



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

秦德志, 崔文芳, 陈 静, 刘 剑, 秦 丽, 严海欧

(内蒙古农业大学 职业技术学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010018)

摘要:为研究氮肥减量结合生物炭对玉米大豆间作群体光合特性和产量的影响,设置不同种植模式(玉米单作、大豆单作、玉米大豆间作)、生物炭(2, 4, 6 t·hm⁻²)、氮肥减量(165, 210, 255 kg·hm⁻²)三因素试验,采用正交试验设计方法,探讨不同种植模式氮肥减量配施生物炭的适宜用量。结果表明:单作与间作模式玉米适宜的用量分别为氮肥 210 与 255 kg·hm⁻²,生物炭用量均为 4 t·hm⁻²。间作系统产量达到 13 395 kg·hm⁻²,较单作玉米下降 20.13%,间作玉米、大豆较相应单作产量分别下降 35.69% 和 56.39%,有效株数低是导致间作玉米产量下降的主要原因,而单位面积株数与单株粒数的合理调控是决定间作大豆产量高低的关键因素。间作处理 IN3C2(氮肥 225 kg·hm⁻²、生物炭 4 t·hm⁻²)玉米的 *Pn* 从大口期到灌浆期持续升高,在灌浆期达到峰值,大豆从开花期经历结荚期到鼓粒期持续升高,在鼓粒期达到峰值,较其它处理具有显著光合优势,且大豆在结荚期和鼓粒期表现显著的边际优势。综上,滴灌下,氮肥减量与生物炭配施,单作和间作玉米较优的氮肥用量分别为 210 和 255 kg·hm⁻²,生物炭为 4 t·hm⁻²。

关键词:玉米;大豆;间作;光合特性;产量

Effects of Nitrogen Fertilizer Reduction Combined with Biochar on Photosynthetic Characteristics and Yield of Maize Soybean Intercropping System Under Drip Irrigation

QIN Dezhi, CUI Wenfang, CHEN Jing, LIU Jian, QIN Li, YAN Haiou

(Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: To study the effects of nitrogen fertilizer reduction combined with biochar on photosynthetic characteristics and yield of maize and soybean intercropping populations, we used the orthogonal experimental design method to test the three factors of different planting patterns (maize mono-cropping Y, soybean mono-cropping D, maize and soybean intercropping J), biochar (2, 4 and 6 t·ha⁻¹) and nitrogen reduction (165, 210 and 255 kg·ha⁻¹). To explore the appropriate amount of nitrogen reduction combined with biochar in different planting patterns. The results showed that the appropriate amount of nitrogen fertilizer was 210 and 255 kg·ha⁻¹, respectively, and the amount of biochar was 4 t·ha⁻¹ in both mono-cropping and intercropping modes. The yield of intercropping system reached 13 395 kg·ha⁻¹, which was 20.13% lower than that of mono-cropping maize, and the yield of intercropping maize and soybean was 35.69% and 56.39% lower than that of mono-cropping maize, respectively. The low number of effective plants was the main reason for the decrease of intercropping maize yield. The reasonable control of plant number per unit area and seed number per plant is the key factor to determine the yield of intercropping soybean. The *Pn* of IN3C2 (nitrogen fertilizer 225 kg·hm⁻² and biochar 4 t·hm⁻²) corn in intercropping treatment continued to increase from the opening stage to the filling stage and reached the peak value at the filling stage, and the *Pn* of soybean continued to increase from the flowering stage through the podding stage to the drumming stage and reached the peak value at the drumming stage, showing a significant photosynthetic advantage compared with other treatments, and soybean showed a significant marginal advantage at the podding stage and the drumming stage. In conclusion, under drip irrigation, nitrogen reduction combined with biochar application, the optimal nitrogen dosage of maize was 210 and 255 kg·ha⁻¹ and biochar was 4 t·ha⁻¹, respectively.

Keywords: maize; soybean; intercropping; photosynthetic characteristics; yield

加强间作种植技术的研究和知识储备符合国家“藏粮于地,藏粮于技”的粮食战略^[1]。间作作物间存在的竞争与互补作用是间作优势产生的重要决定因素。崔文芳等^[2]关于生物炭结合氮肥减量对氮高效玉米单作的产量及土壤改良效果研究表

明,氮肥的适宜用量为 165 ~ 210 kg·hm⁻²,较常规施氮量 300 kg·hm⁻²,可节氮 90 ~ 135 kg·hm⁻²,节氮比例在 30% ~ 45%^[3]。且生物炭与氮肥减量调控措施能够有效提升土壤质量,短期采取生物炭与氮肥减量调控措施,对土壤质量提升有显著效果,以生物炭

收稿日期:2023-05-15

基金项目:国家自然科学基金(32160506);内蒙古科技计划项目(2022YFHH0033)。

第一作者:秦德志(1977—),男,硕士,讲师,主要从事玉米生理生态研究。E-mail:qdz1111@163.com。

通讯作者:崔文芳(1977—),女,博士,教授,主要从事玉米高产氮高效研究。E-mail:cui.wenfang@163.com。

3 000 kg·hm⁻²与纯氮 300 和 255 kg·hm⁻²,配施效果最显著^[4]。刘遵奇等^[5]研究表明,施生物炭或生物炭与化肥配施能促进水稻产量提高,改良土壤结构,提高氮利用率。Xiu 等^[6]研究认为,施用生物炭可提高连作大豆光合代谢的基础(叶绿素含量及叶面积)、光合生理能力(净光合速率、蒸腾速率和气孔导度),促进大豆光合产物积累,增加叶干物质量,从而提高连作大豆产量。且在白浆土中施用生物炭可有效改良土壤,使大豆产量随连作年限增加而呈上升趋势,而在黑土坡耕地连续施用两年生物炭(50 t·hm⁻²),在第二年的大豆产量比第一年提高 15.23%^[7-8]。

