网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.004

大豆-玉米复合间作种植模式对玉米光合特征及产量形成的影响

吴昊楠,王学文,胡静,吴忠亮,刘建勋,李永彬,杨尚博,潘睿杰,勾玲
(石河子大学 农学院 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆 石河子 832003)

[摘 要] 【目的】在新疆干旱半干旱灌溉农业条件下,采用膜下滴灌种植方式,探讨大豆-玉米不同复合种植模式对玉米形态特征、光合特征、干物质积累、复合群体产量及土地当量比的影响,明确新疆生态农业区适宜的复合种植模式及高产玉米品种,为大豆-玉米间作高产、高效栽培及实现“大豆增产、玉米稳产”提供理论和技术支撑。【方法】采用二因素裂区试验设计,主因素为不同复合间作模式,副因素为不同玉米品种,采用膜下滴灌方式进行。2022 年主因素设置两种种植模式,分别为 P_1 模式(间作 1∶4∶1 模式)、P_2 模式(间作 2∶2∶2 模式),副因素选用 3 个玉米品种;2023 年在 2022 年基础上进行改进与优化,主因素设置两种种植模式,分别为 P_2 模式、P_3 模式(间作 4∶2 模式),副因素同 2022 年,以单作玉米(M_0)、单作大豆(B_0)为对照,测定不同处理玉米形态特征、光合特征、干物质积累及群体产量等相关指标。【结果】大豆-玉米复合间作提高了玉米株高、叶面积指数、叶绿素含量、干物质积累量及净面积产量,同时提高了作物对土地的利用率,且具有显著优势,其中间作 2∶2∶2 模式较单作增幅较大,玉米叶面积指数及干物质积累量平均较单作分别提高 34.6%和 67.8%,是新疆干旱半干旱灌溉农业区适宜发展的复合间作模式。垦玉 4606 是间作模式下表现较好的玉米品种,间作模式下垦玉 4606 的叶面积指数、冠层叶片叶绿素含量和干物质积累量均最高,平均较其他 2 个品种提高 10.4%,5.9%和 10.8%。【结论】间作 2∶2∶2 模式优势明显,是适宜在新疆春玉米灌溉农业区推广发展的复合间作模式;垦玉 4606 的干物质积累量及产量较高,是适宜大豆-玉米复合间作的春玉米品种。

[关键词] 玉米;大豆;复合种植模式;干物质积累;玉米栽培;土地当量比
[中图分类号] S513.047 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0033-12

Effects of soybean-maize composite intercropping pattern on photosynthetic characteristics and yield formation of maize

WU Haonan, WANG Xuewen, HU Jing, WU Zhongliang, LIU Jianxun, LI Yongbin, YANG Shangbo, PAN Ruijie, GOU Ling
(*Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Production and Construction Corps, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832003, *China*)

Abstract:【Objective】 Under the arid and semi-arid irrigation agricultural conditions in Xinjiang, drip irrigation planting under film was used to explore the effects of different soybean-maize composite planting patterns on maize morphological characteristics, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, yield of composite populations, and land-equivalent ratios. This research aims to clarify the suitable composite planting pattern and maize varieties with high yield in Xinjiang ecological agricultural area, to pro-

[收稿日期] 2024-10-16 [修回日期] 2024-11-28
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32360539);四川省区域创新合作对口科技援疆项目(2021YFQ0015)
[作者简介] 吴昊楠(1999—),女,河北唐山人,硕士,主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail:924606937@qq.com
[通信作者] 勾玲(1966—),女,重庆涪陵人,教授,博士,博士生导师,主要从事作物高产生理与栽培技术研究。E-mail:gl_agr@shzu.edu.cn

