

崔文芳,秦德志,陈静,等. 氮肥配施生物炭对玉米与大豆间作模式作物干物质及氮养分积累特性的影响[J]. 江苏农业学报,2025,41(8):1508-1516.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.08.007

## 氮肥配施生物炭对玉米与大豆间作模式作物干物质及氮养分积累特性的影响

崔文芳<sup>1</sup>, 秦德志<sup>1</sup>, 陈静<sup>1</sup>, 刘剑<sup>1</sup>, 王彦平<sup>2</sup>, 秦丽<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学,内蒙古 呼和浩特 010018; 2.呼伦贝尔市气象局,内蒙古 呼伦贝尔 021008)

**摘要:** 研究氮肥搭配生物炭施用对玉米与大豆间作群体干物质积累和氮素利用率的影响,对实现玉米与大豆间作高产稳产具有重要实践意义。本研究设计3种植模式,分别是玉米单作(M)、大豆单作(S)、玉米与大豆间作(I),结合氮肥3个施用梯度(165 kg/hm<sup>2</sup>、210 kg/hm<sup>2</sup>、255 kg/hm<sup>2</sup>)和生物炭3个施用梯度(2 t/hm<sup>2</sup>、4 t/hm<sup>2</sup>、6 t/hm<sup>2</sup>),采用正交试验设计,探究不同种植模式下氮肥与生物炭配施的最佳组合及其对作物干物质积累和氮素利用率的影响。结果表明,在氮肥与生物炭配施的9个处理中,IN3C2组合(即玉米与大豆间作模式下氮肥施用量255 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量4 t/hm<sup>2</sup>)表现更优,玉米和大豆综合产量达13 395 kg/hm<sup>2</sup>。IN3C2处理有效缓解了间作对玉米干物质积累和氮积累的负面影响,虽然干物质积累量显著低于玉米单作模式,但玉米单株氮积累量较单作显著提高42.42%( $P<0.05$ ),氮素吸收能力优势凸显。综上,氮肥合理配施生物炭能够促进间作玉米植株氮素积累,提高氮肥利用效率,实现减氮增效目标。

**关键词:** 玉米; 大豆; 间作; 氮肥; 生物炭; 产量

中图分类号: S513;S565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)08-1508-09

## Effects of combined application of nitrogen fertilizer and biochar on dry matter and nitrogen nutrient accumulation characteristics in maize-soybean intercropping patterns

CUI Wenfang<sup>1</sup>, QIN Dezhi<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, WANG Yanping<sup>2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>

(1.Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Hulunbuir Meteorological Bureau, Hulunbuir 021008, China)

**Abstract:** The study on the effects of combined application of nitrogen fertilizer and biochar on dry matter accumulation and nitrogen use efficiency in maize-soybean intercropping systems is of great practical significance for achieving high and stable yields in maize-soybean intercropping. This study designed three planting patterns: maize monoculture (M), soybean monoculture (S), and maize-soybean intercropping (I), combined with three application gradients of nitrogen fertilizer (165 kg/hm<sup>2</sup>, 210 kg/hm<sup>2</sup>, 255 kg/hm<sup>2</sup>) and three application gradients of biochar (2 t/hm<sup>2</sup>, 4 t/hm<sup>2</sup>, 6 t/hm<sup>2</sup>).

收稿日期:2024-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(32160506);内蒙古自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX201314)

作者简介:崔文芳(1977-),女,内蒙古呼伦贝尔人,博士,教授,主要从事玉米高产氮高效利用研究。(E-mail) cui.wenfang@163.com

通讯作者:王彦平,(E-mail) fei\_ping@sohu.com

An orthogonal experimental design was adopted to explore the optimal combination of nitrogen fertilizer and biochar application under different planting patterns and their effects on crop dry matter accumulation and nitrogen use efficiency. The results showed that among the nine treatments combining nitrogen fertilizer and biochar application, the IN3C2 combination (maize-soybean intercropping

with a nitrogen fertilizer application rate of 255 kg/hm<sup>2</sup> and a biochar application rate of 4 t/hm<sup>2</sup>) demonstrated superior performance, achieving a combined maize-soybean yield of 13 395 kg/hm<sup>2</sup>. The IN3C2 treatment effectively alleviated the negative effects of intercropping on dry matter accumulation and nitrogen accumulation in maize. Although the dry matter accumulation in maize under intercropping mode was significantly lower than that under monoculture mode, the nitrogen accumulation per plant in maize was significantly increased by 42.42% compared with monoculture ( $P < 0.05$ ), highlighting the advantage of nitrogen absorption capacity. In conclusion, the combined application of nitrogen fertilizer and biochar can promote nitrogen accumulation in intercropped maize plants, improve nitrogen use efficiency, and achieve the goal of nitrogen reduction and efficiency enhancement.