随着玉米大豆间作种植机械化的实现,2021 年 12 月中央农村工作会议及全国农业农村厅局长会议要求,攻坚克难扩种大豆油料,把扩大大豆油料生产作为 2022 年必须完成的重大政治任务,支持黄淮海、西北、西南地区推广玉米大豆带状复合种植,加快推广新模式新技术,逐步推动大豆玉米兼容发展,多措并举扩面积、提产量。2022 年中央一号文件再次提出,在黄淮海、西北、西南地区推广玉米大豆带状复合种植。《黄河流域生态保护和高质量发展规划》强调以河套、南岸、麻地壕、民族团结、磴口扬水等大中型灌区为重点,建设节水高效、生态友好的高标准农田,推广水肥一体化技术。贾彪等^[9]认为,调控滴灌玉米最佳施氮量,可提高滴灌玉米光合能力,进而提高产量。本研究针对河套灌区长期大水漫灌、耕地结构变差的现状,在滴灌条件下实施玉米大豆间作技术,以改善土壤结构,保证间作技术产量的稳定性,系统研究氮肥减量结合生物炭对玉米大豆间作系统光合特性和产量的影响,结合叶绿素积累和光合特性表现,筛选该区域适宜的玉米大豆间作节氮技术模式,为河套灌区发展高产稳产的玉米大豆间作技术,实现水肥资源高效利用提供有力的理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

玉米品种选用真金 308,株型半紧凑型,植株高度 1.70 ~ 1.80 m,具有耐密、抗倒、宜机收等特点,由内蒙古真金种业有限公司提供。大豆品种选用中

黄 30,由中国农业科学院作物科学研究所选育。

1.2 试验田概况

试验于 2022 年 4—10 月在内蒙古农业大学敕勒川农业博览园(包头市土默特右旗萨拉齐镇北只图村 110°14'E,40°14'N)进行。该地区属大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量 400 ~ 500 mm,多年均气温 6.9 ℃,无霜期 135 d 左右。试验地前茬是百合花,土壤类型是壤土,土壤 pH7.6,有机质 24.65 g·kg⁻¹,碱解氮 41.56 mg·kg⁻¹,速效磷 8.19 mg·kg⁻¹,速效钾 74.98 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

试验设置种植模式、生物炭、氮素用量三因素试验,种植模式为玉米单作(M)、大豆单作(S)和玉米大豆间作(I),生物炭用量分别为 2,4,6 t·hm⁻²,氮素用量分别为 165,210,255 kg·hm⁻²(表 1)。采用三因素正交设计,间作采用 2:3 模式,即 2 行玉米 3 行大豆,玉米株距 12 cm,行距 40 cm;大豆穴距 16 cm,行距 30 cm,每穴 2 ~ 3 粒播种,每穴留双株,85 230 穴·hm⁻²,每穴双株,保苗 75 810 ~ 133 425 穴·hm⁻²,保苗 16.5 万 ~ 22.5 万株·hm⁻²,玉米大豆间距为 60 cm,带宽 2.2 m。单作玉米行距 50 cm,株距 26.4 cm,密度为 75 750 株·hm⁻²,单作大豆为株距 18 cm,行距 30 cm。单作与间作玉米单位面积株数相同,单作与间作大豆单位面积株数相同。小区面积宽 4.6 m × 长 5 m。玉米大豆于 5 月 7 日同期播种,磷钾肥作为底肥施入,于播种前将肥料均匀撒于地表,再翻入耕层 10 cm 左右。各处理每个磷肥 105 kg·hm⁻²P₂O₅(磷酸二铵)和钾肥 45 t·hm⁻²K₂O(硫酸钾)。大豆开沟施种肥,纯氮(尿素)45 kg·hm⁻²,玉米氮肥(尿素)在拔节期:大口期按 3:7 追施,随水滴灌水肥一体化追施。玉米于 5 月 19 日出苗,大豆 5 月 22 日出苗,玉米于 6 月 25 日追拔节肥、灌第 1 水,7 月 13 日大喇叭口期追肥、灌第 2 水(玉米大豆同时进行滴灌),7 月 27 日开花期灌第 3 水,8 月 9 日灌第 4 水(玉米大豆同时进行滴灌),灌水总量为 3 000 m³·hm⁻²,9 月 25 日收获。间作处理中,玉米带和大豆带相邻各行依次记为边行,位于中间的植株行记为中行。试验小区种植是南北行向,按照玉米大豆自西向东依次安排,保证大豆的光照条件。

