

黄土旱区炭氮配施对大豆生理特性和生物量积累分配的影响

刘 瑜¹, 刘楚华¹, 刘钦慧¹, 毛 端¹, 王小林^{1,2}

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000)

摘 要:为了探究黄土旱区炭氮配施对大豆光合产物运移、干物质积累分配的影响,以大豆品种中黄13为试验材料,设置单施氮肥(210(CK)、420(N1)、630(N2)、840(N3)kg/hm²)以及氮肥与稻壳炭配施(氮肥420 kg/hm², 稻壳炭999 kg/hm²(C1N1), 氮肥630 kg/hm²和稻壳炭1998 kg/hm²(C2N2), 氮肥840 kg/hm²和稻壳炭2997 kg/hm²(C3N3))共7个处理,研究大豆叶片生理功能和干物质积累分配的调控机制。连续2 a分析结果表明,炭氮配施处理(C1N1、C2N2、C3N3)与单施氮肥处理(N1、N2、N3)相比,2022年大豆花期和结荚期的叶面积指数分别增加49.57%~159.08%、32.08%~110.20%,2023年仅花期叶面积指数增加12.82%~92.60%;叶日积指数在2022年分别增加77.40%~198.04%、13.38%~67.99%,在2023年分别增加2.87%~80.41%、18.95%~64.72%;总干物质质量在2022、2023年分别增加0.66%~20.87%、4.70%~23.62%。其中,炭氮配施的C2N2处理与C1N1和C3N3处理相比,叶面积指数在2022年结荚期增幅最大,分别增加46.59%、55.31%;叶日积指数在2022年花期增幅最大,分别增加10.72%、171.22%;叶绿素含量在2023年结荚期增幅最大,分别增加10.90%、14.28%;内在水分利用效率在2022年花期增幅最大,分别增加87.37%、41.56%;羧化速率在2022年结荚期增幅最大,分别增加29.14%、36.75%;总干物质质量在2023年鼓粒期增幅最大,分别增加21.63%、32.02%。综上,氮肥630 kg/hm²和稻壳炭1998 kg/hm²的施肥配比能够作为大豆栽培的新培肥技术推荐使用。

关键词:炭氮配施;大豆;干物质质量积累与分配;光合产物运移;叶片生理功能;黄土旱区

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2024)05-0033-11

Effects of Combined Application of Carbon and Nitrogen on Physiological Characteristics and Biomass Accumulation and Allocation of Soybean in Arid Loess Plateau

LIU Yu¹, LIU Chuhua¹, LIU Qinhuai¹, MAO Duan¹, WANG Xiaolin^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Engineering and Technology Research

Center of Water Saving for Crops in Arid Area of Northern Shaanxi Province, Yulin 719000, China)

Abstract: In order to explore the effects of combined application of carbon and nitrogen fertilizer on the transportation of photosynthate, accumulation and distribution of dry matter in soybean in the arid Loess Plateau, in this study, a soybean cultivar Zhonghuang 13 was used as the experimental material, seven treatments including nitrogen fertilizer application alone (210(CK), 420(N1), 630(N2), 840 kg/ha(N3)) and combined application of nitrogen fertilizer and rice husk carbon(420 kg/ha of nitrogen fertilizer and 999 kg/ha of rice husk carbon(C1N1), 630 kg/ha of nitrogen fertilizer and 1998 kg/ha of rice husk carbon(C2N2), and 840 kg/ha of nitrogen fertilizer and 2997 kg/ha of rice husk carbon(C3N3)) were set up to study the regulation mechanism of physiological function and dry matter accumulation and partitioning in soybean leaves. The analysis results for two consecutive years showed that the leaf area index of the combined application of carbon and nitrogen(C1N1, C2N2, C3N3) increased by 49.57%~159.08% and 32.08%~110.20% in 2022, compared with the single application of nitrogen(N1, N2, N3) at the flowering and podding stages of soybean, respectively, and the data only increased by 12.82%~92.60% at the flowering stage in 2023. Daily leaf volume index increased by 77.40%~198.04%, 13.38%~67.99% in 2022, and increased by 2.87%~80.41%, 18.95%~64.72% in 2023, respectively. The total dry matter increased by 0.66%~20.87% in 2022 and increased by 4.70%~23.62% in 2023, respectively. Compared with C1N1 and C3N3 treatments, the leaf area index of C2N2 treatment

收稿日期:2024-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41967013, 32260078);陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2021JZ-55);陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01);陕西省榆林市科学技术局产学研合作项目(CXY-2022-70, CXY-2021-83)

作者简介:刘 瑜(1998-),女,陕西榆林人,在读硕士,研究方向:旱地土壤水肥高效利用。

通信作者:王小林(1983-),男,陕西大荔人,副教授,博士,主要从事黄土旱区作物根土界面水肥高效利用生理生态机制研究工作。

showed the largest increase at the podding stage in 2022, it increased by 46.59% and 55.31%. The daily leaf volume index showed the largest increase at the flowering stage in 2022, it increased by 10.72% and 171.22%. The chlorophyll content increased most at the podding stage in 2023, it increased by 10.90% and 14.28% respectively. Intrinsic water use efficiency showed the largest increase at the flowering stage in 2022, it increased by 87.37% and 41.56%, respectively. Carboxylation rate increased most at the podding stage in 2022, it increased by 29.14% and 36.75%, respectively. Total dry matter showed the largest increase at the filling stage in 2023, it increased by 21.63% and 32.02%, respectively. To sum up, the fertilization combination of C2N2 treatment could be recommended to use as a new fertilization techniques for soybean cultivation.

Key words: carbon and nitrogen fertilizer ratio; soybean; dry matter accumulation and distribution; photosynthate transport; physiological function of leaves; arid Loess Plateau

大豆(*Glycine max*(L.)Merr.)是我国重要的粮食兼经济作物之一^[1]。大豆喜水肥,根瘤固氮仅能满足大豆生长所需的50%~60%,因此,必须吸收来自土壤与肥料中的氮素来保障大豆获得高产^[2-3]。但长期氮肥的过度投入造成的肥料利用率降低,土壤微生物种群骤减,生态失衡,地下水、地表水与土壤的不同程度污染等问题亟待解决^[3-4]。科学配施生物炭既能减少氮肥过量使用造成的污染,又能提升土壤生产力,保障作物的高产稳产^[5]。有研究表明,生物炭具有独特的多孔结构,比表面积大且含有大量的含氧活性基团,可有效增加土壤有机质含量、改善土壤理化性质、对提高土壤肥力有明显作用^[6-7]。适量的生物炭与其他肥料配施可以降低土壤有毒物质的活性^[8]。此外,生物炭具有吸附作用,可以储存营养物质,降低肥料的淋溶流失,并且在作物重要生长阶段可缓慢释放营养,及时补充土壤营养成分,满足作物的吸收和高效利用^[9]。

氮素是作物生长和产量形成的重要元素,能显著提高作物叶面积指数与叶绿素含量^[10]。而吴迪等^[11]研究发现,生物炭的配施可以进一步显著提高叶片面积与叶绿素含量。宋世龙等^[12]通过比较单施氮肥、单施生物炭与二者配施对春小麦的影响,发现炭氮配施的处理更有利于叶片对光能的截获,从而提升作物光合作用能力。崔文芳等^[13]研究发现,施用生物炭能够为大豆生长发育提供充足的营养,促进干物质的积累,进一步增加作物的产量。因此,研究生物炭与氮肥配施对作物生理功能提升和生物量优化分配的影响,不仅可以减少化学氮肥投入量,同时还能够改善土壤环境,对于黄土旱区土壤质量提升和粮食生产具有现实意义。