**Key words:** maize; soybean; intercropping; nitrogen fertilizer; biochar; yield

内蒙古河套灌区作为重要的粮油作物生产基地,当前面临传统间作模式产量偏低、氮素利用效率不高等困境。发展玉米与大豆间作模式是实现时空集约化、高效利用资源的有效路径。在间作体系中,种间氮营养互补机制能够在不降低作物产量的前提下,实现较高的氮素积累量<sup>[1]</sup>。研究表明,玉米与大豆间作能有效提高氮素积累量和氮肥利用率<sup>[2]</sup>,其氮素积累量显著高于单作模式<sup>[3]</sup>,且根系交互可以进一步提升植株地上部的氮素积累量<sup>[4]</sup>。依据氮转移理论,具有固氮能力的豆科作物会将氮素转移至与其间作的非豆科作物,从而增加后者的氮素积累量。例如,朱锦惠等<sup>[5]</sup>研究发现,小麦与蚕豆间作,蚕豆会将其吸收氮素量的5%转移至小麦,显著提升小麦对氮素的积累量。王雪蓉等<sup>[6]</sup>对玉米与大豆间作模式下不同施氮量的研究表明,间作模式与单作模式相比,施氮与不施氮处理相比均可提高体系的氮素吸收总量,其中160 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平下间作体系的养分优势最为明显。刘颖等<sup>[7]</sup>的研究结果表明,玉米对花生种植带土壤氮素的竞争吸收能增强花生的生物固氮能力,提升玉米与花生间作体系的氮素利用率。针对单作玉米的研究结果显示,在氮肥减量与生物炭配施条件下,可实现节氮30%~45%,氮高效玉米品种的氮利用效率提升52.78%~93.33%<sup>[8]</sup>。段建军等<sup>[9]</sup>对贵州黄壤稻田的研究结果表明,减施氮肥并配合施用生物炭可显著提高氮肥利用率,建议在常规施肥量基础上氮磷钾减量19.00%~24.60%,生物炭施用量为5.00~6.25 t/hm<sup>2</sup>。杨欢等<sup>[10]</sup>对玉米与大豆套作体系的研究发现,该体系氮吸收总量比相应单作提高32.60%~54.22%;氮吸收效率对土地当量比的贡献为0.34~0.62,利用效率贡献为-0.11~-0.35。然而,张晓娜等<sup>[11]</sup>研究发现,玉米与大豆间作模式下玉米的氮素积累量比单作降低了20.5%,大豆的氮

素积累量较单作模式降低了28.5%,氮营养竞争比率表现为玉米强于大豆。此外,燕麦和花生间作系统的研究结果表明,在共生期花生向燕麦的氮素转移达21.4%,实现了禾豆间作体系对氮素的高效利用<sup>[12]</sup>。综上所述,多数研究结果表明,间作体系的氮素积累量明显高于单作,但在氮利用效率方面,研究结论存在分歧。特别是在减氮结合生物炭调控下,玉米与大豆间作体系的氮利用效率和干物质积累变化规律尚未得到充分研究。因此,本研究以解决内蒙古河套灌区长期漫灌导致的土壤质量下降问题为目标,基于水肥一体化技术开展玉米与大豆间作,致力于提高氮利用效率,实现产量与效率的协同提升,为河套灌区发展氮肥节约型玉米与大豆间作种植技术提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验田概况

试验于2022年4~10月在内蒙古农业大学试验基地进行。该基地年平均气温7.5℃,7月平均气温22.9℃,无霜期135d左右,年日照时数平均为3 095 h,年降水量平均为346 mm。试验地土壤类型为壤土,pH值为7.6,有机质含量24.65 g/kg,碱解氮含量41.56 mg/kg,速效磷含量8.19 mg/kg,速效钾含量74.98 mg/kg。

### 1.2 试验材料

供试玉米品种为真金308,植株高度1.70~1.80 m,具有耐密、抗倒、宜机收等特点。大豆品种为中黄30,有限结荚习性,平均株高63.80 cm。

### 1.3 试验设计

采用3因素试验方法,分别是种植模式(A因素)、氮素用量(B因素)、生物炭用量(C因素)。种植模式为玉米单作(M)、大豆单作(S)、玉米与大豆间作(I),氮素用量(纯氮)分别为165 kg/hm<sup>2</sup>、210 kg/hm<sup>2</sup>、255

kg/hm<sup>2</sup>,生物炭用量分别为 2 t/hm<sup>2</sup>、4 t/hm<sup>2</sup>、6 t/hm<sup>2</sup>,采取正交试验设计方案<sup>[13]</sup>,如表 1 所示。

#### 1.4 测定方法与计算公式

1.4.1 测定指标与方法 分别在玉米大喇叭口期、吐丝期、成熟期,大豆开花期、始荚期、成熟期测定干物质质量及氮含量,收获期分别测定玉米和大豆产量,具体方法参照文献[14]。

1.4.2 计算公式 氮效率(NUE)=产量/供氮量,供氮量为耕层土壤氮与施氮量之和<sup>[15]</sup>;氮吸收效率(NupE)=植株总吸氮量/供氮量,植株总吸氮量包括土壤氮和肥料氮;氮利用效率(NutE)=产量/植株总吸氮量;地上部营养体氮素转移量=营养体最高氮积累量-成熟期营养体氮积累量;氮收获指数=籽粒氮积累总量/植株氮积累总量。

#### 1.5 数据分析

采用 Excel 2013 进行数据整理,用 DPS 9.5 软件进行正交试验方差分析,并在 0.05 水平进行多重比较。

表 1 正交试验设计及各处理施肥量

Table 1 Orthogonal experimental design and fertilizer application rate of each treatment

A 因素	B 因素 (kg/hm <sup>2</sup> )	C 因素 (t/hm <sup>2</sup> )	处理 编号
玉米单作	165	2	MN1C1
玉米单作	210	4	MN2C2
玉米单作	255	6	MN3C3
大豆单作	165	4	SN1C2
大豆单作	210	6	SN2C3
大豆单作	255	2	SN3C1
间作	165	6	IN1C3
间作	210	2	IN2C1
间作	255	4	IN3C2