表 1 正交设计及田间施肥量统计表

Table 1 Statistical table of orthogonal design and field fertilizer amount

A 因素(种植模式)	B 因素(氮肥)	C 因素(生物炭)	处理编号
A Factor (planting pattern)	B Factor(nitrogen fertilizer)/(kg·hm ⁻²)	C Factor(biochar)/(t·hm ⁻²)	Processing number
玉米单作(1)	165(1)	2(1)	MN1C1
Maize monoculture (1)			
玉米单作(1)			
Maize monoculture (1)	210(2)	4(2)	MN2C2
玉米单作(1)			
Maize monoculture (1)			
玉米单作(1)	255(3)	6(3)	MN3C3
Maize monoculture (1)			
大豆单作(2)			
Soybean monoculture (2)	165(1)	4(2)	SN1C2
大豆单作(2)			
Soybean monoculture (2)			
大豆单作(2)	210(2)	6(3)	SN2C3
Soybean monoculture (2)			
大豆单作(2)			
Soybean monoculture (2)	255(3)	2(1)	SN3C1
间作(3)			
Intercropping (3)			
间作(3)	210(2)	2(1)	IN2C1
Intercropping (3)			
间作(3)			
Intercropping (3)	255(3)	4(2)	IN3C2
间作(3)			
Intercropping (3)			

1.4 测定项目及方法

于玉米大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)和灌浆期(R2),大豆的始花期(R1)、始荚期(R3)和始粒期(R5),应用便携式光合荧光测量系统(GFS-3000)和SPAD测定仪分别测定光合特性指标蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、光合速率 P_n 、胞间 CO_2 浓度 C_i 、SPAD值及叶片氮含量。玉米V12期,边行植株选择最新展开叶,R1期和R3期选择穗位叶测定光合特性、叶绿素SPAD值和叶片氮含量;间作模式大豆的边行和中行选择顶部成熟的三出复叶分别进行测定,选择晴天的上午对玉米与大豆同时测定。

测产:每小区选取无缺苗断垄且长势整齐的两行玉米,计数有效穗数,去掉两端植株,两行中各连续取5穗收获,待果穗风干后考种,逐穗测定穗粒数后全部脱粒,测定百粒重和含水量,并计算籽粒产量,折算成14%含水量的产量。间作处理大豆按照带宽进行测产,量取1 m长度的带宽,把其中大豆植株带回实验室,风干后测定单位面积产量,并折算成12%含水量的产量。

1.5 数据分析

采用Excel 2017进行数据整理,用DPS 10.0软件进行数据方差多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 对不同间作模式下作物产量的影响

如表2所示,3个因素对产量的影响程度为种植模式>生物炭>氮肥减量。9个处理中,MN2C2产量最优,其次是MN3C3,二者差异不显著,产量分别达到16 770和16 080 kg·hm⁻²,再次是MN1C1,与间作IN3C2差异不显著,但均显著高于其它处理。各因子中各水平产量的平均值(K1j、K2j和K3j)反映了这一水平对产量的影响,A因素的3个水平的平均产量差异显著,第一水平(15 502 kg·hm⁻²)最高,其次是第三水平(11 125 kg·hm⁻²),B因素的第二水平(11 085 kg·hm⁻²)与第三水平(10 857 kg·hm⁻²)差异不显著,显著高于第一水平(9 495 kg·hm⁻²),C因素3个水平的平均产量达到显著差异,第二水平(11 840 kg·hm⁻²)显著高于第一、三水平(9 080和10 517 kg·hm⁻²),因此,最优方案为A、B和C因素的第一、二和二水平,即MN2C2处理试验效果最好,对应的试验条件是玉米单作,氮肥与生物炭施用量分别为210和4 t·hm⁻²,而间作模式中,以IN3C2表现最好,氮肥用量为255 t·hm⁻²,生物炭施用量4 t·hm⁻²。

表 2 氮肥减量结合生物炭对不同间作模式产量影响的正交分析表

Table 2 Orthogonal analysis of effects of nitrogen reduction combined with biochar on yield of different intercropping modes

处理 Processing	A 因素(种植模式) A Factor (planting pattern)	B 因素(氮肥) B Factor (nitrogen fertilizer)/(kg·hm ⁻²)	C 因素(生物炭) C Factor (biochar)/(t·hm ⁻²)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)
MN1C1	玉米单作(1)	165(1)	2(1)	13650 b
MN2C2	玉米单作(1)	210(2)	4(2)	16770 a
MN3C3	玉米单作(1)	255(3)	6(3)	16080 a
SN1C2	大豆单作(2)	165(1)	4(2)	5355 e
SN2C3	大豆单作(2)	210(2)	6(3)	5985 e
SN3C1	大豆单作(2)	255(3)	2(1)	3090 f
IN1C3	间作(3)	165(1)	6(3)	9480 d
IN2C1	间作(3)	210(2)	2(1)	10500 c
IN3C2	间作(3)	255(3)	4(2)	13395 b
K1	46505	28485	27240	
K2	14430	33255	35520	
K3	33375	32570	31550	
K1j	15502 a	9495 b	9080 c	
K2j	4810 c	11085 a	11840 a	
K3j	11125 b	10857 a	10517 b	
R	10692	1362	2760	
最优方案 Optimal scheme	1	2	2	

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著性。K1j、K2j 和 K3j 分别为各水平产量的平均值。

Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P<0.05$ level. K1j, K2j and K3j were the average yield of each level.