本研究以大豆为试验对象,通过不同梯度的炭、氮配比施肥,探究生物炭与氮肥的最佳配比,旨在为旱区大豆减肥增效的栽培模式构建提供理

论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试大豆品种为中黄13,由中国农业科学院作物育种栽培研究所选育。

氮肥为尿素(含氮量 $\geq 46.4\%$,宁夏和宁化学有限公司生产),生物炭为稻壳炭(含碳量 $\geq 36\%$ 浙江国美园艺有限公司生产)。

1.2 试验设计

试验于2022、2023年的5—10月在陕西黄土高原丘陵沟壑区的榆林市榆林学院农牧科教基地进行,第2年与第1年试验的环境、试验材料和方法均一致。采用不同生物炭与氮肥配施的方式进行盆栽试验,选用普通树脂花盆,规格为27.5 cm(上口直径) \times 25.0 cm(下口直径) \times 31.0 cm(高),盆底有直径为1.5 cm的出水孔。土壤取自基地0~20 cm的耕层沙质土壤,类型为黄绵土,有机质含量为3.2 g/kg,速效磷含量为6.2 mg/kg,速效钾含量为66.0 mg/kg,碱解氮含量为18.9 mg/kg,全氮含量为0.3 g/kg, pH值为8.31。

试验共设7个处理,分别为CK(氮肥210 kg/hm²); N1(氮肥420 kg/hm²); N2(氮肥630 kg/hm²); N3(氮肥840 kg/hm²); C1N1(氮肥420 kg/hm²,稻壳炭999 kg/hm²); C2N2(氮肥630 kg/hm²,稻壳炭1 998 kg/hm²); C3N3(氮肥840 kg/hm²,稻壳炭2 997 kg/hm²)。每个处理种植3盆,3次重复。土壤过1.0 mm筛后装入花盆,每盆装土12 kg。按照试验设计的施肥配比称取对应的肥料均匀拌入土样中,其他条件不变。用烧杯浇2 000 mL水直到盆栽土壤浇透(水从盆底渗出即为浇透),静置于盆栽土壤含水量为田间持水量水平(70%~75% FC),每盆播种5株。将盆栽放置于阳光充足、温度适宜、通风环境良好的地方,定期浇灌等量的水保障大豆的正常出苗,待出苗后定苗3株。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶面积指数和叶日积的测定 于花期、结荚期在各处理选取3株大豆,在实验室进行植株清洗、器官分离等工作。用扫描仪对植株叶片进行扫描后,采用Win RHIZO软件分析获得叶片面积并计算叶面积指数(LAI)和叶日积指数(LAD)。

$LAI = \text{单株叶面积} \times \text{单位土地面积上的大豆株数} / \text{单位土地面积}$ (1)

$LAD = \frac{LAI_1 + LAI_2}{2} \times (t_2 - t_1)$ (2)

式中, LAI_1 、 LAI_2 分别为时间 t_1 、 t_2 时测定的叶面积指数($m^2 \cdot d$)。

1.3.2 叶绿素含量的测定 于大豆苗期、花期、结荚期、鼓粒期使用SPAD-502叶绿素仪选取顶端完全展开叶片进行大豆叶绿素含量的测定,每个处理测定3株。

1.3.3 光合指标的测定 于大豆苗期、花期、结荚期、鼓粒期在晴天9:00—11:00,各处理选择3株代表性植株,使用Li-6400光合仪(美国Li-COR公司)测定顶端叶片净光合速率(P_n)、气孔导度

(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(Tr),并计算叶片瞬时水分利用效率($WUE_{瞬}$)、内在水分利用效率($IWUE$)和羧化速率(CE)。

$$WUE_{瞬} = P_n / Tr \quad (3)$$

$$IWUE = P_n / G_s \quad (4)$$

$$CE = P_n / C_i \quad (5)$$

1.3.4 生物量的测定 于大豆收获期,选取各处理3株长势、性状均等的大豆植株,带回实验室人工分离各器官后置于 $105^\circ C$ 下杀青30 min, $80^\circ C$ 烘干至恒质量后,称量并计算。

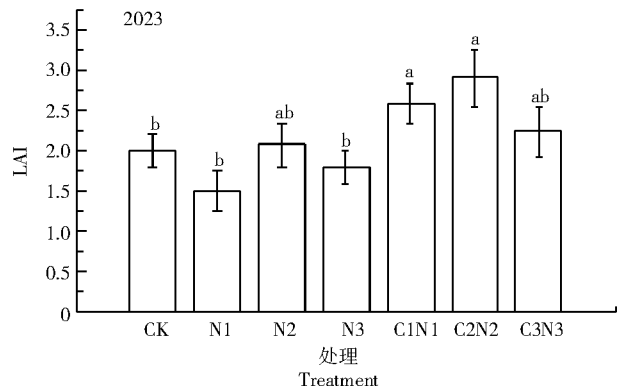
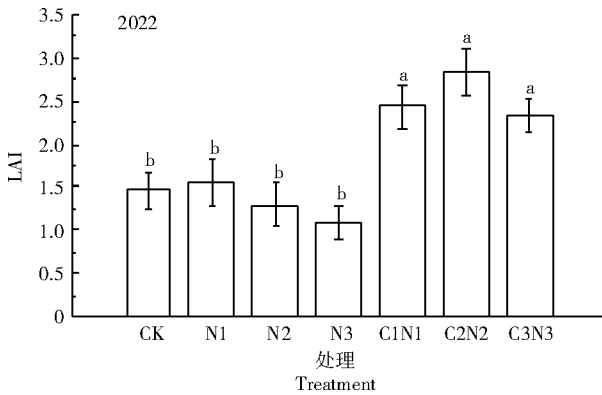
1.4 数据分析

采用Excel 2017进行数据整理,采用SPSS 17.0进行方差分析、Origin 2018制图。

2 结果与分析

2.1 不同炭氮配施对大豆花期和结荚期叶面积指数和叶日积指数的影响

2022—2023年花期大豆叶面积指数分析如图1、2所示。



不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。下图同

Different small letters indicated significant difference at $P < 0.05$ level among different treatments. The same as below

图1 2022—2023年花期大豆叶面积指数分析

Fig.1 Analysis of leaf area index of soybean at flowering stages from 2022 to 2023

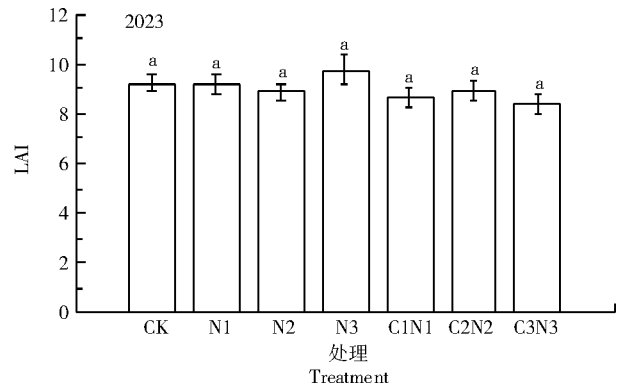
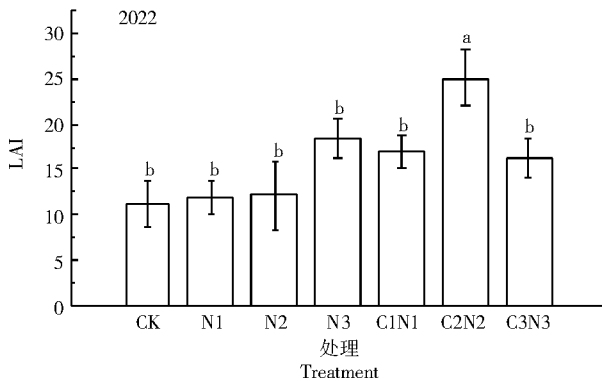


