

刘楚华,张旭东,张花平,等.生物炭配施氮肥对大豆生物量积累及产量的影响[J].山西农业科学,2026,54(1):143-153.

LIU C H, ZHANG X D, ZHANG H P, et al. Effect of biochar with nitrogen fertilizer on biomass accumulation and yield of soybean [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 143-153.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.16

生物炭配施氮肥对大豆生物量积累及产量的影响

刘楚华^{1,2}, 张旭东², 张花平², 王小林²

(1. 铜陵学院, 安徽 铜陵 244061; 2. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000)

摘 要:为探明生物炭配施氮肥对大豆生物量和产量的影响,筛选适宜大豆生长的生物炭和氮肥施用量,以汾豆78号为供试品种,采用大田试验,设置100(C1)、200(C2)、400(C3) kg/hm²共3个生物炭梯度和60(N1)、90(N2)、120(N3) kg/hm²共3个氮肥梯度,随机区组设计N1C1、N1C2、N1C3、N2C1、N2C2、N2C3、N3C1、N3C2、N3C3共9个交互处理,测定大豆各生育期的根、茎、叶生物量积累、大豆产量和产量构成。结果表明,适量的生物炭和氮肥配施能够有效促进大豆根、茎、叶干物质积累,过量的生物炭或者氮肥都有可能起到抑制作用。开花期,2022年,N3C1处理的茎干物质质量比N3和C1分别增长158.89%和127.85%,N2C1处理的叶干物质质量比N2和C1分别增长121.95%和24.52%;2023年,N2C1处理根干物质质量相较N2处理增长89.90%。2022、2023年试验,大豆产量都是在N2C1处理下达到了最大值,2023年N2C1处理比N2和C1处理分别提高69.85%和74.92%。综上,生物炭和氮肥配施的用量分别为100、90 kg/hm²时,对大豆生物量和产量的提升效果最佳。

关键词:生物炭;氮肥;大豆;生物量;产量

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2026)01-0143-11

Effect of Biochar with Nitrogen Fertilizer on Biomass Accumulation and Yield of Soybean

LIU Chuhua^{1,2}, ZHANG Xudong², ZHANG Huaping², WANG Xiaolin²

(1. Tongling University, Tongling 244061, China; 2. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of biochar with nitrogen fertilizer on soybean biomass and soybean growth and development, and to screen out the suitable biochar and nitrogen fertilizer application rate for soybean growth, in this study, field experiments was conducted taking Fendou 78 as the test variety, and three gradients of biochar(C1: 100 kg/ha, C2: 200 kg/ha, and C3: 400 kg/ha) and three gradients of nitrogen fertilizers(N1: 60 kg/ha, N2: 90 kg/ha, N3: 120 kg/ha) were used in a randomized block design with nine interaction treatments: N1C1, N1C2, N1C3, N2C1, N2C2, N2C3, N3C1, N3C2, N3C3. The biomass accumulation of roots, stems, and leaves of soybean, and the yield and yield components of soybean were measured. The results showed that moderate amounts of biochar and nitrogen fertilizer dosing could effectively promote dry matter accumulation in soybean roots, stems, and leaves, and excessive amounts of either biochar or nitrogen fertilizer may act as an inhibitor. At the flowering stage, in 2022, the stem dry weight of N3C1 treatment increased by 158.89% and 127.85% compared with the treatments N3 and C1, respectively, and the leaf dry weight of N2C1 treatment increased by 121.95% and 24.52% compared with the treatments N2 and C1, respectively. In 2023, the root dry weight of the N2C1 treatment increased by 89.90 % compared with the treatment N2. In both years of the experiment, soybean yield was maximized under N2C1 treatment, and in 2023, yield of N2C1 treatment increased by 69.85% and 74.92% over N2 and C1.

收稿日期:2024-12-11

基金项目:国家自然科学基金(41967013、32260078);榆林市科技局产学研合作项目(CXY-2022-70、2023-CXY-172);中央引导地方科技发展基金陕西省工程技术研究中心项目(2022ZY2-GCZX-05);陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01);榆林市府谷县农业科技成果转化项目(H2023060049、H2023060048)

作者简介:刘楚华,硕士,研究方向:旱区大豆根系对肥料的高效利用,E-mail:chuhua928@163.com

通信作者:王小林,教授,博士,主要从事作物根土界面水肥高效利用研究,E-mail:wangxl8304@163.com

In conclusion, the best biomass and yield enhancement of soybean was achieved when biochar and nitrogen fertilizers were applied at the rates of 100 kg/ha and 90 kg/ha, respectively.

Keywords: biochar; nitrogen fertilizer; soybean; biomass; yield

大豆是我国的传统农作物,也是我国的主要粮食作物和油料作物之一,为人类提供了丰富的食用油脂和植物蛋白,可用于多种食品和工业用途^[1-2]。大量农药和化肥的使用是制约大豆产量提升、实现土地可持续生产的重要因素之一^[3],氮素是限制大豆生长发育和产量的重要因子,施加氮肥可以促进大豆根系的发育,提高大豆根系的水肥吸收和利用能力,促进大豆的生长发育^[4]。然而,过量施氮不仅会造成资源浪费,而且会导致环境污染,甚至会抑制作物根系的生长和发育^[5]。

生物炭是一种稳定的富碳产物,由农业、林业废弃物在缺氧等条件下通过热裂解而产生,具有高度发达的孔隙结构、较大的比表面积^[6-7]。在土壤中添加生物炭是改善土壤结构、提高作物产量的一种途径^[8]。生物炭施入土壤中,可以影响土壤的物理结构和化学特性,提高土壤质量^[9-10]。律其鑫等^[11]的大田试验结果表明,土壤中添加生物炭能促进作物的生长,显著增加作物的株高、茎粗和生物量,且高炭条件下效果最佳。朱冬梅等^[12]在玉米试验中得知,玉米株高随着生物炭的增加呈现出先增大后减小的规律,添加生物炭可以促进玉米的生长发育并提高玉米产量。张爱平等^[13]研究表明,生物炭配施氮肥,可以显著提高土壤中速效氮的积累量,从而提高氮肥利用效率。

迄今,人类对生物炭的研究还处于初级阶段^[14],前人对于生物炭的研究主要集中在原料制作^[15]和生物炭中氮、磷和钾等营养元素的含量等方面^[16],关于生物炭与氮肥配施研究较少,且研究主要集中在华中、华南等地,在黄土旱区鲜有研究。

基于此,本研究采用大田试验方式,以汾豆 78 号为供试品种,研究生物炭和氮肥配合施肥策略对大豆生物量及大豆生长发育的影响,探明生物炭和氮肥配合施肥对大豆生物量的影响,筛选出适宜大豆生长的生物炭添加量,以期为氮肥的减施增效提供理论依据,同时为黄土旱区大豆增产提供新途径。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5 月至 2023 年 10 月在榆林市榆

林学院农牧科教基地进行大田试验。试验地位于榆林市牛家梁镇马圈沟村(109°43'E, 38°23'N),该地属干旱半干旱大陆性季风气候,年平均降水量为 371 mm,其中,60%~80% 集中在 7—9 月。蒸发量为 1 900 mm,年日照时数为 2 900 h,年均气温 8.6℃,≥10℃积温 3 000~3 300℃,无霜期为 167 d。光照充沛,地势平坦且地下水位较高,便于灌溉。土壤是风沙土,肥力水平中等。土壤 pH 值为 8.46,有机质含量为 3.25 g/kg,硝态氮含量为 5.12 mg/kg,铵态氮含量为 5.27 mg/kg,速效磷含量为 7.79 mg/kg,速效钾含量为 95 mg/kg。

