J]. Soybean Science, 2021, 40(5): 643-652.)

[14] 黑龙江人民政府办公厅. 2022 年黑龙江省扩种大豆工作方案 [Z]. 2022-1-19. General Office of Heilongjiang People's Government. Work plan for soybean expansion in Heilongjiang province in 2022[Z]. 2022-1-19.

[15] WEI W, YANG H, FAN M, et al. Biochar effects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization[J]. Science of Total Environment, 2020,702(1): 134423.

[16] 苏旭,栾策,吴奇,等. 生物炭对玉米/大豆、玉米/花生间作系统土壤水肥热及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 40(1):115-122. (SU X, LUAN C, WU Q, et al. Effects of biochar on soil water, nutrient, heat and yield of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 40(1): 115-122.)

[17] 魏永霞,石国新,冯超,等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5):285-294. (WEI Y X, SHI G X, FENG C, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 285-294.)

[18] LIU D F, FENG Z Y, ZHU H D, et al. Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties [J]. BioResources, 2020, 15(1): 1463-1481.