图2 2022—2023年结荚期大豆叶面积指数分析

Fig.2 Analysis of leaf area index of soybean at podding stages from 2022 to 2023

从图 1、2 可以看出,整体来看,2022—2023 年盆栽大豆花期、结荚期 LAI 在生物炭配施氮肥的处理组(C1N1、C2N2、C3N3)较单施氮肥的处理组(N1、N2、N3)对叶片形态指标的增加更明显。2022 年花期 C1N1、C2N2、C3N3 处理的 LAI 较 CK、N1、N2、N3 处理显著增加 158.91%~686.98% ($P < 0.05$); 同氮梯度下,施加生物炭的 C1N1 处理较 N1 处理、C2N2 处理较 N2 处理、C3N3 处理较 N3 处理的 LAI 分别显著增加 184.92%、348.03%、442.93% ($P < 0.05$)。2023 年花期 C1N1、C2N2 处理较 CK、N1、N3 处理的 LAI 增加 31.34%~92.01%。此外,结荚期仅 2022 年 C2N2 处理的 LAI 较其他 6 个处理显著增加 32.33%~126.24% ($P < 0.05$)。

由图 3、4 可知,2022 年花期 C1N1、C2N2 处理较其他 5 个处理的 LAD 分别显著增加 77.40%~169.19%、96.42%~198.04% ($P < 0.05$)。同氮梯度下,施加生物炭的 C1N1 处理较 N1 处理、C2N2 处

理较 N2 处理的 LAD 分别显著增加 77.40%、116.19% ($P < 0.05$)。结荚期生物炭配施氮肥的处理组(C1N1、C2N2、C3N3)较单施氮肥的处理组(N1、N2、N3)的 LAD 显著增加 33.01%~55.32% ($P < 0.05$)。2023 年花期 C3N3 处理较同氮梯度下 N3 处理的 LAD 显著增加 59.04% ($P < 0.05$), 结荚期施加生物炭的 C1N1 处理较同氮梯度下 N1 处理、C2N2 处理较 N2 处理、C3N3 处理较 N3 处理的 LAD 分别显著增加 41.30%、29.76%、49.58% ($P < 0.05$)。此外,2023 年花期 N3 处理较除 CK、C3N3 处理外其他 4 个处理的 LAD 显著降低 62.65%~85.54% ($P < 0.05$); 结荚期 N3 处理较不同施氮梯度 N1、N2 处理的 LAD 分别显著降低 22.34%、24.81% ($P < 0.05$)。结合 2 a 整个生育期来看,合理的炭氮配施(C2N2)可稳定促进不同生长阶段大豆叶面积指数、叶日积指数增加,C1N1 处理次之。

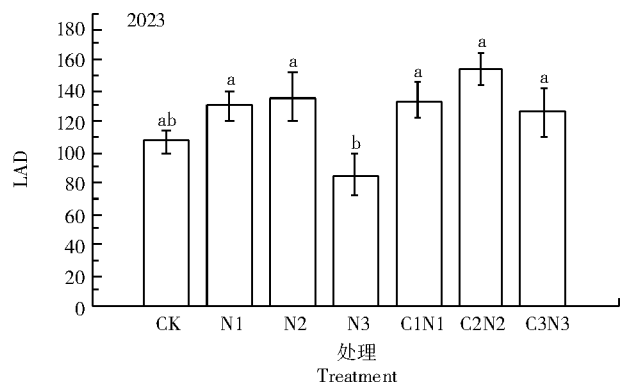
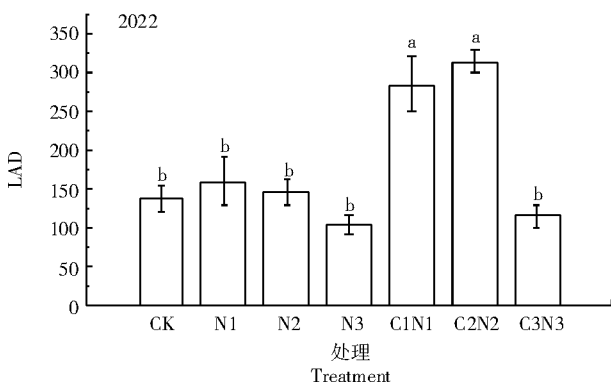


图 3 2022—2023 年花期大豆叶日积指数分析
Fig.3 Analysis of daily leaf volume index of soybean at flowering stages from 2022 to 2023

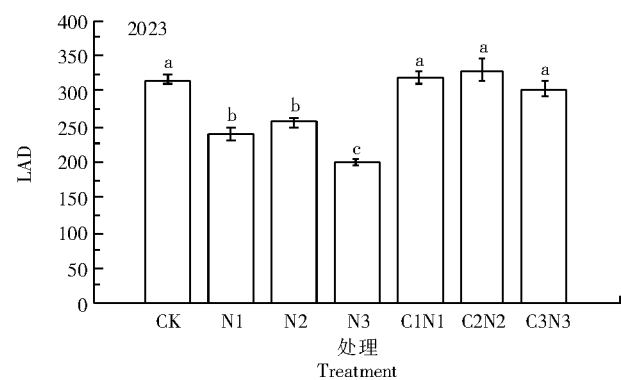
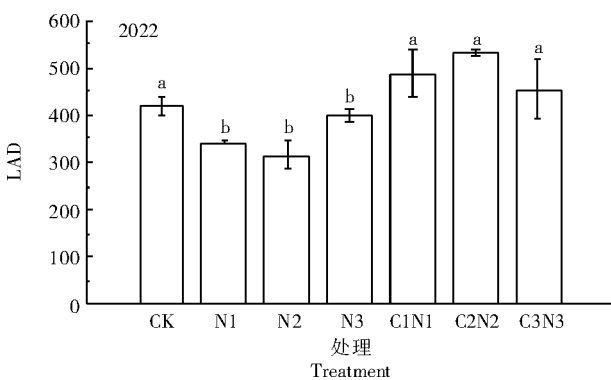


图 4 2022—2023 年结荚期大豆叶日积指数分析
Fig.4 Analysis of daily leaf volume index of soybean at podding stages from 2022 to 2023

2.2 不同炭氮配施对大豆不同生育期叶绿素含量的影响

整体来看,生物炭与氮肥的科学配施有效确保了 2022—2023 年整个生育期盆栽大豆叶片叶绿素含量(SPAD)的稳定性(图 5)。2022 年仅 N3 处理

在花期一鼓粒期间的 SPAD 较除 CK 外的其他 5 个处理显著低 8.14%~33.75% ($P < 0.05$)。此外,结荚期 CK 的 SPAD 较其他 6 个处理降低 4.18%~19.30%。2023 年苗期炭氮配施的处理组(C1N1、C2N2、C3N3)较单施氮肥的处理组(N1、N2、N3)

的 SPAD 显著降低 12.85%~28.49% ($P < 0.05$), 结荚期仅 C2N2 处理较其他 6 个处理的 SPAD 显著增加 9.75%~32.29% ($P < 0.05$), 花期和鼓粒期各处理间无显著差异。综合 2 a 生育期来看, 炭氮配施