1.2 试验材料

选用汾豆 78 号为供试品种,供试肥料为尿素(总氮≥46.40%,宁夏和宁化学有限公司生产),生物炭为竹竿生物炭(pH 值为 10.39,有机碳为 313.25 g/kg),有机肥(N+P+K≥5.0%、有机质≥45%,石家庄市丰硕肥业有限公司生产)。

1.3 试验设计

采用大田试验,随机区组设计,分别设置 3 个 C 和 N 调控梯度,C 的用量设置 C1.100 kg/hm²; C2.200 kg/hm²; C3.400 kg/hm²; N 的用量为 N1.60 kg/hm²; N2.90 kg/hm²; N3.120 kg/hm²,共 9 个交互处理:N1C1、N1C2、N1C3、N2C1、N2C2、N2C3、N3C1、N3C2、N3C3,进行 3 次重复。将 C 和 N 单一因素 3 个变化梯度设置为对照,即 C1、C2、C3 和 N1、N2、N3 为对照,对照不进行重复(表 1)。小区面积为 4 m×5 m,行距 50 cm,株距 10 cm,播种密度为 20 万株/hm²。所有处理统一基施等量有机肥。

表 1 试验设计
Tab.1 Experimental Design

因素 Factor	CK	C1	C2	C3
CK		C1	C2	C3
N1	N1	N1C1	N1C2	N1C3
N2	N2	N2C1	N2C2	N2C3
N3	N3	N3C1	N3C2	N3C3

1.4 测定指标及方法

1.4.1 大豆生物量 在大豆苗期、分枝期、开花

期、结荚期、鼓粒期和成熟期,每个处理采集5株具有代表性的植株,带回实验室,将根、茎、叶和荚分解,观测大豆根的根瘤数并记录,分别装入牛皮纸袋,105℃杀青1h,然后80℃烘干至恒质量,称质量,得到根、茎、叶、荚干物质质量。

1.4.2 产量 成熟后,每个小区选取具有代表性的2行进行考种测产,将豆荚晒干并进行去荚处理,称取大豆质量并计算产量,折合成公顷产量。每小区选择5株具有代表性的植株,观测大豆的分枝数,将荚分离出来测定单株有效荚数、瘪粒数,70℃烘干至恒质量,并称取百粒质量。

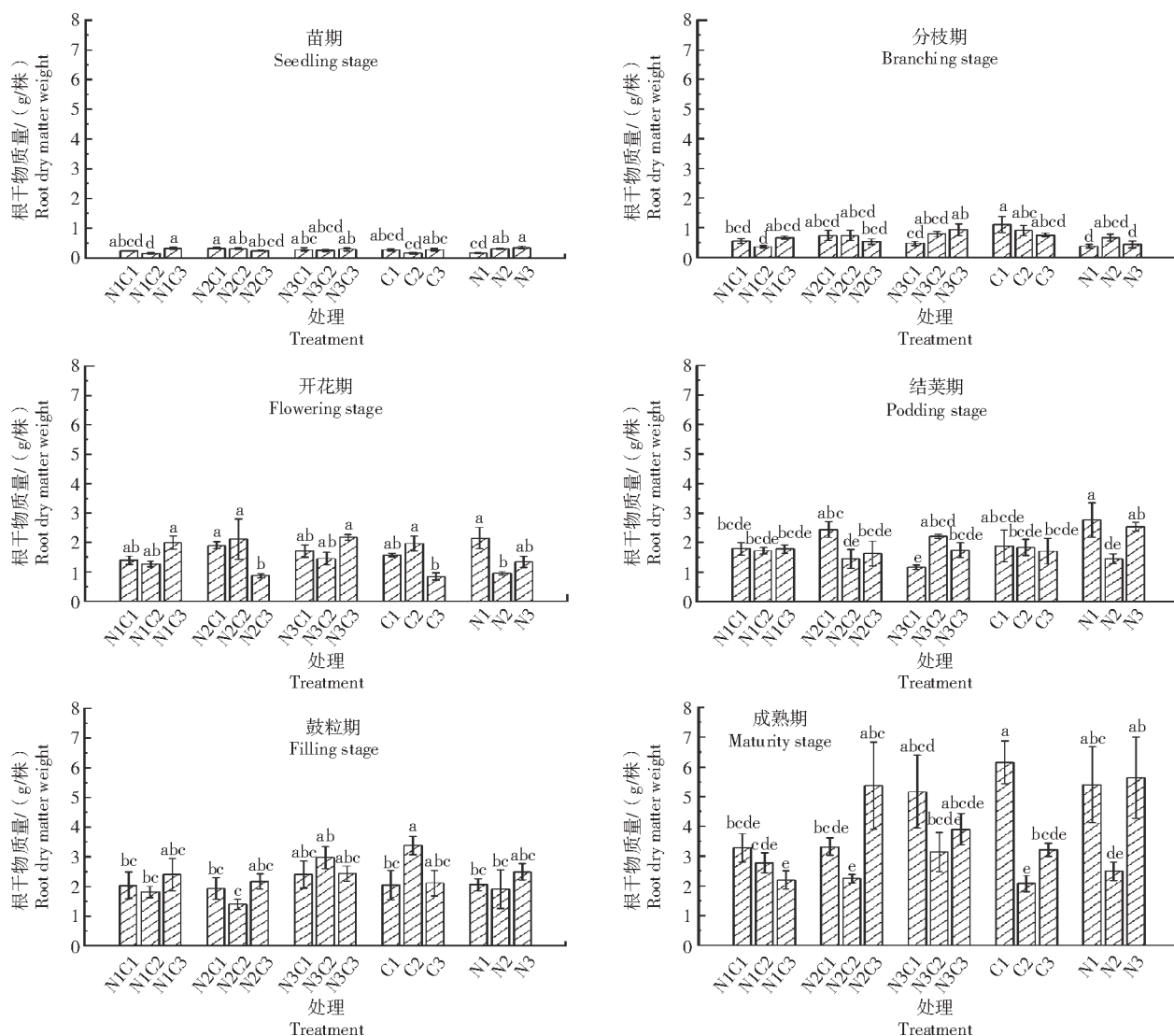
1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2019对数据进行整理,利用IBM SPSS Statistics 24.0软件进行单因素方差分析,事后多重检验采用Duncan检验法,以 $P < 0.05$ 为判断差异显著性的标准。采用Origin 2018软件绘图并对产量进行拟合,采用Origin 2021进行皮尔逊相关性分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 大豆根生物量变化

2022年生物炭配施氮肥对大豆根干物质质量的影响如图1所示。



不同小写字母表示各处理在0.05水平上差异显著。下图同

The different lowercase letters indicated significant difference among treatments at the 0.05 level. The same as below

图1 2022年生物炭配施氮肥对大豆根干物质质量的影响

Fig.1 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on root dry weight of soybean in 2022

由图 1 可知,在 2022 年大豆的苗期和分枝期,大豆根干物质质量没有显著性差异。2022 年大豆开花期根干物质质量在中量氮(N2)条件下有显著性差异($P<0.05$),且随着生物炭的增加先升后降,在 C2 梯度时达到了最大值, N2C2 处理的根干物质质量比对照 N2、C2 分别增加 121.18% 和 7.41%。2023 年,生物炭和氮肥配施各处理组间,在开花期大豆根干物质质量基本是随着生物炭的添加而下降,在施加少量生物炭(C1)的时候达到了最大值, N1C1 处理相较于对照 N1 和 C1 分别增加 37.56% 和 0.09%, N2C1 处理相较于对照 N2 和 C1 分别增加 89.90% 和 6.70%。2022 年结荚期,在中量氮(N2)条件下,大豆根干物质质量在 C1 时达到了最大值,并随着生物炭的增加而下降;在高量氮(N3)组