MN1C1:玉米单作种植模式氮肥施用量(纯氮)为 165 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 2 t/hm<sup>2</sup>,MN2C2:玉米单作种植模式氮肥施用量(纯氮)为 210 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>,MN3C3:玉米单作种植模式氮肥的施用量(纯氮)为 255 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭的施用量为 6 t/hm<sup>2</sup>,SN1C2:大豆单作模式氮肥施用量(纯氮)为 165 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>,SN2C3:大豆单作模式氮肥施用量(纯氮)为 210 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 6 t/hm<sup>2</sup>,SN3C1:大豆单作模式氮肥施用量(纯氮)为 255 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 2 t/hm<sup>2</sup>,IN1C3:玉米与大豆间作模式氮肥施用量(纯氮)为 165 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 6 t/hm<sup>2</sup>,IN2C1:玉米与大豆间作模式氮肥施用量(纯氮)为 210 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 2 t/hm<sup>2</sup>,IN3C2:玉米与大豆间作模式氮肥施用量(纯氮)为 255 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥配施生物炭对不同种植模式下作物产量的影响

氮肥搭配生物炭对不同种植模式作物产量的影

响如表 2 所示,3 个试验因素的重要程度依次为种植模式、生物炭施用量、氮肥施用量。9 个处理中,MN2C2 处理单位面积产量最高,其次是 MN3C3 处理,二者之间无显著差异;MN1C1 处理位列第 3,与间作 IN3C2 处理之间无显著差异,但均显著高于 SN1C2 处理、SN2C3 处理、SN3C1 处理、IN1C3 处理、IN2C1 处理。A 因素的 3 个水平间产量达到显著差异,第 1 水平最高,其次是第 3 水平;B 因素的第 2 水平产量和第 3 水平之间无显著差异,二者均显著高于第一水平;C 因素 3 个水平间产量差异显著,第 2 水平显著高于第 3 水平和第 1 水平。因此,最优方案为 A、B、C 因素的第 1 水平、第 2 水平、第 2 水平,即 MN2C2 处理试验效果最好,即玉米单作种植模式下氮肥施用量为 210 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>。

对间作体系各指标的差异性分析结果如表 3 所示,种植模式、氮肥施用量、生物炭用量各因素及因素间互作效应对间作体系的干物质积累量、氮积累量、氮利用效率、氮效率、氮收获指数、籽粒氮含量及营养体氮向籽粒转移量的作用均达到显著水平( $P < 0.05$ ),种植模式、氮肥施用量、生物炭施用量对产量的作用显著( $P < 0.05$ ),各因素间互作效应对产量的作用不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.2 氮肥配施生物炭对不同种植模式玉米干物质积累和氮积累的影响

以产量表现相对较好的玉米单作模式 MN2C2 处理与 3 个间作模式处理(IN1C3、IN2C1、IN3C2)玉米各生育期干物质积累量进行比较,结果如图 1 所示,单作模式与间作模式相比平均单株玉米干物质积累量存在较大差异。玉米大喇叭口期 MN2C2 处理平均单株干物质积累量显著高于 3 个间作处理( $P < 0.05$ );吐丝期 MN2C2 处理平均单株玉米干物质积累量显著高于 IN1C3 处理和 IN2C1 处理( $P < 0.05$ ),间作 IN3C2 处理与单作 MN2C2 处理之间差异不显著( $P > 0.05$ );成熟期 MN2C2 处理平均单株玉米干物质积累量显著高于 3 个间作处理( $P < 0.05$ ),表现为 MN2C2>IN3C2>IN1C3>IN2C1,间作 3 个处理相比,IN3C2 处理干物质积累量最高,但较单作 MN2C2 处理仍显著降低 17.07%。由此可见,间作能使玉米的干物质积累显著降低,但 IN3C2 处理较 IN2C1、IN1C3 处理降低幅度较小,说明,通过调控生物炭和氮肥施用比例可以降低间作对玉米干物质积累量的影响。

表 2 氮肥配施生物炭对不同种植模式下作物产量影响的正交分析

Table 2 Orthogonal analysis of the effects of nitrogen fertilizer combined with biochar application on crop yield under different planting modes

处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	因素	K1j	K2j	K3j	K1j 平均值	K2j 平均值	K3j 平均值	R	最优方案
MN1C1	13 650b	A 因素	46 505	14 430	33 375	15 502a	4 810c	11 125b	10 692	M
MN2C2	16 770a	B 因素	28 485	33 255	32 570	9 495b	11 085a	10 857a	1 362	C2
MN3C3	16 080a	C 因素	27 240	35 520	31 550	9 080c	11 840a	10 517b	2 760	N2
SN1C2	5 955e									
SN2C3	5 385e									
SN3C1	3 090f									
IN1C3	9 480d									
IN2C1	10 500c									
IN3C2	13 395b									

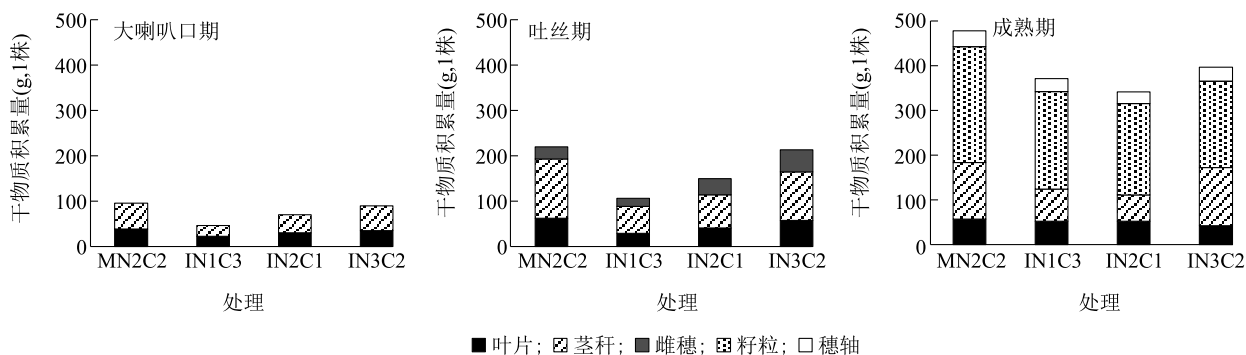
MN1C1、MN2C2、MN3C3、SN1C2、SN2C3、SN3C1、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1;K1j、K2j、K3j 表示对应因素不同水平下试验结果的总和;R:极差值。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。A 因素:种植模式;B 因素:氮素用量;C 因素:生物炭用量。