的处理和单施氮肥的处理皆对调控盆栽大豆叶绿素含量稳定性和植株适应环境能力有提升作用, 仅个别时期炭氮配施处理组和单施氮肥处理组的叶绿素含量明显降低。

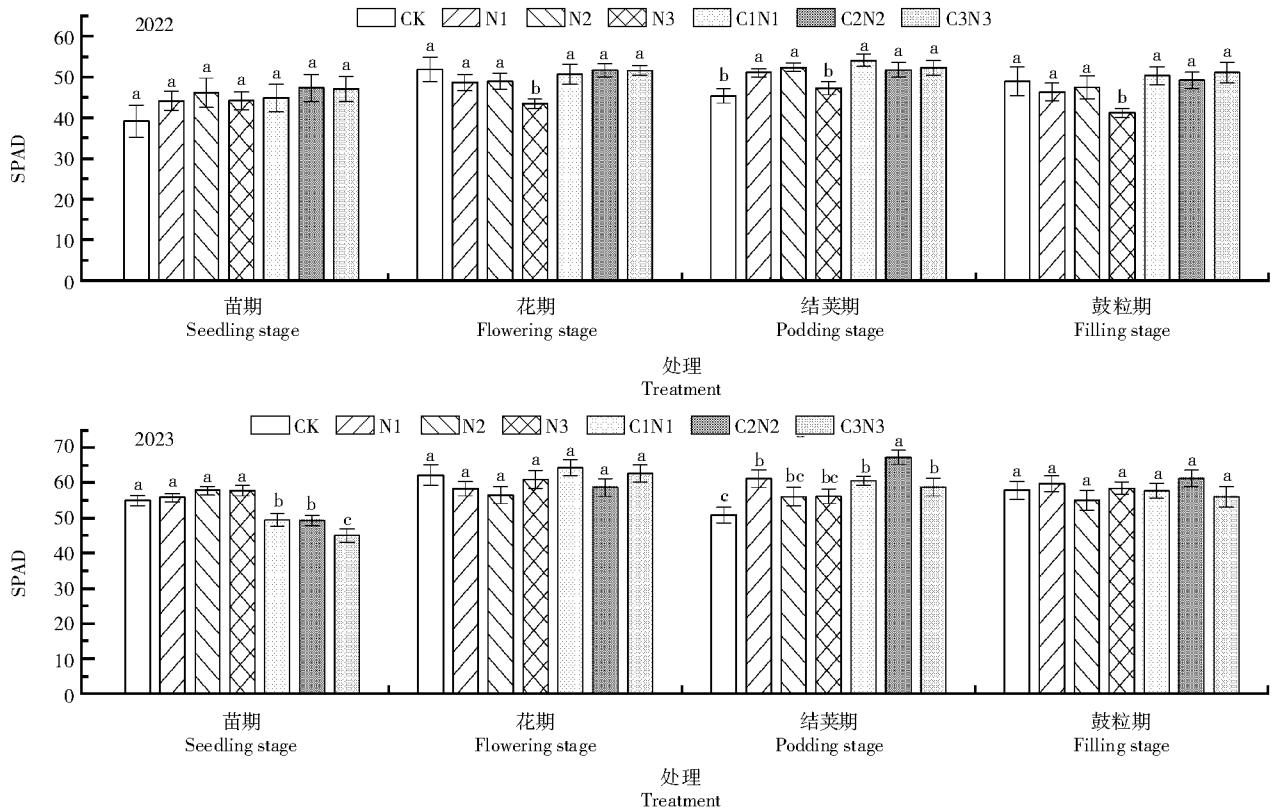


图 5 2022—2023 年不同生育期大豆的叶绿素含量分析
Fig.5 Analysis of chlorophyll content of soybean at different growth stages from 2022 to 2023

2.3 不同炭氮配施对大豆各生育期光合生理性能的影响

2.3.1 不同炭氮配施对大豆不同生育期瞬时水分利用效率的影响 2022、2023 年大豆叶片瞬时水分利用效率 ($WUE_{瞬}$) 在苗期—鼓粒期呈先减后增再减的趋势 (图 6)。2022 年各处理 $WUE_{瞬}$ 在花期时较苗期时减少了 43.36%~121.72%, 且处理间差异显著 ($P < 0.05$)。同氮梯度下, 苗期和花期施加生物炭的 C2N2 处理较 N2 处理的 $WUE_{瞬}$ 分别显著增加 14.12%、52.64% ($P < 0.05$), C3N3 处理的 $WUE_{瞬}$ 在苗期较 N3 处理显著增加 25.39% ($P < 0.05$)。结荚期处理间的 $WUE_{瞬}$ 无显著差异。结荚期—鼓粒期大豆进入生殖生长期, 光合作用减弱, $WUE_{瞬}$ 在鼓粒期各处理集体较结荚期减少 129.87%~203.52%, 处理间无显著差异。2023 年结荚期和鼓粒期各处理间 $WUE_{瞬}$ 差异显著, 仅 C2N2 处理较其他 6 个处理分别增加 6.40%~11.40%、13.36%~26.77% ($P < 0.05$)。综合 2 a 来

看, 整个生育期间仅 C2N2 处理能够持续性提高大豆的瞬时水分利用效率, 分别较同年的 CK 处理增加 8.71%~61.30%、46.03%~146.33%。

2.3.2 不同炭氮配施对大豆不同生育期内在水分利用效率的影响 2 a 的内在水分利用效率 (IWUE) 整体呈先增后减的趋势, 皆在结荚期达到 IWUE 峰值, 随后在鼓粒期大幅度降低 (图 7)。2022 年大豆的 IWUE 除结荚期外, 其他 3 个时期各处理间皆产生了显著差异 ($P < 0.05$)。同氮梯度下, 苗期施加生物炭 C1N1 处理的 IWUE 较 N1 处理显著增加 39.35% ($P < 0.05$), 但在鼓粒期 C1N1 处理的 IWUE 较 N1 处理显著减少 54.68% ($P < 0.05$)。花期 C2N2 处理的 IWUE 较 N2 处理显著增加 69.74% ($P < 0.05$), C3N3 处理的 IWUE 较 N3 处理显著增加 55.20% ($P < 0.05$)。2023 年仅鼓粒期 6 个施用处理较 CK 的 $WUE_{瞬}$ 显著增加 40.12%~61.02% ($P < 0.05$)。整体来看, 生物炭配施氮肥可有效调节气孔导度来减少叶片的蒸腾作用, 间接提高大豆