中,大豆根干物质质量随着生物炭用量的增加呈先升后降的趋势。2022 年大豆鼓粒期根干物质质量在高量氮(N3)条件下随着生物炭用量的增加呈先升后降的趋势,在 C2 梯度下达到了最大值, N3C2 处理比对照 N3 增加了 19.52%。由图 2 可知,2023 年 N1C1 处理的大豆鼓粒期根干物质质量比对照 N1、C1 分别增加了 50.51% 和 19.78%, N2C1 处理比对照 C1 增加了 14.27%。在成熟期, N2C3、N3C1 处理下大豆根干物质质量增加最快。综上所述,氮肥配施生物炭对大豆的苗期和开花期影响较小;从分枝期开始到成熟期,氮肥配施少量的生物炭可以促进大豆根干物质的生长,过量的生物炭反而会起到抑制作用。

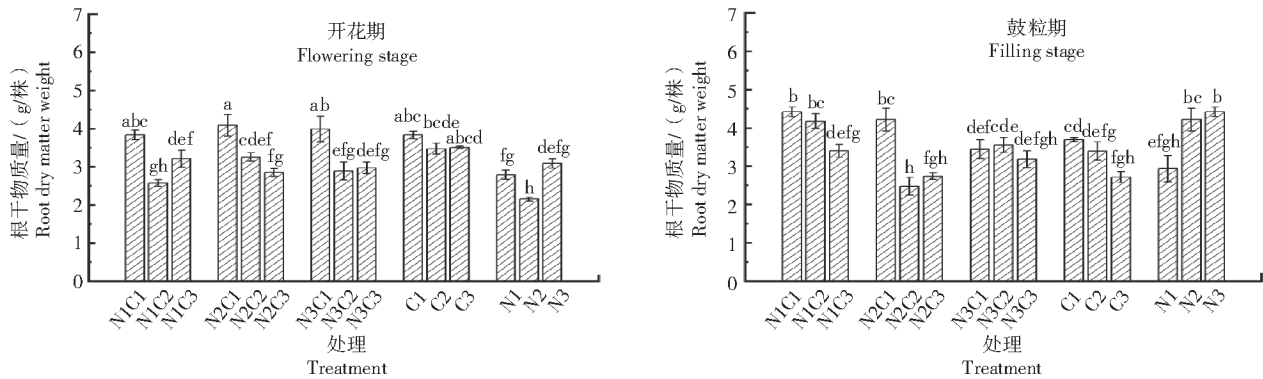


图 2 2023 年生物炭配施氮肥对大豆根干物质质量的影响

Fig.2 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on root dry weight of soybean in 2023

2.2 大豆茎生物量变化

从图 3、4 可以看出,在大豆苗期,各处理间已经有了显著性差异($P<0.05$)。2023 年低氮(N1)和中氮(N2)梯度下,大豆茎干物质质量都是随着生物炭的增加递减,在生物炭用量为 C1 时达到最大值, N1C1 处理相较于对照 N1、C1 分别增长 0.62% 和 34.85%, N2C1 处理相较于对照 N2 和 C1 分别增长 25.56% 和 39.80%。在大豆分枝期,中量氮(N2)组中,大豆茎干物质质量在 C1 梯度下要显著高于 C2 和 C3 梯度, N2C1 处理相较于对照 N2 增长了 29.71%。在大豆开花期,2022 年施氮量为高氮量(N3)条件下,在 N3C1 处理下达到最大值,比对照 N3、C1 分别增长 158.89% 和 127.85%。2023 年 N1C1 处理相较于对照 C1 增长 11.33%, N2C1 处理相较于对照 N2、C1 分别增长 65.44% 和 99.37%。在大豆结荚期,此时 N2C1 处理的茎干物质质量达到了最大值,相较于对照 N2、C1 分别增

长 57.60% 和 72.94%。大豆鼓粒期,2022 年低量氮(N1)和高量氮(N3)条件下,大豆茎干物质质量都是随着生物炭用量增加而递增;中量氮(N2)条件下,大豆茎干物质质量随着生物炭的增加先降后升。2023 年,低氮(N1)、中氮(N2)和高氮(N3)条件下的最大值均出现在 C1 梯度下, N1C1 处理相较于对照 N1、C1 分别增长 36.22% 和 20.21%, N2C1 处理相较于对照 N2、C1 分别增长 113.89% 和 23.22%, N3C1 处理相较于对照 N3、C1 分别增长 36.43% 和 5.63%。在大豆成熟期,在低氮量(N1)条件下大豆茎干物质质量随着生物炭的增加而递减,在中量氮(N2)和高量氮(N3)条件下大豆茎干物质质量随着生物炭的增加先降后升。结果表明,2022 年,氮肥配施生物炭量为 C1 和 C3 时,大豆茎干物质质量提升效果比较明显;2023 年, N2C1 处理提升效果显著,添加过量的氮肥和生物炭反而抑制大豆茎的生长。

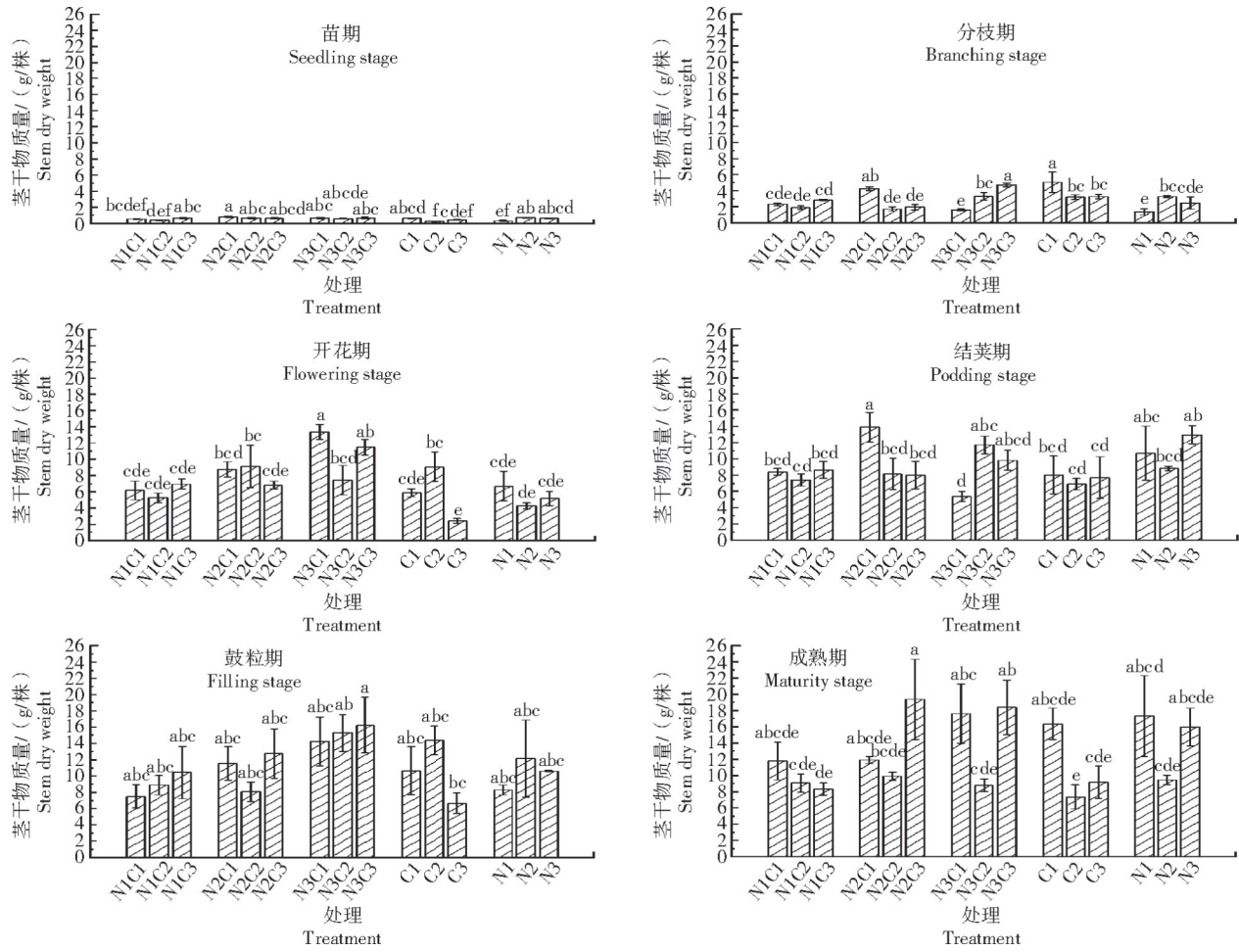


图3 2022年生物炭配施氮肥对大豆茎干物质质量的影响

Fig.3 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on stem dry weight of soybean in 2022