表 3 间作体系主要处理因素作用效应的统计分析

Table 3 Statistical analysis of main processing factors in the intercropping system

变异来源	产量	干物质积累量	氮积累量	氮吸收效率	氮利用效率	氮效率	氮收获指数	籽粒氮含量	营养体向籽粒氮转移量
A 因素	*	*	*	*	*	*	*	*	*
B 因素	*	*	*		*	*	*	*	*
C 因素	*	*	*		*	*	*	*	*
A×B		*	*		*	*	*	*	*
A×C		*	*		*	*	*	*	*
B×C		*	*		*	*	*	*	*

A 因素、B 因素、C 因素见表 2 注。A×B: A 因素与 B 因素交互;A×C: A 因素与 C 因素交互;B×C: B 因素与 C 因素交互。\* 代表置信区间显著(P<0.05)。



MN2C2、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1。

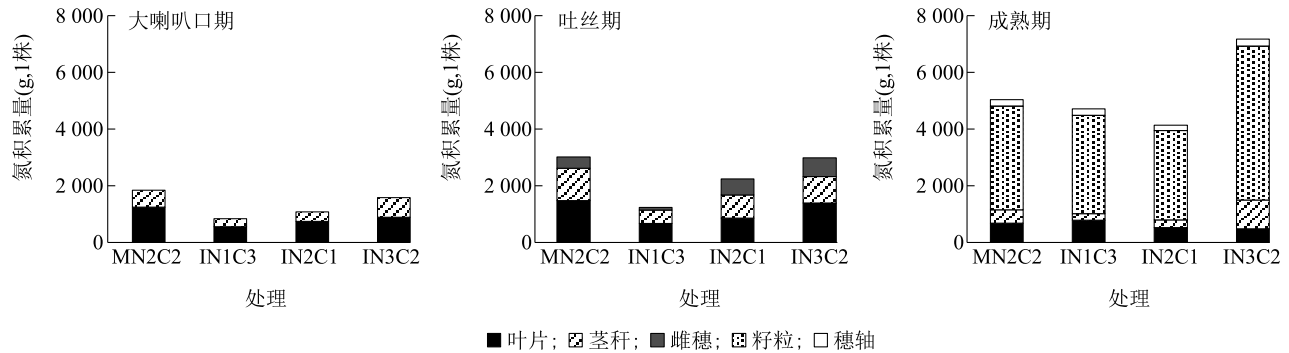
图 1 单作与间作玉米各生育期干物质积累量

Fig.1 Dry matter accumulation in maize at different growth stages under monoculture and intercropping systems

玉米单作和玉米与大豆间作模式下,玉米各生育期平均单株氮积累也存在较大差异(图 2)。

玉米大喇叭口期 MN2C2 处理平均单株氮积累量显著高于 3 个间作处理 ( $P < 0.05$ ); 玉米吐丝期 MN2C2 处理玉米平均单株氮积累量显著高于 IN1C3 处理和 IN2C1 处理 ( $P < 0.05$ ), 与 IN3C2 处理之间不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ); 玉米成熟期 MN2C2 处理平均单株氮积累量显著高于 IN1C3 处

理和 IN2C1 处理 ( $P < 0.05$ ), 但显著低于 IN3C2 处理 ( $P < 0.05$ ), IN3C2 处理氮积累量较单作显著提高 42.42%, 氮积累能力表现出显著优势。综上可知, 调控好氮和生物炭施用量可使间作玉米显著增强氮积累能力。



MN2C2、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1。

图 2 单作与间作玉米各生育期氮积累量

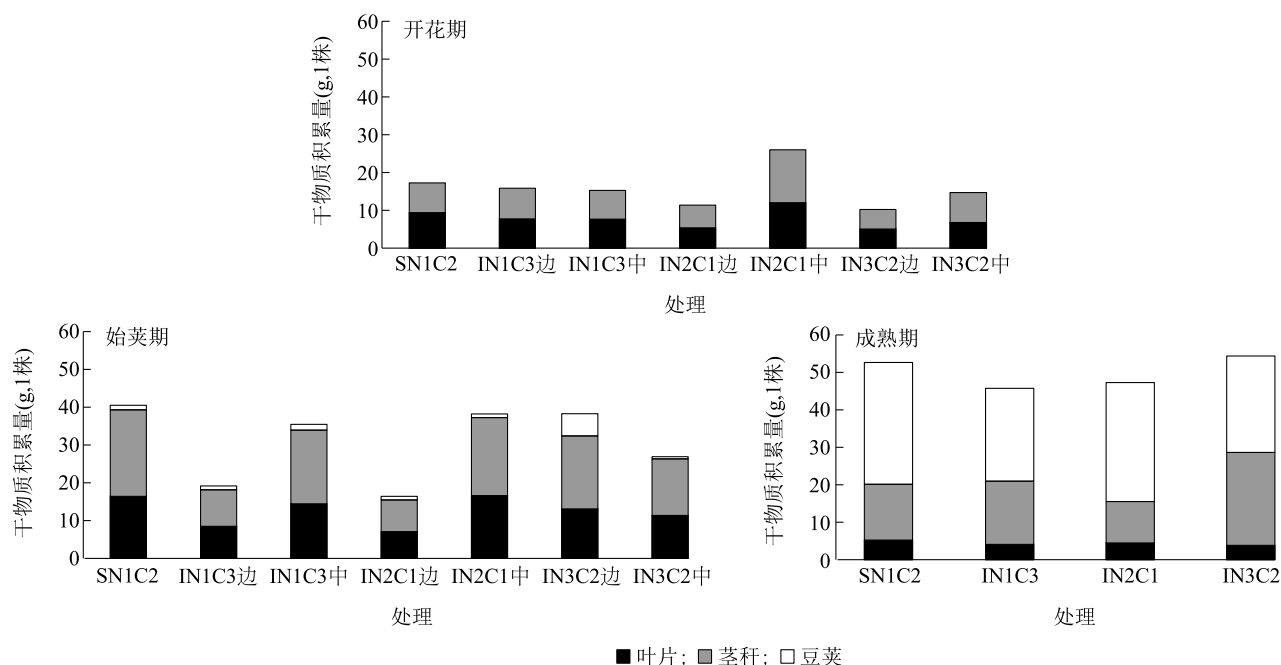
Fig.2 Nitrogen accumulation in maize at different growth stages under monoculture and intercropping systems