叶片光合速率,对盆栽大豆生长发育期间叶片内在 水分利用效率有积极作用。

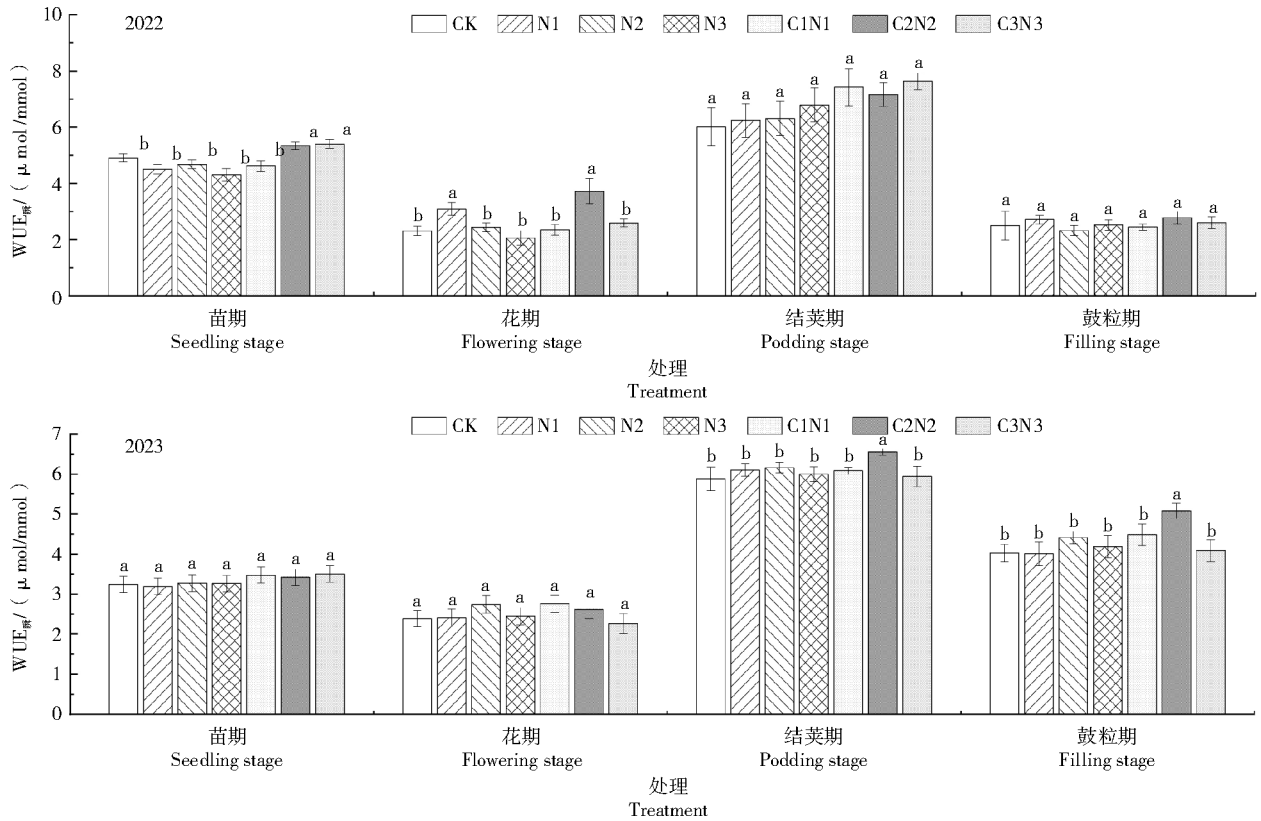


图 6 2022—2023 年不同生育时期大豆的瞬时水分利用效率分析
Fig.6 Analysis of instantaneous water use efficiency of soybean at different growth stages from 2022 to 2023

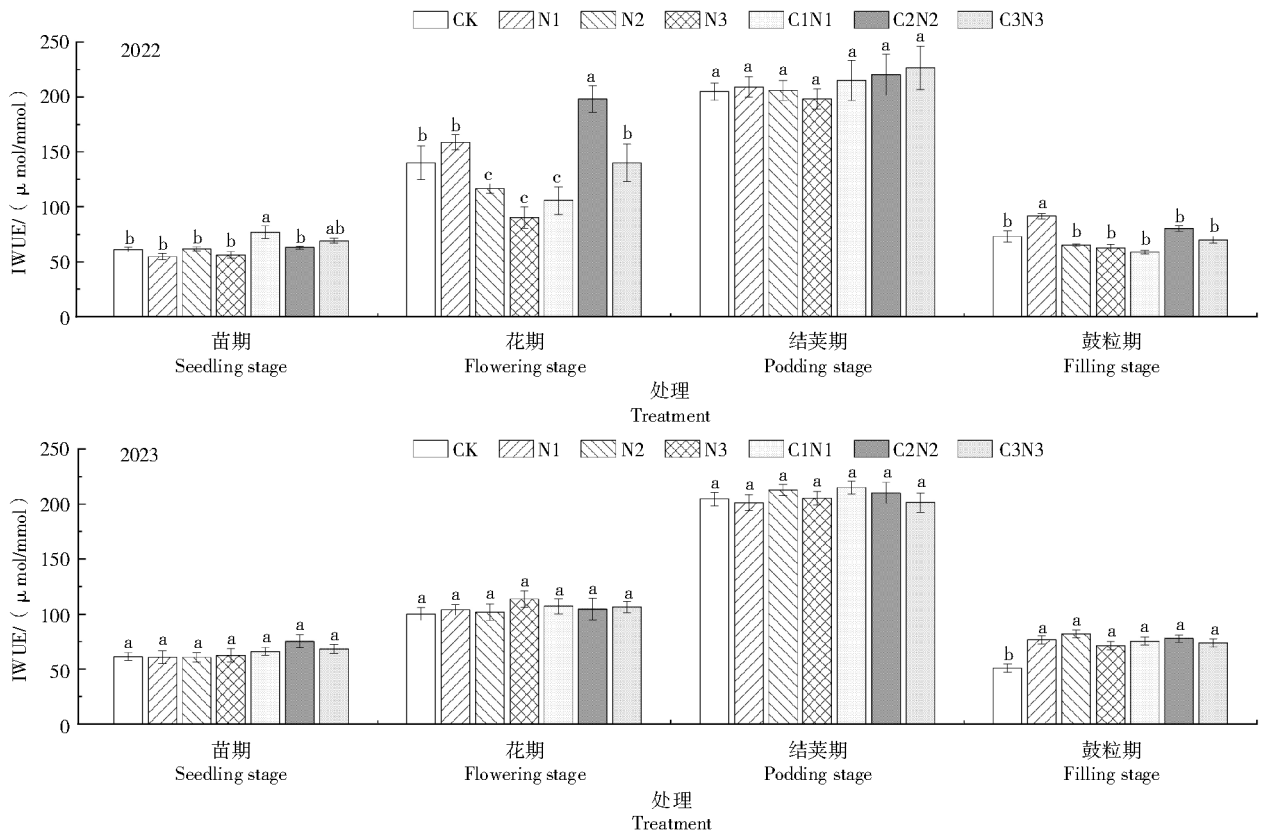


图 7 2022—2023 年不同生育时期大豆的内在水分利用效率分析
Fig.7 Analysis of intrinsic water use efficiency of soybean at different growth stages from 2022 to 2023

2.3.3 不同炭氮配施对大豆不同生育期羧化速率的影响 由图 8 可知,2022 年大豆叶片羧化速率(CE)在生殖生长最强的结荚期达到最高值后呈大幅度降低的趋势,而 2023 年整个生育期间各处理的 CE 整体趋于稳定。2022 年生物炭配施氮肥对盆栽大豆整个生育期叶片羧化速率的影响不显著,仅在结荚期施加生物炭 C2N2 处理的 CE 较其他 6 个处理显著增加 30.03%~77.27%($P<0.05$)。2023 年

花期 N1、N2、N3、C1N1 和 C2N2 处理的 CE 较 CK 和 C3N3 处理分别显著降低 24.62%~30.65%、43.86%~60.78% ($P<0.05$),结荚期其他 6 个处理的 CE 较 CK 降低 36.21%~54.90%,鼓粒期 N1 处理的 CE 达到最低,较其他 6 个处理显著降低 12.03%~32.78% ($P<0.05$)。综合 2 a 来看,炭氮配施与单施氮肥间对大豆叶片羧化速率的影响不显著。