2.2 对不同种植模式作物产量构成因素的影响

对单作及间作玉米产量构成因素的分析结果如表 3 所示,间作系统产量达到 13 395 kg·hm⁻²,较单作玉米 MN2C2 下降 20.13%,间作玉米产量较单作显著下降,其中最高产量间作处理 IN3C2 (10 785 kg·hm⁻²)较单作 MN2C2 产量(16 770 kg·hm⁻²)下降35.69%。从产量构成因素看,间作玉米有效株数均较单作下降,其中间作 IN3C2 最高,较最高产量单作处理 MN2C2 下降 40.55%,而二者穗粒数、千

粒重及含水量差异均不显著,因此,有效株数低是导致间作玉米较单作产量下降的主要原因。间作大豆产量较单作也显著下降,最高产量间作处理 IN3C2 (2 610 kg·hm⁻²)较单作 SN2C3(5 985 kg·hm⁻²)产量下降 56.39%,密度下降 69.01%,单株粒数提高 41.67%,较间作处理 IN2C1 密度下降 11.76%,单株粒数提高 57.41%,产量提高 25.18%。因此,有效株数与单株粒数的合理调控是决定间作大豆产量的关键因素,在生产上要着重对这两个性状进行调节。

表 3 不同种植模式玉米和大豆产量构成因素

Table 3 Yield components of maize and soybean under nitrogen reduction combined with biochar in different planting patterns

种植模式 Planting pattern	处理 Treatment	玉米 Maize					大豆 Soybean					
		有效株数	穗粒数	千粒重	含水量	产量 yield/ (kg·hm ⁻²)	处理 Treatment	株数	株粒数	百粒重	含水量	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)
		Effective	Kernel	1000	Water			Plants	Seed	100-	Water	
		plant number/ (株·hm ⁻²)	number per spike	grain weight/g	content /%			number/ (株·hm ⁻²)	number	seed weight/g	content/ %	
单作 Monoculture	MN1C1	4289 b	598 c	406.67 b	24.97 b	13650 b	SN1C2	14001 a	112	21.63	7.6	5355 b
单作 Monoculture	MN2C2	4908 a	620 bc	416.33 ab	24.10 bc	16770 a	SN2C3	14667 a	120	21.54	7.5	5985 a
单作 Monoculture	MN3C3	3882 c	758 a	413.00 ab	22.87 c	10680 a	SN3C1	14667 a	70	19.13	7.6	3090 c
间作 Intercropping	IN1C3	2775 de	534 d	431.50 ab	27.00 a	8145 d	IN1C3	5152 b	87	19.02	7.7	1335 f
间作 Intercropping	IN2C1	2669 e	554 d	435.00 a	25.00 b	8415 d	IN2C1	5152 b	108	23.73	7.6	2085 e
间作 Intercropping	IN3C2	2918 d	642 b	430.00 ab	23.23 c	10785 c	IN3C2	4546 b	170	21.36	7.5	2610 d

注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著性。
Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P < 0.05$ level.

2.3 对不同种植模式作物 SPAD 值和氮含量的影响

氮肥减量结合生物炭对单作与间作玉米 SPAD 值影响的分析如表 4 所示,单作和间作玉米大喇叭口期(V12)至灌浆期(R2)SPAD 值和氮含量均逐渐下降。V12 期与 R1 期,间作 IN2C1 与 3 个单作处理差异均不显著,均显著高于 IN1C3 和 IN3C2,到 R2 期,3 个单作仍保持较高,均显著高于间作处理,

且从 V12 期到 R2 期 SPAD 值分别下降 30.49%、30.83%、27.59%,3 个间作处理分别下降 43.97%、44.24% 和 24.90%,IN3C2 下降幅度最小。对氮含量分析表明,叶片 V12 期氮含量到 R2 期逐渐降低,与 SPAD 值表现相同变化规律。3 个单作处理从大口期到灌浆期氮含量分别下降 33.94%、30.32% 和 25.32%,3 个间作处理分别下降 44.46%、44.71% 和 24.34%,IN3C2 下降幅度最小。

表 4 氮肥减量结合生物炭对不同模式玉米 SPAD 值和氮含量的影响
Table 4 Effects of nitrogen reduction combined with biochar on SPAD value and nitrogen content of maize in different models

种植模式 Plant mode	处理 Treatment	SPAD 值			氮含量		
		SPAD value			Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)		
		V12 期	R1 期	R2 期	V12 期	R1 期	R2 期
单作 Monoculture	MN1C1	120.90 abAB	86.8 aA	84.04 aAB	46.96 aAB	33.61 aA	31.02 aAB
	MN2C2	123.40 aA	89.2 aA	85.36 aAB	47.96 aA	34.51 aA	33.42 aAB
	MN3C3	120.06 abAB	86.5 aA	86.94 aA	46.64 aAB	33.53 aA	34.83 aA
间作 Intercropping	IN1C3	114.88 bB	78.56 bB	64.34 bB	44.58 bB	27.50 bB	24.76 bB
	IN2C1	119.80 abAB	88.31 aA	66.80 bB	46.52 aAB	35.08 aA	25.72 bB
	IN3C2	85.46 cC	84.74 abAB	64.18 bB	32.66 cC	33.91 aAB	24.71 bB

注:不同大小写字母分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著性。
Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level.