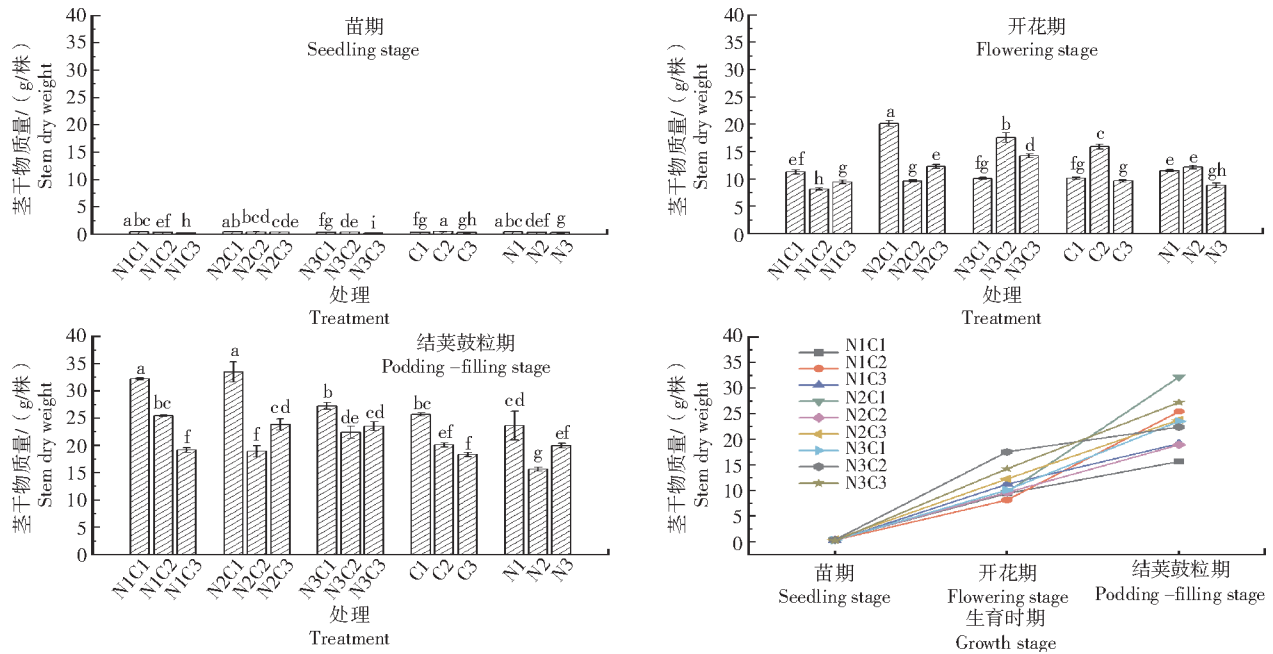


图4 2023年生物炭配施氮肥对大豆茎干物质质量的影响

Fig.4 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on stem dry weight of soybean in 2023

2.3 大豆叶生物量变化

从图5、6可以看出,在大豆苗期2a的试验中,氮肥和生物炭配施的各处理间大豆叶干物质质量差异均不显著。在大豆分枝期中量氮(N2)条件下,在生物炭用量为C1时效果较好,N2C1处理相较于对照N2、C1分别增加25.17%和8.49%。在大豆开花期,2022年N3C3处理比对照N3、C3分别增长239.07%和578.71%。在中氮(N2)处理中,大豆叶干物质质量随着生物炭的增加而递减,N2C1处理比对照N2、C1增长121.95%和24.52%。2023年N2C1处理相较于对照N2、C1增加74.33%和82.96%。在2022年结荚期中氮(N2)梯度下,大豆叶干物质质量是随着施炭量的增加而递增的,N2C1处理比对照N2、C1分别增加64.81%和46.29%;高氮N3处理中,大豆叶干物质质量是随着施炭量的增加呈现出先增大后减小的趋势。

2023年最大值出现在N2C1,其次是N3C1,N2C1处理比对照N2、C1分别增加101.04%和117.44%,N3C1处理比对照N3、C1分别增加131.18%和64.85%;此时N1梯度叶干物质质量也较开花期有所增加,并在N1C2处理为最大值,N1C2处理相较于对照N1、C2分别增加23.41%和83.60%。在大豆鼓粒期所有处理中,大豆叶干物质质量差异不显著。当大豆生长到了成熟期,大豆枝干上叶子基本上已经掉落。

从图5、6还可以看出,叶干物质质量随着大豆生长呈增长趋势,并在开花时期叶干物质质量达到了高峰,到了结荚鼓粒期,大豆叶干物质质量开始下降。结果表明,生物炭配施氮肥可以促进大豆叶干物质质量的提升,配施少量的生物炭对大豆叶干物质质量的提升效果比较明显,N2C1处理在各生育期中增长较快。