### 2.3 氮肥配施生物炭对不同模式大豆干物质积累和氮积累的影响

以产量表现相对较好的大豆单作处理 SN1C2 与 3 个间作处理进行比较, 分析各生育期平均单株大豆干物质积累量, 结果如图 3 所示, 单作与间作模式单株大豆干物质积累量存在较大差异。大豆开花期, SN1C2 处理平均单株大豆干物质积累量显著高于 IN1C3 处理边行、IN1C3 处理中间行、IN2C1 处理边行、IN3C2 处理边行、IN3C2 处理中间行平均单株大豆干物质积累量 ( $P < 0.05$ ), IN2C1 处理中间行平均单株大豆干物质积累量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 开花期间作处理的边行大豆干物质积累未表现明显的边际效应。大豆始荚期, 单作处理大豆干物质积累量显著高于间作处理 ( $P < 0.05$ ), 3 个间作处理中, 仅 IN3C2 处理表现出边际优势, 边行大豆较中间行大豆干物质积累量提高 42.37%。大豆成熟期, IN3C2 处理平均单株大豆干物质积累量与 SN1C2 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但显著高于其他间作处理 ( $P < 0.05$ )。IN3C2 处理在大豆开花期干物质积累未表现出优势, 但随着生育期的推进, 始荚期干物质积累能力逐渐增强, 且表现出边际效应, 成熟期干物质积累量与 SN1C2 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ ),

表明间作模式对 IN3C2 处理大豆植株干物质积累能力的影响较小, 调控好氮和生物炭施用量间作大豆可以达到与单作大豆相当的干物质积累能力, 究其原因, 可能与玉米氮肥充足减轻了对大豆植株的养分竞争有关。

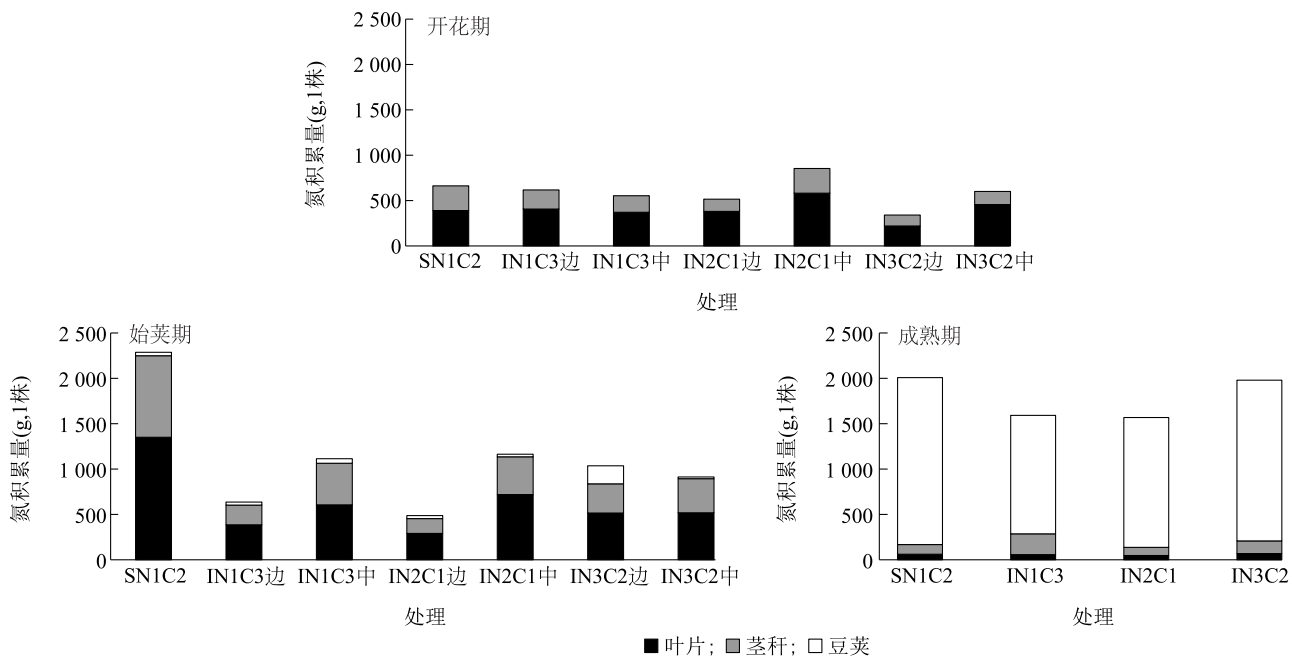
大豆单作 SN1C2 处理与 3 个间作处理大豆各生育期单株氮积累情况如图 4 所示, 单作模式与间作模式大豆单株氮积累量存在较大差异。开花期 IN2C1 处理中行大豆氮积累量最高, 显著高于其他各处理 ( $P < 0.05$ ), 其次是单作 SN1C2 处理。大豆始荚期 SN1C2 处理大豆单株氮积累量显著高于同时期各间作处理 ( $P < 0.05$ ), 其中, IN2C1 处理中行、IN1C3 处理中行较 SN1C2 处理显著降低 49.09%、51.28%, 3 个间作处理中仅 IN3C2 处理表现出显著的边际优势, 边行大豆较中行大豆氮积累量提高 13.47%。大豆成熟期, IN3C2 处理平均单株大豆氮积累量与 SN1C2 处理差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但显著高于 IN1C3 处理和 IN2C1 处理 ( $P < 0.05$ )。IN3C2 处理在大豆开花期氮积累未表现优势, 随着生育期的推进, 氮积累能力逐渐增强, 且在始荚期开始表现出边际效应, 成熟期与 SN1C2 处理氮积累能力接近, 表明调控好氮和生物炭施用量, 间作大豆可以达到与单作大豆相当的氮积累能力。