对间作 2:3 模式的大豆边行和中行的 SPAD 值和氮含量分别测定结果如表 5 所示,同一带宽中,边行与中行 SPAD 值、氮含量表现差异不显著,未表现边际效应。单作和间作 IN1C3、IN2C1 始花期至始粒期,SPAD 值和氮含量持续下降,而 IN3C2 在始荚期达到峰值,之后逐渐下降。始花期,间作 IN1C3、IN2C1 与 3 个单作处理差异不显著,均显著高于 IN3C2,IN3C2 的叶绿素和含氮量峰值出现在始荚期,峰值出现时间略滞后于其它处理,且峰值低于

其它处理。始荚期,3 个间作处理与单作 SN1C2、SN3C1 差异不显著,但显著高于单作 SN2C3,到始粒期,间作 IN3C2 与单作 SN1C2、SN2C3 差异不显著,显著高于其它处理,保持较高的叶绿素含量,且降解速度相对缓慢,从始荚期到始粒期分别下降 28.32%、8.12% 和 4.45%,从始花期到始粒期分别下降 19.64%、49.40% 和 53.65%。其中,IN3C2 叶绿素含量降低幅度最小,降解缓慢,可能因 255 kg·hm⁻² 氮肥结合 4 t·hm⁻² 配施,延缓了叶绿素降解。

表 5 氮肥减量结合生物炭对不同模式大豆 SPAD 值和氮含量的影响
Table 5 Effects of nitrogen reduction combined with biochar on SPAD value and nitrogen content of soybean in different models

种植模式 Plant mode	处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value			氮含量 Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)		
		始花期 R1	始荚期 R3	始粒期 R5	始花期 R1	始荚期 R3	始粒期 R5
单作 Monoculture	SN1C2	109.24 a	79.06 ab	73.12 a	42.32 a	30.56 ab	28.10 a
	SN2C3	108.54 a	73.78 b	70.64 ab	42.10 a	28.48 b	27.01 ab
	SN3C1	115.58 a	80.22 a	64.22 bc	44.90 a	31.02 a	24.74 bc
	IN1C3 边行	116.00 a	81.76 a	58.46 cd	45.04 a	31.60 a	22.46 cd
	IN1C3 中行	112.16 a	80.00 a	54.82 d	43.54 a	30.92 a	21.04 d
间作 Intercropping	IN2C1 边行	108.20 a	84.10 a	63.04 bc	41.94 a	32.52 a	24.24 bed
	IN2C1 中行	104.22 a	84.90 a	63.16 bc	40.42 a	32.84 a	23.92 bed
	IN3C2 边行	75.38 b	83.72 a	65.72 abc	29.10 b	32.78 a	25.32 abc
	IN3C2 中行	81.84 b	84.92 a	65.70 abc	31.60 b	32.84 a	25.32 abc

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著性。
Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P<0.05$ level.

叶片氮含量与 SPAD 值变化规律相近。始花期,间作 IN1C3、IN2C1 与 3 个单作差异不显著,均显著高于 IN3C2,IN3C2 含氮量峰值出现时间略滞后于其它处理,于始荚期达到峰值。始荚期,3 个间作与单作 SN1C2 和 SN3C1 差异不显著,均显著高于单作 SN2C3,IN1C3、IN2C1、SN1C2 和 SN3C1 从始花期到始荚期分别以 29.84%、28.98%、27.79% 和 30.88% 的幅度降低,而 IN3C2 于此时期达到峰值。到始粒期,SN1C2、SN2C3 和 IN3C2 保持较高的氮素含量,从始花期到始粒期分别下降 33.60%、35.87% 和 16.57%,IN3C2 下降最缓慢,这利于延长叶片光合功能期,防止出现早衰。

2.4 对不同种植模式作物光合特性的影响

氮肥减量结合生物炭对单作与间作玉米光合特性的影响分析如表 6 所示,各处理的 P_n 变化存在一定差异,处理间比较,MN1C1 和 MN3C3 在大喇叭口期(V12)即达到峰值,但峰值较低,仅为 9.86 及

7.46 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著低于其它处理,之后持续下降, P_n 始终较低,到灌浆期(R2)仅为 2.65 及 1.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,处于最低水平;单作 MN2C2 与间作 IN1C3 均在吐丝期(R1)达到峰值,分别为 26.36 及 22.91 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著低于 IN3C2,之后急剧下降,到灌浆期(R2),仅为 4.07 及 4.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著低于间作 IN3C2 与 IN2C1;而间作 IN3C2 与 IN2C1 处理从大口期(32.98 及 16.87 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)到灌浆期(R2)持续升高,在灌浆期(R2)达到峰值,分别为 55.02 及 34.10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其它处理。以上分析表明,各处理中,间作处理 IN3C2 与 IN2C1 在生育后期能够保持高的光合速率,光合功能期长且稳定。减氮结合施用生物炭,有利于玉米植株后期保持较高的光合能力。间作玉米的优势在于生育后期光合功能稳定期长,虽然单作在前期表现优越,但到后期,间作玉米的光合功能期长且稳定是防止功能叶片早衰的关键。

表 6 氮肥减量结合生物炭对不同模式玉米光合特性的影响

Table 6 Effects of nitrogen reduction combined with biochar on photosynthetic characteristics of maize in different models

种植模式 Plant mode	处理 Treatment	大喇叭口期 V12				吐丝期 R1				灌浆期 R2			
		Tr	Gs	Pn	Ci	Tr	Gs	Pn	Ci	Tr	Gs	Pn	Ci
单作	MN1C1	3.21 d	101.13 f	9.86 e	253.79 b	3.04 d	126.72 e	7.66 e	295.54 b	2.82 d	136.86 c	2.65 d	389.65 a
Monoculture	MN2C2	8.33 a	317.64 a	13.30 d	336.95 a	6.65 b	320.47 c	26.36 b	248.92 c	7.06 b	440.24 b	4.07 cd	394.83 a
	MN3C3	5.98 b	242.58 c	7.46 f	349.82 a	2.79 d	138.77 e	5.35 f	321.55 a	2.45 e	132.10 c	1.04 e	409.98 a
间作	IN1C3	4.79 c	195.32 d	21.55 b	217.32 c	4.61 c	225.21 d	22.91 d	213.22 d	1.26 f	67.42 d	4.73 c	325.76 b
Intercropping	IN2C1	3.31 d	146.35 e	16.87 c	215.91 c	8.38 a	403.70 a	24.49 c	302.06 b	6.20 c	422.76 b	34.10 b	266.73 c
	IN3C2	4.59 c	300.18 b	32.98 a	226.30 c	6.94 b	354.23 b	35.77 a	208.94 d	7.55 a	557.25 a	55.02 a	235.06 d

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著性。
Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P<0.05$ level.