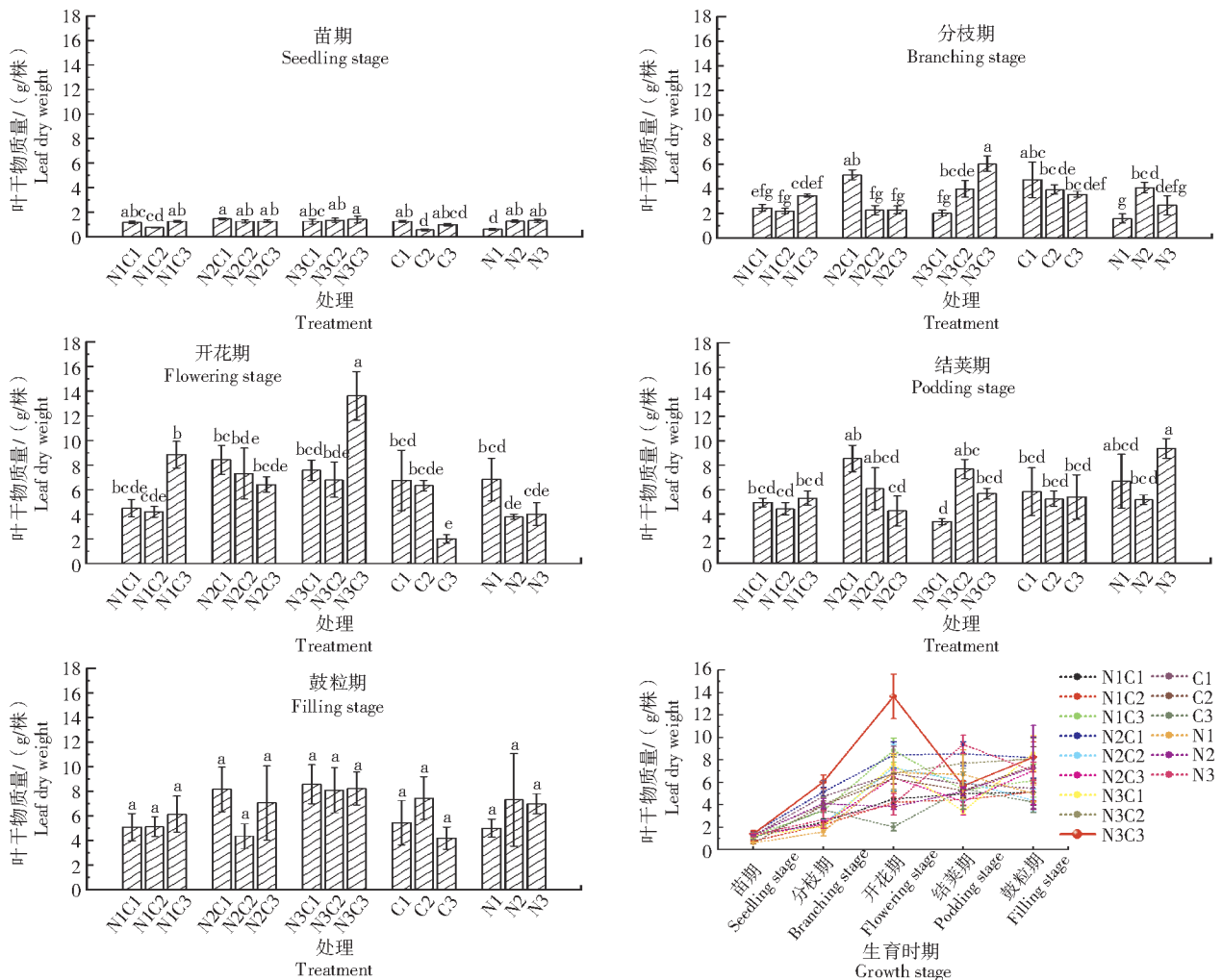


图5 2022年生物炭配施氮肥对大豆叶干物质质量的影响

Fig.5 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on leaf dry weight of soybean in 2022

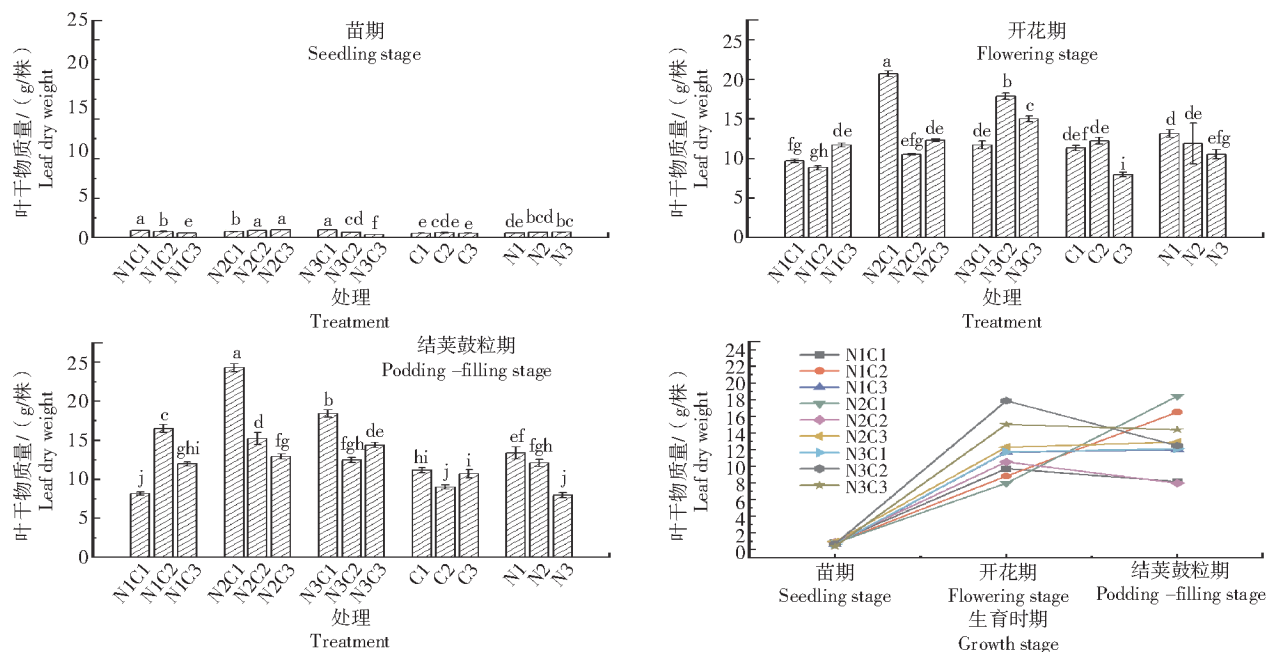


图6 2023年生物炭配施氮肥对大豆叶干物质量的影响

Fig.6 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on leaf dry weight of soybean in 2023

2.4 大豆产量及产量性状变化

从图7可以看出,当施加少量生物炭(C1),即施炭量为 100 kg/hm^2 时,各处理间大豆产量有显著性差异 ($P < 0.05$)。大豆产量随着施氮量的增加呈现出先上升后下降的趋势,且在 N2C1 处理下达到了最大值,比 N3C1 处理提高了 63.83%。N2C1

处理比对照 C1 和 N1C1 处理分别提高 28.33% 和 14.11%。当施加中量生物炭(C2),即施炭量为 200 kg/hm^2 时,各处理间大豆产量有显著性差异 ($P < 0.05$)。大豆产量随着施氮量的增加呈现出先下降后上升的趋势。

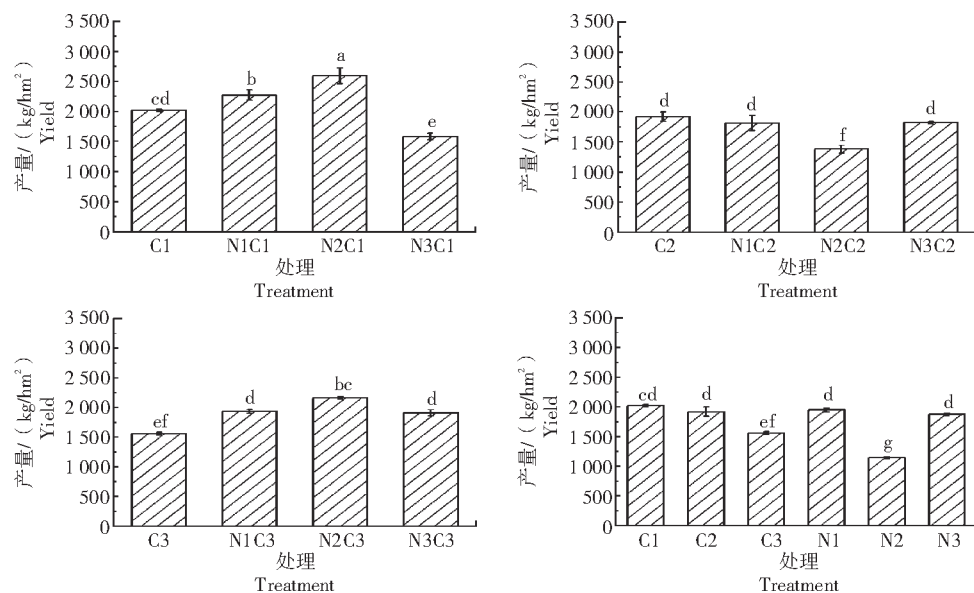


图7 2022年生物炭配施氮肥对大豆产量的影响

Fig.7 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soybean yield in 2022

从图7可以看出,当施加高量生物炭(C3),各处理间大豆产量有显著性差异 ($P < 0.05$)。大豆

产量与低量生物炭 C1 条件下相似,随着施氮量的增加呈现出先上升后下降的趋势,并在 N2C3 处理

下达到了最大值,比对照 C3、N1C3、N3C3 处理产量分别提高了 35.82%、11.73% 和 12.94%。施加少量的生物炭,即 100 kg/hm² 时,大豆的产量的提升效果较好。