SN1C2、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1; IN1C3 边、IN2C1 边、IN3C2 边分别指 IN1C3、IN2C1、IN3C2 处理边行大豆, IN1C3 中、IN2C1 中、IN3C2 中分别指 IN1C3、IN2C1、IN3C2 处理中间行大豆。

图 3 单作与间作大豆各生育期干物质积累量

Fig.3 Dry matter accumulation in soybean at different growth stages under monoculture and intercropping systems



SN1C2、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1; IN1C3 边、IN2C1 边、IN3C2 边分别指 IN1C3、IN2C1、IN3C2 处理边行大豆, IN1C3 中、IN2C1 中、IN3C2 中分别指 IN1C3、IN2C1、IN3C2 处理中间行大豆。

图 4 单作与间作大豆各生育期氮积累量

Fig.4 Nitrogen accumulation in soybean at different growth stages under monoculture and intercropping systems

2.4 间作体系玉米与大豆氮效率相关指标

本研究对间作体系玉米与大豆氮效率相关指标

进行了分析,结果如表 4 所示,分别与大豆单作和玉米单作模式相比,间作使玉米和大豆的氮吸收效率、

氮效率均显著下降( $P<0.05$ )。IN1C3 处理、IN2C1 处理、IN3C2 处理玉米与大豆氮吸收效率之和分别较单作玉米提高 27.68%、36.61%、15.18%,但均低于单作大豆氮吸收效率;IN1C3 处理、IN2C1 处理、IN3C2 处理玉米与大豆氮效率之和分别较单作大豆提高 2.03%、4.09%、18.94%,但均低于单作玉米氮效率。IN1C3 处理、IN2C1 处理、IN3C2 处理玉米与大豆氮利用效率之和分别较单作玉米和单作大豆氮利用效率显著提高( $P<0.05$ ),分别较单作玉米提高了 16.12%、6.74%、69.84%,分别较单作大豆提高了 272.22%、242.17%、444.43%,IN3C2 处理玉米与大豆的氮利用效率之和、氮效率之和均高于其他间作处理,氮利用效率之和较其他间作处理分别提高 46.27%、59.11%,氮效率分别提高 16.57%、14.26%。说明玉米与大豆间作,氮利用效率促进氮效率提高

的贡献比氮吸收效率更显著。IN1C3 处理、IN2C1 处理、IN3C2 处理玉米氮收获指数与 MN2C2 处理差异不显著;IN1C3 处理大豆氮收获指数较 SN1C2 处理显著下降( $P<0.05$ ),IN2C1 处理、IN3C2 处理大豆氮收获指数与 SN1C2 处理相比差异不显著( $P>0.05$ )。IN3C2 处理玉米籽粒氮含量显著高于 MN2C2 处理( $P<0.05$ ),提高幅度达 48.74%,IN3C2 处理大豆籽粒氮含量与 SN1C2 处理相比差异不显著( $P>0.05$ );IN1C3 处理玉米籽粒氮含量显著低于 MN2C2 处理( $P<0.05$ ),IN1C3 处理、IN2C1 处理大豆籽粒氮含量显著低于 SN1C2 处理( $P<0.05$ )。由此可见,氮肥和生物炭合理运筹可促进间作玉米籽粒氮积累,而对大豆籽粒氮积累无显著影响。IN3C2 处理玉米营养体氮向籽粒转移量较 MN2C2 处理显著下降( $P<0.05$ )。

表 4 间作体系玉米与大豆氮效率相关指标的测定结果

Table 4 Determination results of nitrogen efficiency-related indicators of maize and soybean in the intercropping system

处理	氮吸收效率 (kg/kg)	氮利用效率 (kg/kg)	氮效率 (kg/kg)	氮收获指数	籽粒氮含量 (kg/hm <sup>2</sup> )	营养体氮向 籽粒转移量 (kg/hm <sup>2</sup> )
MN2C2	1.12b	45.23b	50.68a	0.72c	3 650.57b	1 864.50a
SN1C2	2.54a	14.11f	35.90b	0.92a	1 839.72d	1 181.10c
IN1C3(玉米)	0.69d	41.55c	28.49c	0.74c	3 158.86c	1 219.38c
IN2C1(玉米)	0.80e	31.96d	25.43d	0.76bc	3 466.91b	1 485.99b
IN3C2(玉米)	0.48e	59.61a	28.69c	0.76bc	5 429.75a	1 451.70b
IN1C3(大豆)	0.74cd	10.97g	8.14f	0.82b	1 304.84e	314.84e
IN2C1(大豆)	0.73cd	16.32ef	11.94e	0.91a	1 432.76e	317.18e
IN3C2(大豆)	0.81c	17.21e	14.01e	0.89a	1 772.26d	828.49d