vide theoretical and technical support for the high-yield and high-efficiency cultivation of soybean-maize under intercropping, and to "increase the soybean yield, stabilize the maize yield". 【Method】 A two-factor split plot experimental design was adopted. The main factor was composite intercropping patterns, and the secondary factor was maize varieties. The method of drip irrigation under film was used. In 2022, the main factor setting included two planting patterns, namely P_1 pattern (intercropping 1∶4∶1) and P_2 pattern (intercropping 2∶2∶2), and the secondary factor setting included three maize varieties. In 2023, the design was improved and optimized based on the design in 2022. The main factor setting included two planting patterns, namely P_2 pattern and P_3 pattern (intercropping 4∶2), and the secondary factor setting was the same as 2022. Using monoculture maize (M_0) and monoculture soybean (B_0) as control, the morphological characteristics, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and population yield of maize were measured. 【Result】 Soybean-maize intercropping showed significant advantages. It not only increased maize plant height, leaf area index, chlorophyll content, dry matter accumulation and net area yield, but also improved the utilization rate of land. Maize leaf area index and dry matter accumulation increased by 34.6% and 67.8% on average under the intercropping 2∶2∶2 pattern, which was suitable for the development of arid and semi-arid irrigation agricultural area in Xinjiang. The leaf area index, canopy leaf chlorophyll content and dry matter accumulation of Kenyu 4606 under the intercropping pattern were the highest, and the average increase was 10.4%, 5.9% and 10.8% compared with those of the other two varieties. 【Conclusion】 The intercropping 2∶2∶2 pattern shows obvious advantages and is a suitable composite intercropping pattern in spring maize irrigation agricultural areas in Xinjiang, which should be promoted and developed. Kenyu 4606 has high dry matter accumulation and yield, and is a suitable spring maize variety for soybean-maize composite intercropping.

Key words: maize; soybeans; composite cropping pattern; dry matter accumulation; maize cultivation; land equivalent ratio

间作在农业生产中历史悠久，是一种非常有效的种植方式[1]。大豆-玉米复合种植实现了土地、劳动力、土壤养分和水热资源在时间和空间上的集约化利用，具有提高土地产出量及可持续利用性的优势，同时能适应机械化作业，显著提高生产效率。有大量研究指出，大豆-玉米间作群体土地当量比达到1.26～1.81[2-7]，说明大豆-玉米间作能提高作物对土地资源的利用率，具有一定的间作优势。同时，大豆-玉米不同间作模式均能提高单位面积玉米产量，间作后玉米产量较单作提高12.4%～54.5%[4,8-9]。但也有研究发现，间作群体籽粒产量低于单作，系统内收获的大豆产量不能弥补由于单位面积内种植比例降低造成的玉米产量下降[10]。产量的形成很大程度上依赖干物质的积累。大量研究表明，大豆-玉米不同间作模式均可显著增加玉米关键生育期的干物质积累量，灌浆期间作模式下玉米干物质积累量较单作增加51.3%～52.6%，成熟期间作模式干物质积累量较单作增加5.5%～22.7%[11-14]。干物质的增加主要来源于光合作用。前人研究指出，大豆-玉米复合种植模式下通过提高玉米的绿叶面积、叶绿素含量来提高玉米叶片净光合速率。谢永利等[15]研究发现，不同间作模式下玉米叶面积指数在前期、中期均较单作大，尤以4∶2间作方式最明显。大豆-玉米不同间作模式均可提高玉米乳熟期、蜡熟期的叶片叶绿素含量，从而改善玉米的光合作用条件，增强玉米的光合利用能力[16-18]。大豆-玉米不同间作模式在我国西南地区已被广泛推广和应用，但在西北地区特别是新疆干旱半干旱生态区的种植规模较小，关于适宜的种植模式和玉米品种等方面的研究也相对较少。为此，本研究在新疆干旱半干旱灌溉农业条件下，采用膜下滴灌方式，探讨大豆-玉米不同复合种植模式对玉米形态特征、光合特征、干物质积累、复合群体产量形成及土地当量比的影响，明确新疆生态农业区适宜的复合间作种植模式及玉米品种，为大豆-玉米间作高产、高效栽培及实现"大豆增产、玉米稳产"提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种有中早熟品种登海618

（DH618），由山东登海种业股份有限公司选育；中晚熟品种垦玉 4606（KY4606）和垦玉 6189（KY6189），均由新疆农垦科学院选育。供试大豆品种有中早熟品种中黄 35（ZH35），由中国农业科学院选育。