对间作 2:3 模式的大豆边行和中行的光合特性进行分析结果如表 7 所示,同一带宽中,边行和中行的光合特性指标表现一定差异。纵观各处理 Pn 变化趋势,仅单作 SN3C1 在始花期即达到峰值,峰值较低,显著低于 SN1C2 和 SN2C3 处理,之后持续下降,到始粒期仅为 $2.55\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,处于最低水平;单作 SN1C2 与间作 IN1C3、IN2C1 的边行、中行均在始荚期达到峰值,分别为 31.71、3.96、5.08、3.22 和 $6.75\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其中单作 SN1C2 最高,显著高于其它处理,之后到始粒期该处理仅下降 6.65%,另外 4 个处理在始荚期之后急剧下降,到始粒期,仅为 2.47、1.69、1.57、3.60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光

合功能较弱,显著低于间作 IN3C2;而间作 IN3C2 处理的边行和中行从始花期经历始荚期到始粒期持续升高,达到峰值,分别为 52.42 和 $20.51\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其它处理,且在始荚期和始粒期表现显著的边际优势。以上分析表明,各处理中,间作处理 IN3C2 在生育后期能够保持高的光合速率,光合功能期长且稳定。减氮结合施用生物炭,间作 IN3C2 的氮肥结合生物炭施用有利于大豆植株后期保持较高的光合能力。间作大豆的优势在于生育后期光合功能稳定期长,虽然单作在前期表现优越,但到后期间作大豆的光合功能期长且稳定是防止功能叶片早衰的关键。

表 7 氮肥减量结合生物炭对不同模式大豆光合特性的影响

Table 7 Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with biochar on photosynthetic characteristics of different models of soybean

种植模式 Plant mode	处理 Treatment	始花期 R1				始荚期 R3				始粒期 R5			
		Tr	Gs	Pn	Ci	Tr	Gs	Pn	Ci	Tr	Gs	Pn	Ci
单作	SN1C2	5.03 f	320.24 e	18.37 b	277.22 d	13.52 a	1099.77 a	31.71 a	321.06 c	13.87 a	921.96 a	29.60 c	347.02 d
Monoculture	SN2C3	8.35 e	398.94 d	19.10 a	324.42 c	14.00 a	1071.01 a	32.22 a	318.39 c	11.00 b	937.27 a	34.27 b	319.00 e
	SN3C1	13.01 a	738.66 a	17.58 c	366.18 b	7.20 d	395.67 e	16.47 b	309.15 c	2.29 f	110.84 e	2.55 ef	364.81 cd
间作	IN1C3 边行	9.44 c	468.34 c	1.86 e	402.03 a	8.56 c	506.18 c	3.96 e	370.82 b	1.71 h	94.07 e	2.47 ef	364.22 cd
Intercropping	IN1C3 中行	9.51 c	485.90 c	1.28 e	406.31 a	9.74 b	628.81 b	5.08 d	367.68 b	2.05 g	114.75 e	1.69 fg	381.85 bc
	IN2C1 边行	8.96 d	459.45 c	0.52 f	403.92 a	8.46 c	467.02 d	3.22 e	412.86 a	7.35 d	556.54 c	1.57 g	416.96 a
	IN2C1 中行	10.88 b	643.80 b	1.65 e	400.07 a	8.54 c	507.04 c	6.75 c	402.55 a	4.86 e	326.72 d	3.60 e	396.19 b
	IN3C2 边行	3.50 g	185.89 g	0.36 f	416.76 a	7.27 d	403.69 e	6.24 c	364.62 b	7.51 d	533.11 c	52.42 a	233.55 f
	IN3C2 中行	4.72 f	289.02 f	3.25 d	399.61 a	5.91 e	302.23 f	5.16 d	360.67 b	8.14 c	591.86 b	20.51 d	356.29 d

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著性。
Note: Different lowercase indicate significant differences at the $P<0.05$ level.

3 讨论

间套作相对单作具有较好的土地产出优势,其当量比高于 1,但本研究中的 3 个间作处理产量显著低于玉米单作,分析原因认为,单作密度为 75 750 株·hm⁻²,间作设计原则为间作玉米与单作密度接近,大豆为单作的 70% 左右,即每 1 hm² 土地承担 75 750 株玉米 + 15 万株左右大豆,即要缩小玉米的株行距,在一定程度上玉米有效穗数减少。另外,2022 年气候异常,北方春季播种季持续低温,秋季早霜来临早,有效积温不足,玉米成熟不充分,基于以上原因导致玉米产量不高,尤其间作玉米缩株保密,株行距减小,单株生长空间缩小,成熟度更不足,致使产量较单作进一步下降。本研究以三因素正交试验开展研究,是为了从三因素试验较多的处理中筛选优势处理组合,达到获得较优处理的目的,但针对间作处理数据分析时涉及两种作物,但玉米与大豆的叶绿素、氮含量等无法相加减,没有可比性,但可将玉米单作与相应间作相比较,大豆单作与相应间作比较,找到差异或规律,如间作玉米、间作大豆均具有显著的光合优势,间作大豆光合作用在结荚期和鼓粒期表现显著的边际优势,此方法是可行的,不会影响结果的准确性。