MN2C2、SN1C2、IN1C3、IN2C1、IN3C2 见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 氮肥配施生物炭对玉米与大豆间作干物质积累与产量的影响

氮肥减量结合生物炭施用可调节土壤团聚体结构、改善土壤肥力<sup>[16-17]</sup>、促进产量及氮利用效率的提高<sup>[18]</sup>。Feng 等<sup>[19]</sup>研究结果表明,与对照相比,施用 30 t/hm<sup>2</sup>生物炭可使玉米光合速率提高 16.5%,叶绿素含量增加 21.0%,单位面积产量提高 11.9%。张志龙等<sup>[20]</sup>研究发现,化肥结合生物炭施用与生物炭单独施用相比,可显著提高连作黄瓜产量。王淑君等<sup>[21]</sup>研究发现,与不施生物炭基肥处理相比,施用生物炭基肥的两个处理(750 kg/hm<sup>2</sup>和

1 500 kg/hm<sup>2</sup>)在中度控水(土壤含水量为田间持水量的 60%~65%)处理下提高了花生产量,且提高幅度分别为 40.48%和 37.71%。宋世龙等<sup>[22]</sup>研究发现,与常规施氮肥(300 kg/hm<sup>2</sup>)相比,氮肥减量 15%(255 kg/hm<sup>2</sup>)配施 20 t/hm<sup>2</sup>生物炭处理最有利于春小麦光合生产、干物质积累和转运及产量提升。前人研究结果表明,生物炭可有效促进作物产量增加,但是氮肥减量结合生物炭的研究较少,且在间作模式上的应用研究比较少。

Purakayastha 等<sup>[23]</sup>研究认为,生物炭可促使氮肥缓慢释放,氮肥配施生物炭具有一定的协同增效或互补作用。适量减氮可以促使玉米主动竞争吸收土壤中更多的氮,间接增强大豆的固氮能力<sup>[24]</sup>。因

此,对玉米适当减施氮肥可促使其与大豆竞争从而获取足够的氮<sup>[25]</sup>。于滨杭等<sup>[26]</sup>研究认为,生物炭与氮肥交互作用对间作模式下玉米和大豆的产量及水氮利用效率均有影响,与曹磊齐等<sup>[27]</sup>和江立<sup>[28]</sup>的研究结果基本一致。本研究结果表明,在常规施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>基础上减氮 15% (施氮量为 255 t/hm<sup>2</sup>),搭配生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>,玉米与大豆间作模式下产量表现最优,达到 13 395 kg/hm<sup>2</sup>;与玉米单作相比,虽然间作使玉米干物质积累量下降,但通过调控生物炭和氮肥施用比例可以减轻间作对玉米干物质和氮素积累的负面影响,保证间作体系的稳产性。因此,可以采取减氮结合生物炭施用的途径提高玉米与大豆间作体系的产量。

### 3.2 氮肥配施生物炭对玉米与大豆间作模式下氮积累的影响

施用生物炭是作物可靠的稳产增产措施,间作是充分利用土地资源的栽培方式,但目前生物炭配施氮肥对间作作物产量和品质的影响的研究相对滞后。近年来国内外已经出现一些相关研究报道,如 Liu 等<sup>[29]</sup>研究发现,玉米与大豆间作以及玉米与花生间作模式下,通过施用生物炭可以增强豆科作物固氮能力,进而促进氮素从豆科作物向间作的谷类作物转移,提高间作作物的种植效益。适量的生物炭配施氮肥可以提高玉米与大豆间作体系的干物质积累量,提高籽粒干物质的分配比率,减少茎叶干物质分配比率,进而提升玉米与大豆间作体系的产量,减氮结合生物炭有利于综合提升玉米与大豆间作体系产量、水氮利用效率和品质<sup>[30]</sup>。相关研究结果证实,在内蒙古平原灌区,生物炭与氮肥减量配施条件下,3 000 kg/hm<sup>2</sup>生物炭与 165~210 kg/hm<sup>2</sup>纯氮配施,可实现节氮 30%~45%,氮高效玉米品种氮效率提升 52.78%~93.33%,利于实现高产、高效<sup>[8,31]</sup>。氮肥减量科学搭配生物炭施用,可以促使玉米充分发挥氮素吸收和利用优势,从而在保证产量的基础上实现节氮增效。本研究结果表明,IN3C2 处理玉米植株氮积累量较玉米单作显著提高 42.42%,氮积累能力表现出显著优势,同时,能够削弱间作对大豆干物质及氮积累能力的影响,在大豆结荚期呈现出明显的边际效应,间作大豆成熟期与单作大豆成熟期氮积累能力接近。由此可见,间作模式虽然使玉米和大豆的氮吸收效率、氮效率均显著下降,但通过生物炭与氮肥科学配施能促进玉米籽粒氮的积