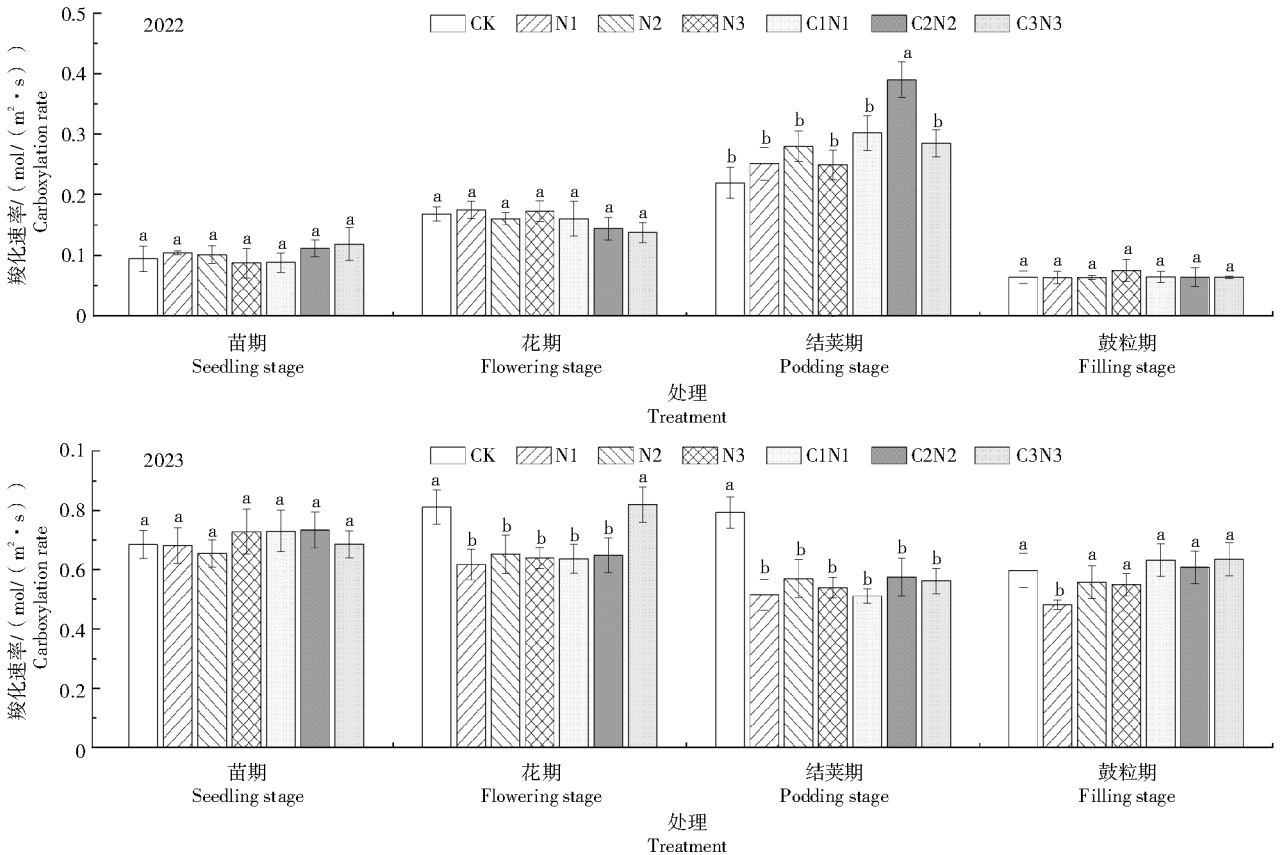


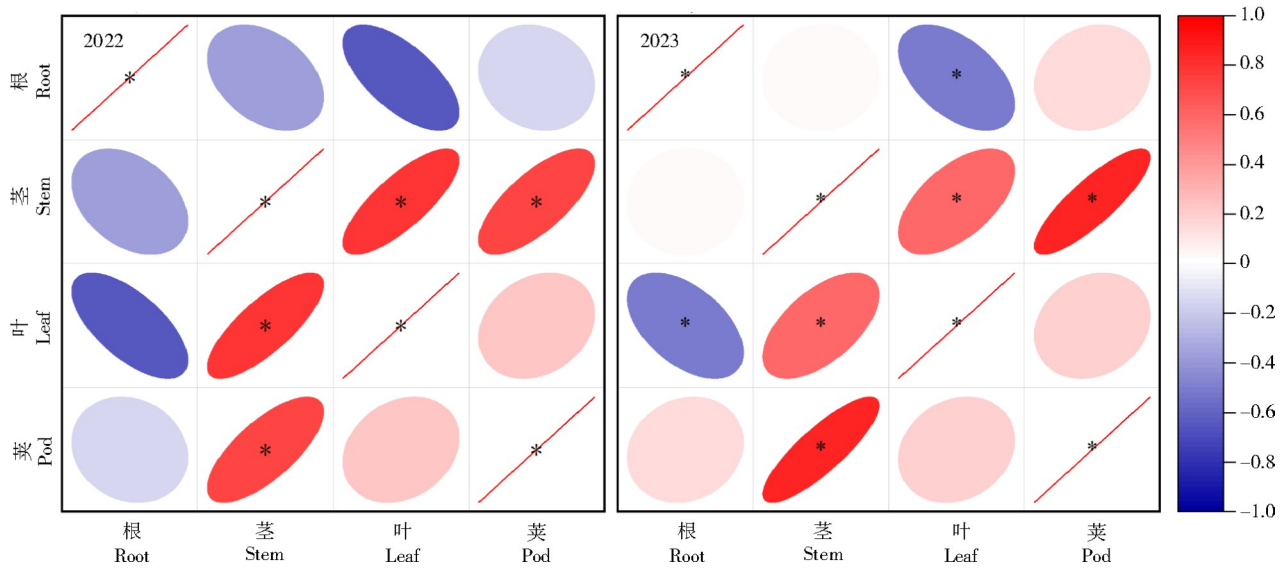
图 8 2022—2023 年不同生育时期大豆的羧化速率分析
Fig.8 Analysis of carboxylation rate of soybean at different growth stages from 2022 to 2023

2.4 不同炭氮配施对大豆鼓粒期干质量分配的影响与相关性分析

由图 9 可知,大豆茎与叶、荚间均呈显著正相关关系($P<0.05$)。此外,2023 年根与叶干质量间呈显著负相关关系($P<0.05$)。炭氮配施有效调控 2022—2023 年盆栽大豆各器官生物量向干质量积累(表 1、2)。

生物炭与氮肥的科学配比可显著增加大豆茎、叶和荚的生物量,尤其是同一氮梯度水平下添加生物炭的 C2N2 处理的茎、叶、荚干质量分别较未添加生物炭的 N2 处理分别增加 91.77%、428.71%、20.64% (2022 年) 和 18.29%、10.20%、16.67%(2023 年),较 CK 的茎、叶、荚干质量分别增

加 121.24%、137.33%、48.87%(2022 年)和 54.67%、16.27%、28.46% (2023 年) ($P<0.05$)。不同炭氮梯度的 C1N1 处理次之,茎和荚的干质量较 N1 显著增加 41.88%、22.46% (2022 年) ($P<0.05$),叶的干质量在 2023 年较 N1 增加 13.67%。C1N1 处理较 CK 的茎和荚干质量在 2022 年分别显著增加 74.96%、61.48%,2023 年叶的干质量较 CK 增加 17.85%。此外,2022 年不同炭氮配施梯度下 C2N2 处理的叶片干质量较 C1N1 处理显著增加 240.13% ($P<0.05$),较 C3N3 处理的茎、叶、荚干质量分别增加 96.77%、297.03%、11.61%。炭氮的科学配比能够均衡分配豆荚与地上部各器官间的物质资源,有助于大豆生育期间碳化合物的功能性合成。



*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关
* indicated the correlation was significant at the 0.05 level

图9 2022—2023年碳氮配施对鼓粒期大豆各器官干质量的相关性分析
Fig.9 Correlation analysis of combined application of carbon and nitrogen on dry weight of soybean organs at filling stage from 2022 to 2023

表1 2022年鼓粒期大豆各器官干质量分析
Tab.1 Analysis of dry weight of various organs of soybean at filling stage in 2022 g

处理 Treatment	根干质量 Root dry weight	茎干质量 Stem dry weight	叶干质量 Leaf dry weight	荚干质量 Pod dry weight
CK	7.31±1.61a	5.79±0.63b	4.50±0.88b	11.11±0.89b
N1	7.14±0.94a	7.14±1.41b	3.13±2.02b	14.65±0.53b
N2	7.58±1.44a	6.68±0.50b	2.02±0.57b	13.71±0.65b
N3	6.57±0.83a	6.83±0.50b	3.46±1.16b	15.51±0.20ab
C1N1	8.04±1.06a	10.13±1.83a	3.14±1.11b	17.94±2.11a
C2N2	5.15±0.31a	12.81±1.62a	10.68±3.47a	16.54±2.97a
C3N3	5.71±0.51a	6.51±1.21b	2.69±0.71b	14.82±0.57b

注:数据采用平均值±标准误差来表示;不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。
Note: Data were presented as mean±standard error, and different lowercase letters indicated significant differences between different treatments($P < 0.05$). The same as below.