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^[10]。适量生物炭施用对土壤容重和孔隙度等物理性质的改良作用显著,使生物炭与氮肥的协同增产作用进一步体现^[11]。He 等^[12]研究认为,生物炭的添加使植物光合速率提高了 27.10%,气孔导度、蒸腾速率、叶绿素浓度分别提高了 19.60%、26.90% 和 16.10%。生物炭对不同磷效率大豆的叶片净光合速率、叶绿素指数均有正向影响,且随施炭量增加而提高^[13]。生物炭在提高小麦叶片叶绿素含量、净光合速率、叶片氮浓度的同时,生物量、籽粒总蛋白、碳水化合物和产量也有明显提高。由于生物炭呈碱性,可提高土壤 pH,土壤养分有效性^[14],进而影响植物体叶绿素合成。吴迪等^[8]研究认为,生物炭对大豆光合代谢底物、扩大受光叶面积、提高光合速率来提高大豆光合生理能力。本研究表明,通过生物炭与氮肥减量施用,3 个间作处理的玉米 SPAD 值从大喇叭口期到灌浆期分别下降 43.97%、44.24% 和 24.90%,大豆从始花期到始粒期分别下降 49.40%、53.65% 和 19.64%。其中, JN3C2 处理 SPAD 值降低幅度最

小,缓慢下降,可能因 255 kg·hm⁻² 氮肥结合 4 t·hm⁻² 配施,延缓了叶绿素降解。

王旭敏等^[15]研究认为,与常规水氮模式相比,减量灌溉、减氮 25% 显著提高夏玉米抽雄期穗位叶净光合速率 10.0%,维持植株花后较高的穗位叶净光合速率,保证干物质生产。梁永贤等^[16]对河西旱作区玉米研究认为,减氮后氮肥用量 300 kg·hm⁻² 与种植密度 90 000 株·hm⁻² 为互作的最优栽培模式。宋世龙等^[17]对北疆灌区春小麦光合作用及产量研究认为,与常规施氮相比,减氮对春小麦光合作用无显著影响,但产量及其构成要素和氮肥农学利用效率随着施氮量的减少而降低,配施生物炭后上述各指标均显著提升,氮肥减量 15% 配施 20 t·hm⁻² 生物炭最有利于春小麦光合生产、干物质积累和转运及产量提升。配施生物炭条件下,氮肥适宜用量为 165~210 kg·hm⁻²,减氮潜力在 90~135 kg·hm⁻²。陈云海等^[18]研究认为,减氮 20% 配施生物炭对贵州黄壤玉米-白菜轮作系统的作物生长和产量有提升效应。

尽管大多数研究结果显示,生物炭对作物生长发育和产量等的影响均表现一定积极效应^[19-20],但生物炭施用的农学效应还与施用年限^[21]、土壤质地、生物炭类型、作物种类等有关^[22]。在玉米和大豆多年轮作土壤中,施用生物炭第一年玉米的产量并未提高,第二至第四年玉米产量分别比对照提高 28%~140%,说明生物炭对作物产量的影响随施用时间延长表现出累加效应。但也有研究发现,生物炭的增产效应具有一定时效性,首年效果最佳,并逐年减弱^[23]。可见,对于生物炭在农田中增产增效的应用还需进一步研究其后续长期效应。

刘慧屿等^[24]通过多年的田间定位试验研究了不同氮水平下,添加秸秆生物炭对玉米氮素利用的影响,认为添加秸秆生物炭可以促进植株对养分的吸收,能够有效节肥 45 kg·hm⁻² (以氮计),并保证玉米产量。段建军等^[25]对贵州省思南县典型黄壤稻田开展研究,认为黄壤稻田施生物炭时应氮磷钾化肥同步减量,降低比例以氮磷钾减量 19.00%~24.60%,施生物炭 5.00~6.25 t·hm⁻² 为宜。大量研究^[5,26]表明,施生物炭或生物炭与化肥配施能促进水稻养分吸收、干物质积累和产量提高,增加水稻有效分蘖,促进水稻穗粒形成,如减氮 20% 配施生物炭可促进养分吸收,增加水稻产量。本研究表明,间作处理玉米 *Pn* 从大喇叭口期到灌浆期持续

升高,在灌浆期达到峰值,大豆从始花期经历结荚期到始粒期持续升高,在始粒期达到峰值,IN3C2的玉米大豆较其它处理具有显著光合优势,且大豆在结荚期和始粒期表现显著的边际优势。因此,间作玉米氮肥用量 $255\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施生物炭用量 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,有利于间作玉米大豆植株后期保持较高的光合能力,光合功能期长且稳定。间作玉米的优势在于生育后期光合功能稳定期长,虽然单作在前期表现优越,但到后期,间作玉米的光合功能期长且稳定,这是防止功能叶片早衰的关键,同时,间作大豆要注重发挥边际效应优势,这样能够提高肥料的利用效率。