由图 8 可知,无论是生物炭和氮肥配施还是单施生物炭或氮肥,大豆产量都有显著性差异($P < 0.05$)。当生物炭和氮肥配施条件下,施加低量氮肥(N1),大豆的产量随着生物炭的增加先降低后升高,在 N1C3 处理下达到了最大值,为 2 686 kg/hm²,比对照 N1、C3 分别增加 35.69% 和 4.55%,N1C3 处理的产量比 N1C1、N1C2 处理分别提高 14.68% 和 27.85%;当生物炭和氮肥配施条件下,施加中量氮肥(N2),大豆产量在 N2C1 处理下达到了最大值,比 N2 和 C1 分别提高 69.85% 和 74.92%,比 N2C2、N2C3 处理分别提高 33.43% 和 32.55%。在 high 量氮肥(N3)和单施生物炭对照组中,大豆的产量随着生物炭的增加而增加。

由 2 a 试验可以得出,适量的生物炭和氮肥配比可以显著提高大豆的产量,2 a 中大豆产量的最大值均出现在 N2C1 处理,即生物炭和氮肥的用量分别为 90、100 kg/hm² 时,大豆产量提升效果较好。

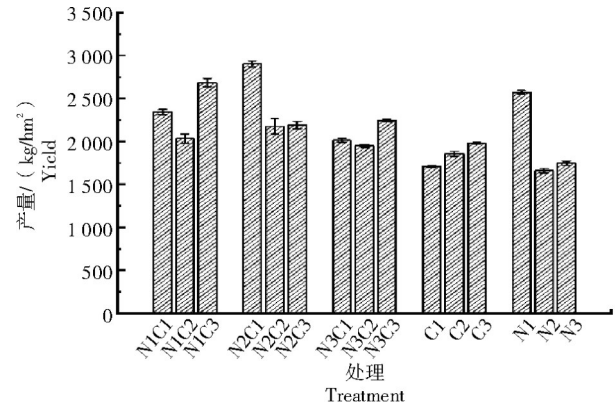
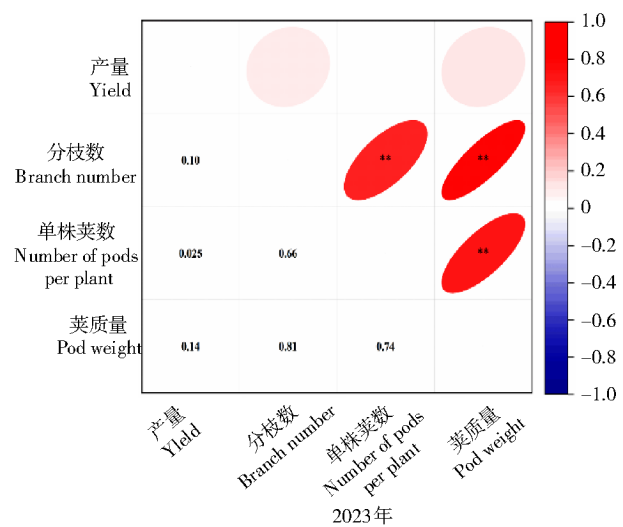
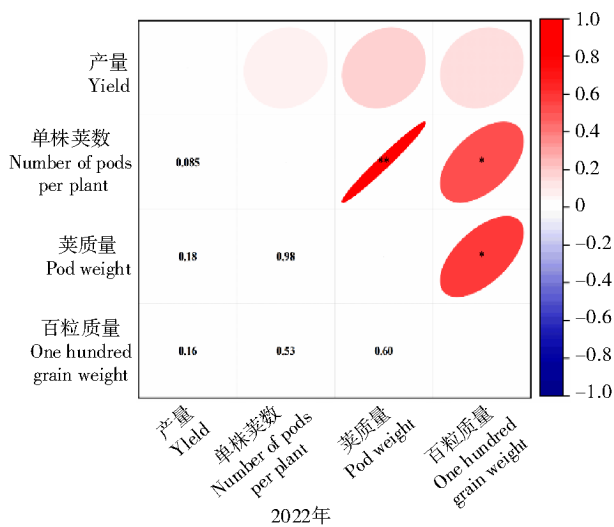


图 8 2023 年生物炭配施氮肥对大豆产量的影响

Fig.8 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soybean yield in 2023

2.5 大豆产量与产量构成因素及各指标的相关性分析

2022、2023 年生物炭配施氮肥大豆产量及产量构成因素的相关性分析如图 9 所示,2022 年,单株荚数与荚质量呈极显著正相关($P < 0.01$),百粒质量与单株荚数、荚质量呈显著正相关($P < 0.05$)。2023 年,大豆分枝数与单株荚数、荚质量呈极显著正相关($P < 0.01$),单株荚数与荚质量呈极显著正相关($P < 0.01$)。



*表示显著相关($P < 0.05$);**表示极显著相关($P < 0.01$)。图 10、11 同

* indicated significant correlation($P < 0.05$);** indicated extremely significant correlation($P < 0.01$). The same as Fig.10, 11

图 9 大豆产量与产量构成因素的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis of soybean yield and yield components