累,而对大豆籽粒氮的积累无显著影响。

生物炭虽然是一种土壤调理改良剂,但过量施用也会呈现负效应,分析认为,生物炭通过改良农田土壤理化性状,在一定程度上影响土壤微生物群落多样性和代谢活性,而土壤微生物活性的改变又反过来影响农田土壤活性氮转化利用和作物生长发育。氮消化作用的关键酶是氨氧化古菌,有研究结果表明,生物炭过量施入会导致氨氧化古菌数量显著下降,影响作物的氮吸收量和植株的生长<sup>[32-33]</sup>。此外,生物炭施用过多导致的负效应在玉米、黄瓜等多种作物上均有报道,但相关研究还较少,需要进一步深入研究。

## 4 结论

本研究结果显示,在玉米与大豆 3 个间作处理中 IN3C2 处理总体效果最优,该处理有效缓解了间作对玉米干物质和氮积累的抑制作用,尽管玉米干物质积累量仍然低于单作,但单株氮积累量和籽粒氮含量分别较单作显著提升 42.42% 和 48.74% ( $P < 0.05$ ),玉米和总产量达 13 395 kg/hm<sup>2</sup>。由此可知,氮肥与生物炭配施可有效促进间作玉米氮素积累,提升氮肥利用效率,助力实现减氮增效。根据本研究结果,推荐玉米与大豆间作模式下氮肥施用量为 255 kg/hm<sup>2</sup>、生物炭施用量为 4 t/hm<sup>2</sup>。

### 参考文献:

- [1] 杜康,谢源泉,林赵森,等. 秸秆还田条件下氮肥对水稻幼苗生长及养分吸收的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(1):18-25.
- [2] 王向阳. 春玉米大豆超常规宽窄行间作体系生产力研究[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
- [3] 陈远学,李隆,汤利,等. 小麦/蚕豆间作体系中施氮对小麦氮营养及条锈病发生的影响[J]. 核农学报,2013,27(7):1020-1028.
- [4] 张雷昌,汤利,董艳,等. 根系互作对间作玉米大豆氮和磷吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(4):611-618.
- [5] 朱锦惠,董艳,肖靖秀,等. 小麦与蚕豆间作系统氮肥调控对小麦白粉病发生及氮素累积分配的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(12):3985-3993.
- [6] 王雪蓉,张润芝,李淑敏,等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报,2019,27(9):1354-1363.
- [7] 刘颖,王建国,郭峰,等. 玉米花生间作对作物干物质积累和氮素吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报,2020,42(6):

- 994-1001.
- [8] 崔文芳,陈静,鲁富宽,等. 生物炭与氮肥减量条件下氮高效玉米品种的氮效率研究[J]. 玉米科学,2022,30(1):123-129.
- [9] 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.
- [10] 杨欢,周颖,陈平,等. 玉米-豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响[J]. 作物学报,2022,48(6):1476-1487.
- [11] 张晓娜,陈平,杜青,等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响[J]. 中国生态农业学报,2019,27(8):1183-1194.
- [12] 冯晓敏,杨永,臧华栋,等. 燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(3):617-624.
- [13] 秦德志,崔文芳,陈静,等. 滴灌下氮肥减量配施生物炭对玉米大豆间作系统光合特性和产量的影响[J]. 大豆科学,2024,43(3):332-341.
- [14] 秦德志,崔文芳,陈静,等. 玉米大豆间作干物质积累和氮磷吸收利用的边际效应[J]. 西南农业学报,2024,37(3):552-560.
- [15] 崔文芳,高聚林,王志刚,等. 玉米自交系氮效率基因型差异分析[J]. 玉米科学,2013,21(3):6-12.
- [16] 崔文芳,陈静,鲁富宽,等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(11):2429-2436.
- [17] 崔文芳,高聚林,王志刚,等. 生物炭与氮肥减量调控对氮高效玉米田土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(5):233-240.
- [18] 魏永霞,朱焯豫,刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(1):291-301.
- [19] FENG W Y, YANG F, CEN R, et al. Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277:111331.
- [20] 张志龙,陈效民,李小萌,等. 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜产量及肥料利用率的影响[J]. 土壤,2021,53(1):47-54.
- [21] 王淑君,夏桂敏,李永发,等. 生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(6):285-290.
- [22] 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.
- [23] PURAKAYASTHA T J, BERA T, BHADURI D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: pathways to climate change mitigation and global food security [J]. *Chemosphere*, 2019, 227:345-365.
- [24] LI B, LI Y Y, WU H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N<sub>2</sub> fixation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(23):6496-6501.
- [25] XU Z, LI C J, ZHANG C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2020, 246:107661.
- [26] 于滨杭,姬建梅,白伟桦,等. 基于产量和水氮利用效率的玉米/大豆间作系统炭氮配施方案优选[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7):25-33.
- [27] 曹磊齐,翟亚明,朱成立,等. 不同水氮条件下生物炭对夏玉米水氮耦合效应的影响[J]. 灌溉排水学报,2022,41(1):72-79.
- [28] 江立. 生物炭与氮肥配比对土壤微生物特性和红枣产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(9):81-86.
- [29] LIU L, WANG Y F, YAN X W, et al. Biochar amendments increase the yield advantage of legume-based intercropping systems over monoculture [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237:16-23.
- [30] 于滨杭. 生物炭配施氮肥对玉米-大豆间作系统产量、水氮利用和品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [31] 崔文芳,陈静,鲁富宽,等. 生物炭结合氮肥减量对玉米产量和氮效率的影响[J]. 浙江农业学报,2022,34(2):248-254.
- [32] 张梦阳,夏浩,吕波,等. 短期生物炭添加对不同类型土壤细菌和氨氧化微生物的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(7):1260-1271.
- [33] 胡朝华,刘曰明,庞孜钦,等. 农田土壤活性氮损失现状和生物炭调控途径研究进展[J]. 中国农业科技导报,2021,23(6):120-129.

(责任编辑:黄克玲)