4 结论

单作与间作模式玉米适宜的用量分别为氮肥 210 和 $255\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,生物炭用量均为 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,间作系统产量达到 $13\ 395\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较单作玉米下降 20.13% ,最高产量间作玉米、大豆较单作产量分别下降 35.69% 和 56.39% ,有效株数低是导致间作玉米产量下降的主要原因,而单位面积株数与单株粒数的合理调控是决定间作大豆产量高低的关键因素。间作玉米从大口喇叭期到灌浆期持续升高,在灌浆期达到峰值,间作大豆从始花期经历结荚期到始粒期持续升高,在始粒期达到峰值,间作玉米大豆具有显著光合优势,且大豆在结荚期和始粒期表现显著的边际优势,间作模式设计中要发挥边际效应。间作玉米的优势在于生育后期光合功能稳定期长,虽然单作在前期表现优越,但到后期,间作玉米的光合功能期长且稳定是防止功能叶片早衰的关键。

参考文献

[1] 蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1128-1136. (CAI Z C. Discussion on the strategies for development of the subdiscipline of soil fertility and soil nutrient cycling for the 14th five-year plan [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1128-1136.)

[2] 崔文芳, 高聚林, 陈静, 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. (CUI W F, GAO J L, CHEN J, et al. Study on nitrogen efficiency of maize varieties with high nitrogen efficiency under biochar and nitrogen fertilizer reduction [J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(1): 123-129.)

[3] 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.

(CUI W F, CHEN J, LU F K, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen reduction on yield and nitrogen use efficiency of maize [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(2): 248-254.)

[4] 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. (CUI W F, CHEN J, LU F K, et al. Effects of biochar and nitrogen reduction on soil nutrient and fertility [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2429-2436.)

[5] 刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 等. 减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 544-551. (LIU Z Q, LAN Y, YANG T X, et al. Effect of biochar application pattern on soil fertility and enzyme activity under limited fertilization conditions [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 544-551.)

[6] XIU L, ZHANG W, WU D, et al. Biochar can improve biological nitrogen fixation by altering the root growth strategy of soybean in Albic soil [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 773: 144564.

[7] 魏永霞, 张翼鹏, 张雨凤, 等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 284-291, 312. (WEI Y X, ZHANG Y P, ZHANG Y F, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 284-291, 312.)

[8] 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.)

[9] 贾彪, 贺正. 宁夏引黄灌区滴灌玉米穗位叶光响应特征研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 153-160. (JIA B, HE Z. Photoresponse characteristics of spike leaves of maize in Ningxia Yellow River irrigation area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 153-160.)

[10] 韩晓日, 葛银凤, 李娜, 等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 392-398. (HAN X R, GE Y F, LI N, et al. Effects of continuous application of biochar on soil physico-chemical properties and nitrogen use efficiency [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(4): 392-398.)

[11] 李帅霖, 上官周平. 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 8-15. (LI S L, SHANGGUAN Z P. Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 8-15.)

[12] HE Y, YAO Y, JI Y, et al. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C_3 but not C_4 plants: A global synthesis

[J]. GCB Bioenergy, 2020, 12(8): 605-617.

[13] ZHU Q, KONG L J, SHAN Y Z, et al. Effect of biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(10): 2242-2254.

[14] GLASER B, LEHR V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 9338.

[15] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 等. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3183-3197. (WANG X M, LUO W H, LIU P Z, et al. Regulation effects of water sowing and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation transportation and yield of summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3183-3197.)

[16] 梁永贤, 魏廷邦. 氮肥用量与种植密度互作对旱作区玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(10): 147-155. (LIANG Y X, WEI T B. Effects of fertilizer amount and planting density on photosynthesis and yield of maize in arid region [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(10): 147-155.)

[17] 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.)

[18] 陈云梅, 赵欢, 肖厚军, 等. 减氮配施有机物料对玉米-白菜轮作系统作物产量、光合特性和产品品质的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4391-4400. (CHEN Y M, ZHAO H, XIAO H J, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic materials on crop yield, photosynthetic characteristics, and product quality of corn-cabbage rotation system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4391-4400.)

[19] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 115-123. (XIE Y X, LIU Y J, ZHANG W N, et al. Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 115-123.)

[20] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 159-167. (SUN H N, WANG S W, LI Y L, et al. Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 159-167.)

[21] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 309-320. (WEI Y X, SHI G X, FENG C, et al. Effects of applying biochar on soil structure and soybean yield on slope farmland in black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 309-320.)

[22] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 393-404. (XU M, WU J, ZHANG X H, et al. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 393-404.)

[23] 魏永霞, 肖敬萍, 王鹤, 等. 施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 305-314. (WEI Y X, XIAO J P, WANG H, et al. Continual influences of applying biochar on soil improvements in sloping farmland of black soil region in Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 305-314.)

[24] 刘慧屿, 娄春荣, 韩英祚, 等. 秸秆生物炭与减量氮肥配施对玉米氮素利用率及土壤结构的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1180-1188. (LIU H Y, LOUC R, HAN Y Z, et al. Impact of biochar addition combined with reduced nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and soil structure in brown earth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1180-1188.)

[25] 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.)

[26] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 57-63. (CHEN F, ZHANG K K, GU S C, et al. Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 57-63.)

[27] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 926-932. (LIU R, GAO Y, LIE L, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 926-932.)

[28] 柳瑞, HAFEZ ABDUL, 李恩琳, 等. 减氮配施稻秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2381-2389. (LIU R, ABDUL H, LI E L, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction and biochar application on paddy soil nutrient and nitrogen uptake of rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2381-2389.)