表2 2023年鼓粒期大豆各器官干质量分析
Tab.2 Analysis of dry weight of various organs of soybean at filling stage in 2023 g

处理 Treatment	根干质量 Root dry weight	茎干质量 Stem dry weight	叶干质量 Leaf dry weight	荚干质量 Pod dry weight
CK	5.54±0.12 c	4.39±0.20 b	3.81±0.16 ab	11.28±0.36 b
N1	6.61±0.08 ab	5.09±0.30 ab	3.95±0.18 ab	12.25±1.08 ab
N2	7.77±0.73 a	5.74±0.62 ab	4.02±0.27 ab	12.42±0.58 ab
N3	5.80±0.09 bc	4.14±0.19 b	4.26±0.11 ab	11.84±1.82 ab
C1N1	6.73±0.41 ab	5.15±0.16 ab	4.49±0.27 a	12.84±1.09 ab
C2N2	6.48±0.56 bc	6.79±0.78 a	4.43±0.37 a	14.49±1.41 a
C3N3	5.70±0.05 bc	4.92±0.19 ab	4.45±0.10 a	11.97±0.58 ab

3 结论与讨论

适宜的水分和养分环境是保障作物形态构建与生殖生产的必要条件^[13-14]。在生长发育期间,作

物通过植株的茎向各器官运输养分^[15-16],茎的干质量与叶、荚的干质量呈显著正相关,印证了茎-叶与茎-荚之间具有紧密的关联性这一观点。科学施肥能有效提高作物茎、叶器官对营养物质的获取能

力,通过调节作物光合性能与生物量积累再分配的互促机制来激发作物的产量潜力^[16-17]。有研究发现,生物炭独特的结构与其他肥料配施可保障植株生育期间对养分的吸收、运移,促进碳水化合物化合物的生成与积累^[16,18-19]。本研究发现,同一氮肥梯度下C2N2处理较未添加生物炭的N2处理可实现大豆总干质量最大化的增幅,2022、2023年分别增加50.70%、7.48%。但随着肥料施入量的增加,高炭高氮C3N3处理的干质量减少,2022、2023年分别较C2N2处理降低51.97%、19.05%。这与刘明等^[20]得出的结论一致,科学的炭氮配比才能够有效提高氮肥的利用率,调控不同生育期间叶片的光合性能,进一步加速促进大豆生物量的积累与转换;而过量的炭、氮施入抑制植株器官的生理功能,大大减少光合产物进一步向生物量的转换。本研究中,2022年结荚期C3N3处理的羧化速率、2023年瞬时水分利用效率与羧化速率皆显著降低,表明大豆光合作用减弱进而导致鼓粒期植株生物量积累减少,这也表明过量的炭氮配施会限制盆栽大豆的生理生长,使植株生物量转换受到制约。

叶片是调节植株生长发育的重要器官,叶面积指数(LAI)和叶日积指数(LAD)是反映植株群体生长状况的关键指标^[18-19,21]。段建军等^[22]发现,生物炭与氮肥间的互作机制可促进大豆叶片的生长,并提高叶片对外界光能的吸收与转换速率,有利于作物后期碳水化合物的高效积累。本研究同样发现,炭氮配施的施肥模式可有效调节花期的LAI和结荚期的LAD。2022、2023年花期炭氮配施C1N1、C2N2处理的LAI较单施氮肥的N1、N2、N3处理分别增加92.31%~348.03%、43.28%~76.10%,结荚期炭氮配施(C1N1、C2N2、C3N3)处理的LAD的较单施氮肥的(N1、N2、N3)处理分别增加33.01%~55.32%、29.76%~49.58%。因此,可以推断,炭氮配施具有提高大豆叶面积和叶日积的效果。

光合作用对维持植株正常生理活动以及合成碳水化合物具有重要作用^[23-24]。盆栽大豆自身形成封闭环境,植株生长向下争夺盆内的土壤水肥资源,向上通过光合作用竞争光能,以此来实现生物量的高效转化^[25-27]。炭氮配施可有效增加叶绿素合成并协调茎、叶器官捕获光源,为最终大豆生物量的高效积累提供充足的物质能量^[27-29]。本研究结果表明,C1N1、C2N2、C3N3处理不仅增加了叶绿素含量还显著增加了大豆光合性能,尤其是C2N2处

理。2022、2023年整个生育期C2N2处理的叶绿素含量增加分别为-3.99%~20.98%、-17.35%~32.31%。2022年花期C2N2的瞬时水分利用效率与内在水分利用效率分别较其他处理增幅20.39%~80.58%、24.87%~119.71%,同年结荚期的羧化速率和2023年结荚期的瞬时水分利用效率较其他处理分别显著增加29.16%~77.42%、6.33%~11.39%。气孔是进行叶片与外界气体交换、提高光合速率的重要生理器官,结荚期大豆进行生理活动作用强,但2022、2023年结荚期炭氮配施的处理间无显著差异。猜测是受生育期气候环境的变化,温度增加使生物炭周围的微生物活性降低,削弱了生物炭与植株间的联系^[30-32],从而导致结荚期C1N1、C2N2、C3N3处理对内在水分利用效率的提升作用不显著。

综合考虑生物炭配施氮肥在C2N2处理(氮肥630 kg/hm²,稻壳炭1998 kg/hm²)下,干物质积累、叶片形态及光合作用的提升效果最佳。2022、2023年总干质量C2N2处理较CK分别增加57.37%、28.66%;叶面积指数较CK分别增加84.56%~126.24%、-2.4%~44.0%;叶日积指数分别增加29.26%~137.86%、4.84%~37.61%;瞬时水分利用效率、内在水分利用效率、羧化速率较CK分别增加8.51%~25.81%、0.25%~32.83%、-4.06%~77.27%(2022年)和6.40%~8.88%、2.51%~49.73%、-65.21%~12.30%(2023年)。但考虑到盆栽试验与田间环境差距较大,田间试验施用生物炭、氮肥对土壤生产力、植株生理特性的提升作用还需进一步探究,以此为大豆绿色高产的栽培技术提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 胡基华,张焯,张淑梅,等.微生物菌肥对寒地大豆根际土壤真菌多样性的影响[J].大豆科学,2021,40(6):805-812.
HU J H, ZHANG Y, ZHANG S M, et al. Effects of microbial fertilizer on fungal diversity of soybean rhizosphere soil in cold region[J]. Soybean Science, 2021, 40(6): 805-812.
- [2] 王小林,张盼盼,张静,等.黄土塬区施肥模式对大豆根系形态构建及产量形成的调控作用[J].大豆科学,2021,40(6):813-820.
WANG X L, ZHANG P P, ZHANG J, et al. Regulating effects of fertilizing models on root morphological restructure and yield formation of soybean in loess arid region of China[J]. Soybean Science, 2021, 40(6): 813-820.
- [3] 成璐,董铮,李魏,等.大豆根腐病研究进展[J].中国农学通报,2016,32(8):58-62.
CHENG R, DONG Z, LI W, et al. Research progress of soy-