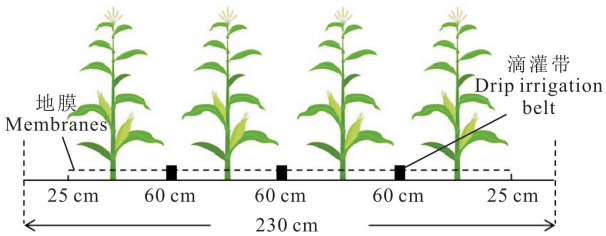
1.2　试验地概况

试验分别于 2022－2023 年在新疆维吾尔自治区石河子大学农试场二连（85°59′E，44°19′ N）和新疆维吾尔自治区乌兰乌苏农业气象试验站（85°51′ E，44°18′ N）进行。试验区域为干旱半干旱灌溉农业区，海拔 475 m，属温带大陆性气候，昼夜温差大，日照充沛，年日照时数 2 721～2 818 h，≥10 ℃有效积温为 3 570～3 729 ℃，无霜期为 168～171 d，平均年降水量 125.9～207.7 mm。试验区土壤类型为轻壤土，耕层土壤理化性状：pH 为 7.6，播前土壤有机质含量为 19.6 g/kg，碱解氮含量为 51.6 mg/kg，速效磷（P_2O_5）含量为 19.8 mg/kg，速效钾（K_2O）含量为 160.0 mg/kg。

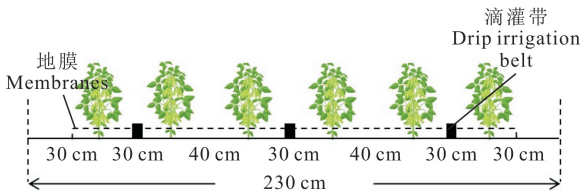
1.3　试验设计

试验采用二因素裂区试验设计，主因素为复合间作模式，副因素为玉米品种，采用膜下滴灌方式进行，膜宽 2.05 m，播种幅宽 2.3 m。

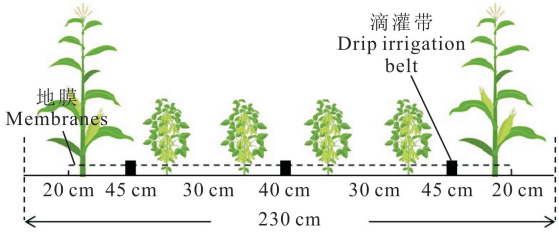
2022 年主因素设置两种种植模式，分别为 P_1 模式（间作 1∶4∶1 模式，即膜上 1 行玉米∶4 行大豆∶1 行玉米）、P_2 模式（间作 2∶2∶2 模式，即膜上 2 行大豆∶2 行玉米∶2 行大豆），排列方式见图 1，以单作玉米（M_0）、单作大豆（B_0）为对照。副因素选用 3 个玉米品种。



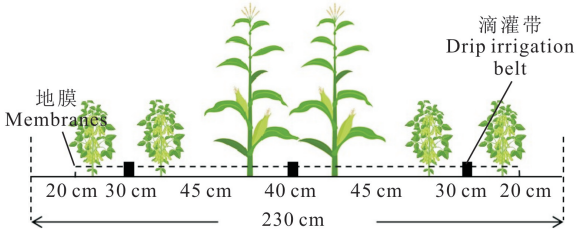
(a)玉米单作(M_0)示意图
(a) Schematic diagram of maize monoculture (M_0)



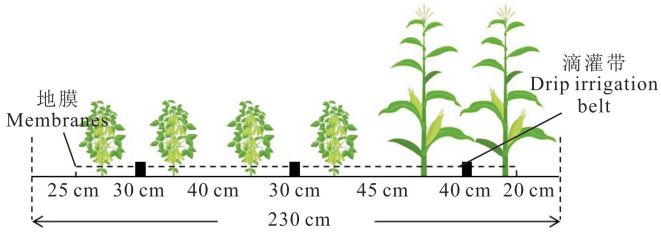
(b)大豆单作(B_0)示意图
(b)Schematic diagram of soybeans monoculture (B_0)



(c)间作1∶4∶1模式(P_1)示意图
(c)Schematic diagram of intercropping 1∶4∶1 pattern (P_1)



(d) 间作2∶2∶2模式(P_2)示意图
(d) Schematic diagram of intercropping 2∶2∶2 pattern (P_2)



(e)间作4∶2模式(P_3)示意图
(e) Schematic diagram of intercropping 4∶2 pattern (P_3)

图 1　玉米、大豆单作及间作种植模式示意图

Fig. 1　Schematic diagram monoculture and intercropping planting patterns for corn and soybean