由图 10 可知,2022 年大豆产量与结荚期根干物质质量呈显著正相关($P < 0.05$),与各时期茎、叶干物质质量呈正相关。

由图 11 可知,2023 年大豆产量与结荚鼓粒期叶干物质质量呈显著正相关($P < 0.05$),与开花期叶干物质质量呈极显著正相关($P < 0.01$)。

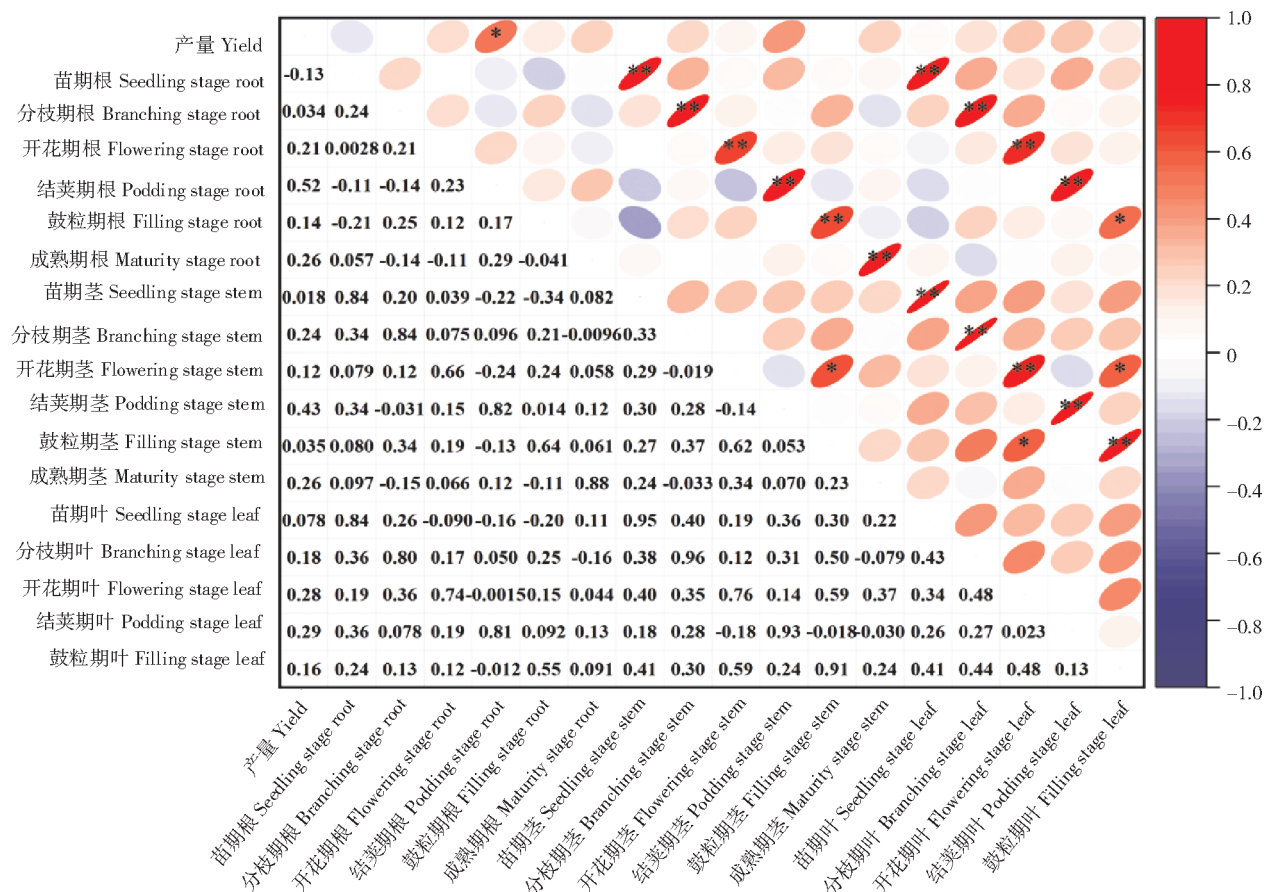


图 10 2022 年大豆产量与各时期根、茎、叶干物质质量的相关性分析

Fig.10 Correlation analysis of soybean yield and dry weight of stems and leaves at various stages in 2022

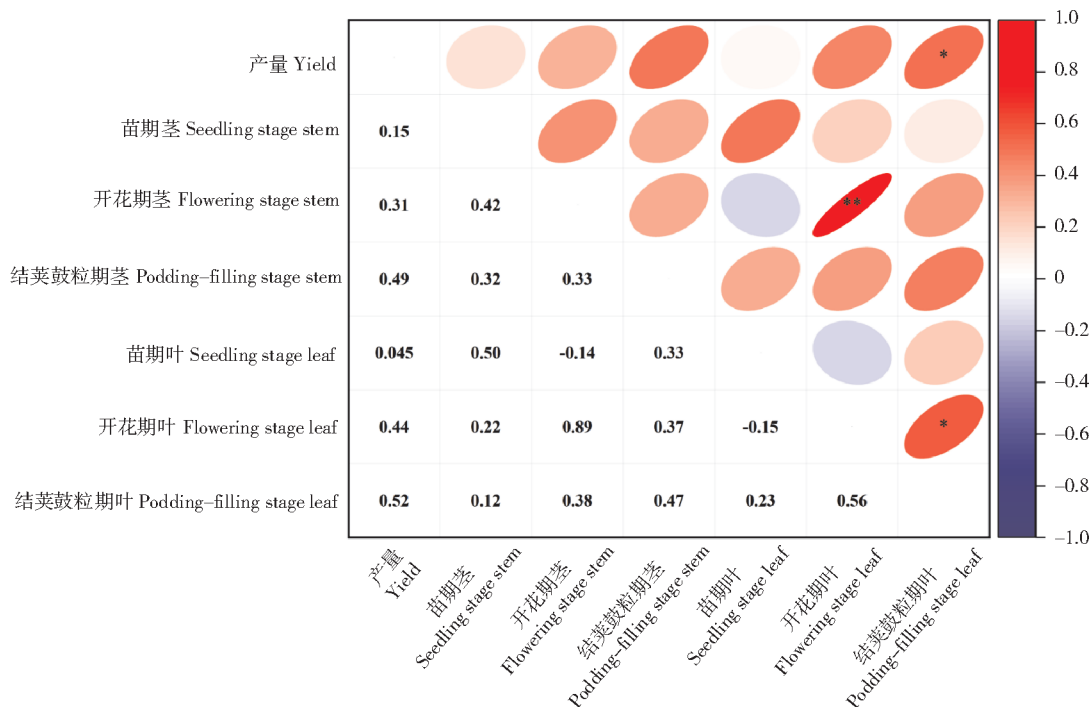


图 11 2023 年大豆产量与各时期茎、叶干物质质量的相关性分析

Fig.11 Correlation analysis of soybean yield and dry weight of stems and leaves at various stages in 2023

3 结论与讨论

干物质与作物的产量息息相关^[17],直接关系到作物的生长发育,是反映作物生长的一个重要指标^[18]。生物炭可以改善土壤环境,作为一种改良剂,促进作物的生长发育,增加作物生物量的积累,提高作物的产量^[14]。生物炭和氮肥配施,可以提高作物的光合作用和产量,赵立宁等^[19]研究表明,生物炭和氮肥配施使春小麦的干物质量提高 28.87%,产量提高 30.23%。文慧宝等^[20]研究发现,生物炭和有机肥配施可以增加白菜的生物量积累,促进白菜的根系生长。白雪等^[21]研究表明,生物炭与肥料配施可以显著提高作物生物量的积累和根系的生长发育。郑文德等^[22]试验结果表明,添加生物炭可以显著增加黄瓜的生物量积累。

本研究通过 2 a 的大田试验,证明氮肥配施适量的生物炭有利于提高大豆生物量的积累,从而提高作物的产量。生物炭通常都是间接影响作物,生物炭和氮肥配施可以改变土壤的 C/N,提高土壤 CO₂ 的累积释放量,土壤中施加生物炭后碳素物质增加,微生物会从中汲取部分氮元素作为补充,从而形成与作物争氮的现象,如不及时补充氮肥,可能会造成土壤中的氮素不足,因此,生物炭和氮肥配施可以保障作物的生长发育^[23]。但过量的生物炭或者氮肥都可能会抑制大豆生物量的积累,影响大豆的生长发育,这可能是由于过量的氮肥影响了土壤中营养元素的平衡^[24]。生物炭本身含有丰富的碳,施入土壤后,会改变土壤中的 C/N,导致 C 多 N 少,土壤中的微生物因为缺乏氮素,土壤有机质分解速度减缓,导致微生物与作物争夺土壤养分,反而会抑制作物的生长发育。这与阚正荣等^[25]研究结果一致,适量的生物炭会提高作物的产量,过量的生物炭反而会降低土壤的养分含量,使冬小麦的产量有所降低^[26]。生物炭本身含有部分的营养元素,这些营养元素前期可作为速效养分被作物吸收利用,可促进大豆前期的生物量积累^[27-28],而生物炭的多孔结构可吸附肥料养分,作为肥料缓释载体的养分“暂存库”延缓养分释放,弥补化学肥料养分释放过快,肥效期短的不足,使土壤具有持续供肥能力,利于作物的生长发育^[29-30]。

生物炭和氮肥合理配施可以促进大豆根系的生长,促进大豆根、茎、叶干物质量的积累,促进大豆的生长发育,从而提高大豆的产量。当生物炭

和氮肥配施的用量分别为 90、100 kg/hm²时,对大豆生物量和产量的提升效果最佳。

参考文献:

- [1] ZIEGLER V, MARINI L J, FERREIRA C D, et al. Efeitos da temperatura e umidade durante o armazenamento semi-hermético sobre parâmetros de avaliação da qualidade dos grãos e do óleo de Soja[J]. Semina: Ciências Agrárias, 2016, 37(1): 131.
- [2] 李傲宇, 李瑞敏, 陈翼芝, 等. 外源水杨酸、褪黑素对盐胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(19): 31-36.
- [3] LI A Y, LI R M, CHEN Y Z, et al. Effects of exogenous salicylic acid or melatonin on seed germination and seedling growth of soybean under salt stress[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2024, 30(19): 31-36.
- [3] 杨东, 刘晓霞, 陈红金, 等. 定额制施肥对土壤及生态环境影响的研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(32): 91-98.
- [4] YANG D, LIU X X, CHEN H J, et al. Effect of quota-based fertilization on soil and ecological environment: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(32): 91-98.
- [4] 孙铭泽, 杨光, 刘子君, 等. 大豆根系天冬氨酸分解代谢对低氮低磷胁迫的应答[J]. 大豆科学, 2025, 44(1): 72-83.
- [5] SUN M Z, YANG G, LIU Z J, et al. Response of aspartic acid catabolism in soybean roots to low nitrogen and low phosphorus stress[J]. Soybean Science, 2025, 44(1): 72-83.
- [5] 葛永中, 张丽佳, 杨军, 等. 施氮量对油菜镇油 8 号干物质积累分配及生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22): 90-94.
- [6] GE Y S, ZHANG L J, YANG J, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and distribution and growth of rape cultivar Zhenyou No. 8[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(22): 90-94.
- [6] 郭亚新, 杨镜秀, 韩昱放, 等. 生物炭与氮肥配施对水稻土理化性质及作物氮效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(6): 1582-1589.
- [7] GUO Y X, YANG J X, HAN Y F, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on physical and chemical properties of paddy soil and nitrogen efficiency of crops[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(6): 1582-1589.
- [7] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. Chapter 2 a review of biochar and its use and function in soil[J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 47-82.
- [8] 于玲玲, 赵贵元, 崔婧婧, 等. 施用生物炭对玉米田土壤呼吸及水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3): 209-213.
- [9] YU L L, ZHAO G Y, CUI J J, et al. Effects of bio-char on maize field soil respiration and water use efficiency[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(3): 209-213.
- [9] MAJUMDER S, NEOGI S, DUTTA T, et al. The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 250: 109466.
- [10] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation[J]. Science and Technology, 2009, 11(7): 535-536.
- [11] 律其鑫, 王桂君, 夏霜, 等. 土壤炭改良剂对沙化土壤及作物生长的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(3): 53-56.
- [11] LÜ Q X, WANG G J, XIA S, et al. Effects of soil carbon ame-

- liorant on sandy soil and crop growth[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(3):53-56.
- [12] 朱冬梅,霍铁珍,韩翠莲. 生物炭对土壤水热及玉米生长发育的影响[J]. 节水灌溉, 2017(7):94-97.
ZHU D M, HUO Y Z, HAN C L. Effects of biological carbon on soil moisture-heat and maize growth[J]. Water Saving Irrigation, 2017(7):94-97.
- [13] 张爱平,刘汝亮,高霁,等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352-1360.
ZHANG A P, LIU R L, GAO J, et al. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5):1352-1360.
- [14] 刘丹,冯章丽,李文召,等. 生物炭在农业生产中的应用进展[J]. 遵义师范学院学报, 2024, 26(5):76-79.
LIU D, FENG Z L, LI W Z, et al. Progress in the application of biochar in agricultural production[J]. Journal of Zunyi Normal University, 2024, 26(5):76-79.
- [15] 沈涛,赵宽,闫媛媛,等. 生物炭在重金属污染领域应用的文献计量分析[J]. 湖南农业科学, 2024(10):104-110.
SHEN T, ZHAO K, YAN Y Y, et al. Bibliometric analysis of the application of biochar in the remediation of heavy metal pollution[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(10):104-110.
- [16] 池哲翔,廖敏,史尚,等. 国外烟草活性成分提取及纤维材料利用研究现状与展望[J]. 轻工学报, 2025, 40(3):75-85.
CHI Z X, LIAO M, SHI S, et al. Current status and future perspectives on the extraction of active components and utilization of fiber materials from tobacco abroad[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(3):75-85.
- [17] 梁森,李盼,赵连豪,等. 土壤调理剂与缓释氮肥对小麦干物质积累及产量的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(2):470-484.
LIANG M, LI P, ZHAO L H, et al. Effect of soil conditioner and slow-release nitrogen fertilizer on dry matter accumulation and yield of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(2):470-484.
- [18] 张媛媛,孟欢欢,周晓兵,等. 不同生境/萌发类型尖喙牻牛儿苗生物量分配特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2):541-550.
ZHANG Y Y, MENG H H, ZHOU X B, et al. Biomass allocation patterns of an ephemeral species(*Erodium oxyrinchum*) in different habitats and germination types in the Gurbantungut Desert, China[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2):541-550.
- [19] 赵立宁,张力月,孟祥睿,等. 不同量氮肥与配施生物炭对春小麦光合特性和干物质积累及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(6):1180-1187.
ZHAO L N, ZHANG L Y, MENG X R, et al. Effects of different amounts of nitrogen fertilizer and biochar on photosynthesis characteristic, dry matter accumulation and yield of spring wheat[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(6):1180-1187.
- [20] 文慧宝,杜双江,程贵庆,等. 生物炭与有机肥配施对白菜生长品质、土壤养分及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(20):224-230.
WEN H B, DU S J, CHENG G Q, et al. Influences of combined application of biochar and organic fertilizer on growth quality, soil nutrients and enzyme activities of Chinese cabbage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(20):224-230.
- [21] 白雪,李小英,邱宗海. 添加生物炭与菌肥的复合基质对元宝枫幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4):14-22.
BAI X, LI X Y, QIU Z H. Effects of adding compound substrates with biochar and bacterial fertilizer on the growth of *Acer truncatum* seedlings[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2020, 40(4):14-22.
- [22] 郑文德,王晓东,马嘉伟,等. 生物炭与蚯蚓粪添加对玉米秸秆基质块养分特性和黄瓜生长变化的影响[J]. 北方园艺, 2020(15):96-102.
ZHENG W D, WANG X D, MA J W, et al. Nutrient characteristics of corn straw substrate block added with biochar and earthworm cast and changes in cucumber growth[J]. Northern Horticulture, 2020(15):96-102.
- [23] 张月,宋明丹,李月梅. 秸秆与氮肥配施下土壤碳库周转和稳定性研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(13):146-151.
ZHANG Y, SONG M D, LI Y M. Research progress on the turnover and stability of soil carbon pool under combined application of straw and nitrogen fertilizer[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(13):146-151.
- [24] 纪荣云. 西北地区生物炭和氮肥耦合下谷子生长及氮素转移利用机制研究[D]. 榆林:榆林学院, 2023.
JI Q Y. Study on Millet Growth and The Mechanism of Nitrogen Transfer and Utilization Under The Coupling of Biochar and Nitrogen Fertilizer in Northwest China[D]. Yulin: Yulin University, 2023.
- [25] 阚正荣,濮超,祁剑英,等. 施用生物炭对华北平原冬小麦土壤水分和籽粒产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4):1-10.
KAN Z R, PU C, QI J Y, et al. Effects of biochar on soil water and grain yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4):1-10.
- [26] 苏航. 生物炭与氮肥配施对黑土土壤理化性质与水稻生长及产量的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2023.
SU H. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on physical and chemical properties of black soil and rice growth and yield[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [27] CHEN H, YUAN J H, CHEN G L, et al. Long-term biochar addition significantly decreases rice rhizosphere available phosphorus and its release risk to the environment[J]. Biochar, 2022, 4(1):54.
- [28] 常栋,何晓冰,王晓强,等. 生物炭施用频率对植烟土壤细菌群落的影响[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(6):126-135.
CHANG D, HE X B, WANG X Q, et al. Effects of biochar application frequency on the bacterial community in growing soil[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(6):126-135.
- [29] 任成梁,张国龙,柴秀娟,等. 矿物生物炭对戈壁沙培番茄根际微环境、生长及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(10):88-92.
REN C L, ZHANG G L, CHAI X J, et al. Effects of mineral biochar on rhizosphere microenvironment, growth, and yield of tomato in Gobi desert sand[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(10):88-92.
- [30] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206:46-59.