- bean root rot[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(8):58-62.
- [4] 方静,赵小庆,史功赋,等. 农作物根际微生物的研究进展[J]. 北方农业学报, 2019, 47(4):102-107.
FANG J, ZHAO X Q, SHI G F, et al. Research progress on rhizosphere microorganisms of crops[J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(4):102-107.
- [5] 王小林,张盼盼,纪晓玲,等. 黄土塬区施肥策略对大豆生物量分配及转化积累的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(33):23-29.
WANG X L, ZHANG P P, JI X L, et al. Fertilizer proportions in the Loess Hilly region: effects on biomass distribution, transformation, and accumulation of soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(33):23-29.
- [6] 彭伟正,刘璐,杨斌,等. 不同营养环境条件下铜、锌、锰等二价金属营养元素对水稻吸收运转的调控[J]. 激光生物学报, 2018, 27(5):474-480.
PENG W Z, LIU L, YANG B, et al. The regulation effect of divalent metal micronutrient elements including Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} on Cd accumulation in rice plant in different nutritional environments[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2018, 27(5):474-480.
- [7] 王亚男,许静,郝利君,等. 修复剂对镉污染盐渍化土壤植物修复效率的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(2):464-475.
WANG Y N, XU J, HAO L J, et al. Effects of soil remediation agents on the phytoremediation efficiency of cadmium-polluted salinized soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2):464-475.
- [8] ZHENG B C, CHEN P, DU Q, et al. Soil organic matter, aggregates, and microbial characteristics of intercropping soybean under straw incorporation and N input[J]. Agriculture, 2022, 12(9):1409.
- [9] 胡丹丹,纪柒云,刘琳琳,等. 生物炭配施氮肥对谷子营养生长期光合生理及生物量分配的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(3):285-292.
HU D D, JI Q Y, LIU L L, et al. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on photosynthetic physiology and biomass allocation of millet during vegetative growth period[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(3):285-292.
- [10] 王聪,赵连佳,张建勋,等. 春大豆鼓粒期冠层翻叶原因及翻叶对叶片净光合速率和粒重的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(33):38-44.
WANG C, ZHAO L J, ZHANG J X, et al. Canopy leaf turning of spring soybean at seed-filling stage: reasons and effects on net photosynthetic rate and grain weight[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(33):38-44.
- [11] 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.
- [12] 宋世龙,杨卫君,陈雨欣,等. 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3):311-320.
SONG S L, YANG W J, CHEN Y X, et al. Effect of reduced nitrogen fertilizer combined with biochar on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution, and yield of spring wheat in irrigated area of northern Xinjiang[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(3):311-320.
- [13] 张珂珂,宋晓,郭斗斗,等. 生物炭对潮土土壤肥力特征和氮肥利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12):73-80.
ZHANG K K, SONG X, GUO D D, et al. Effects of biochar on fertility and nitrogen utilization efficiency in fluvo-aquic soil [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(12):73-80.
- [14] 张伟明,陈温福,孟军,等. 东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14):2406-2424.
ZHANG W M, CHEN W F, MENG J, et al. Study of straw-biochar on utilization potential, industry model and developing strategy in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(14):2406-2424.
- [15] UNKOVICH M J, PATE J S. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N_2 fixation by annual legumes[J]. Field Crops Research, 2000, 65(2-3):211-228.
- [16] 尚晶涛,吴荣,曹梦琳,等. 生物质炭与氮肥配施对土壤养分和谷子生长的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(6):1451-1456.
SHANG J T, WU R, CAO M L, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on soil nutrients and millet growth[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(6):1451-1456.
- [17] 倪丽,章建新,金加伟,等. 氮肥施用对高产大豆根系、干物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(2):36-39.
NI L, ZHANG J X, JIN J W, et al. Effect of nitrogen on root system, dry matter accumulation and yield of high yield soybean [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2004, 27(2):36-39.
- [18] 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):285-294.
- [19] 胡志辉,汪艳杰,张丽琴. 菜用大豆施肥后荧光、光谱、光合等参数对产量的预测[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8):1355-1362.
HU Z H, WANG Y J, ZHANG L Q. Prediction of vegetable soybean yield with fluorescence, spectra, photosynthetic parameters after fertilization[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(8):1355-1362.
- [20] 刘明,来永才,李炜,等. 生物炭与氮肥施用量对大豆生长发育及产量的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(1):87-92.
LIU M, LAI Y C, LI W, et al. Effect of biochar and nitrogen application rate on growth development and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2015, 34(1):87-92.
- [21] 陈洪鹏,于春晓,王光美,等. 生物炭和双氧胺对滨海盐碱土氮素转化及大豆氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 21(2):1-11.
CHEN H P, YU C X, WANG G M, et al. Effects of biochar

- and dicyandiamide on nitrogen transformation in coastal saline-alkali soil and nitrogen uptake and utilization by soybean[J]. *Journal of Ecology*, 2024, 21(2): 1-11.
- [22] 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 and Water Conservation*, 2022, 36(6): 298-308.
- [23] 牟保民,刘雅,郑殿峰,等. 不同时期高氮施肥对大豆光合生理特性及产量的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(6): 7-13.
MU B M, LIU Y, ZHENG D F, et al. Effects of high nitrogen fertilization at different stages on photosynthetic physiological characteristics and yield of soybean[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2021, 33(6): 7-13.
- [24] 任廷虎,李宗尧,杜斌,等. 有机肥施用及合理密植提高黄淮海地区夏大豆光系统性能与籽粒产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1361-1375.
REN T H, LI Z Y, DU B, et al. Improving photosynthetic performance and yield of summer soybean by organic fertilizer application and increasing plant density[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1361-1375.
- [25] 吴嘉楠,闫海涛,彭桂新,等. 生物质炭与氮肥配施对土壤氮素变化和烤烟氮素利用的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 256-263.
WU J N, YAN H T, PENG G X, et al. Effects of biochar addition combined with nitrogen fertilizer on soil nitrogen and nitrogen utilization of flue-cured tobacco[J]. *Soils*, 2018, 50(2): 256-263.
- [26] 郭建秋,晏云,李林,等. 间作对大豆形态、光合荧光特性、农艺性状、产量及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(2): 112-117.
GUO J Q, YAN Y, LI L, et al. Influences of intercropping on morphology, photosynthetic fluorescence characteristics, agronomic traits, yield, and quality of soybean[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(2): 112-117.
- [27] 李勇. 氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
LI Y. Studies on mechanisms of the effects of different nitrogen supplies on photosynthesis and photosynthetic nitrogen use efficiency of rice plants[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [28] 李杰,吴荣,尚晶涛,等. 生物质炭与氮肥配施对谷子光合色素和保护酶的影响[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(3): 383-386.
LI J, WU R, SHANG J T, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on photosynthetic pigment and protective enzyme of millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(3): 383-386.
- [29] 马瑞琦,陶志强,王德梅,等. 追氮量对不同试点小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(6): 1281-1293.
MA R Q, TAO Z Q, WANG D M, et al. Effects of topdressing nitrogen rate on photosynthetic characteristics and yield of flag leaves of wheat in different regions[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(6): 1281-1293.
- [30] SPOKAS K A, NOVAK J M, VENTEREA R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1): 35-42.
- [31] 张立军,孙旭刚,王昌陵,等. 盆栽条件下水肥调控对大豆生长和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2014, 33(3): 398-403.
ZHANG L J, SUN X G, WANG C L, et al. Regulation effect of water and fertilizer on growth and yield in soybean under pot experiment condition[J]. *Soybean Science*, 2014, 33(3): 398-403.
- [32] 孙安妮,贺明慧,李玥,等. 干旱胁迫和复水对大豆开花期光合特性及叶绿素荧光的影响[J]. *分子植物育种*, 2014, 22(2): 1-9.
SUN A N, HE M H, LI Y, et al. Effects of drought stress and rewatering on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence at flowering stage in soybean[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2014, 22(2): 1-9.