在 2022 年试验基础上，2023 年进行了进一步改进与优化，主因素设置两种种植模式，选用 2022 年表现较好的 P_2 模式，增添了 P_3 模式（间作 4∶2 模式，即膜上 4 行大豆∶2 行玉米），排列方式见图 1，以单作玉米（M_0）、单作大豆（B_0）为对照。副因素同 2022 年。

每个处理重复 3 次。每小区长 3 m，小区面积 13.8 m^2。玉米种植密度 9.0 万株/hm^2，大豆种植密度 22.5 万株/hm^2（单作、间作相同）。单作玉米等行距种植，行距 60 cm，株距 18.5 cm；单作大豆宽窄行种植，行距 30 cm＋40 cm，株距 11.6 cm。间作模式下玉米株距 9.6 cm，大豆株距 7.7 cm，玉米间

行距40 cm,大豆间行距30 cm+40 cm+30 cm,玉米与大豆行距45 cm;玉米种植面积占复合群体面积的37%,大豆种植面积占复合群体面积的63%。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 *形态特征* 株高:在玉米拔节期(V6)、抽雄期(VT)、乳熟期(R3),每小区选取长势均匀的3株玉米,用卷尺测量地面至顶部最高展开真叶的高度即为株高。穗位高:在玉米乳熟期,每小区选取长势均匀的3株玉米,用卷尺测量地面至第1果穗着生节位的高度即为穗位高,计算穗位系数。

穗位系数=穗位高/株高×100%。

1.4.2 *光合特征* 叶面积:在玉米拔节期、抽雄期、乳熟期、蜡熟期(R4)、完熟期(R6),每小区选取长势均匀的3株玉米,用卷尺测量每片叶的长度和宽度,计算单片叶面积、叶面积指数。单株叶面积为单株玉米所有单片叶面积之和。单片叶面积=长×宽×0.75;叶面积指数(LAI)=单株叶面积×种植密度/小区面积,其中间作模式下玉米叶面积指数用两行玉米占地面积代替小区面积计算。2022年受疫情影响,只测到乳熟期。

叶绿素含量:在玉米灌浆期(R2),每小区选取长势均匀的3株玉米,取穗位叶、穗位以上第3片叶和穗位以下第3片叶,分别记作中层叶片、上层叶片和下层叶片。根据张宪政[19]的方法测定叶绿素含量。

1.4.3 *干物质积累* 在玉米蜡熟期、完熟期,每小区选取长势均匀的3株玉米取样,按茎、叶、雌穗分别装袋,105 ℃下杀青30 min后,在75 ℃烘箱烘干至恒质量,用电子天平称各器官干质量,并计算单株干质量,再换算成单位面积干质量。

1.4.4 *产量及产量结构因子* 玉米产量:于玉米收获期,调查每小区的有效收获穗数;每小区随机选取20个果穗自然风干,水分低于20%时,选择10个有代表性的果穗进行室内考种。考种项目包括:单穗质量、穗粒数、千粒质量、穗行数、穗长、穗粗和秃尖长。选取3个果穗,在75 ℃条件下烘干至恒质量,测定果穗及籽粒含水量,计算玉米产量。玉米产量=有效收获穗数×穗粒数×千粒质量/1 000 000×(1-含水率)/(1-14%)。间作玉米复合产量为基于大豆-玉米总间作带占地面积的产量,间作玉米净面积产量为基于玉米实际占地面积的产量[20]。

大豆产量:于大豆收获期,调查每小区的有效收获株数;每小区选取15株大豆植株,测定粒数、百粒质量等产量结构因子,计算大豆产量。大豆产量=有效收获株数×单株粒数×百粒质量/100 000×(1-含水率)/(1-14%)。间作大豆复合产量为基于大豆-玉米总间作带占地面积的产量,间作大豆净面积产量为基于大豆实际占地面积的产量[20]。

1.4.5 *群体生产力* 群体复合产量:根据不同复合间作种植模式下玉米、大豆的复合产量计算群体复合产量。间作群体复合产量=间作玉米复合产量+间作大豆复合产量。

土地当量比计算公式如下。

$$E_m=Y_{mi}/Y_m;$$

$$E_s=Y_{si}/Y_s;$$

$$E=E_m+E_s。$$

式中:E_m 表示玉米在间作中的土地当量比;Y_{mi} 表示玉米在间作中的产量;Y_m 表示玉米在单作中的产量;E_s 表示大豆在间作中的土地当量比;Y_{si} 表示大豆在间作中的产量;Y_s 表示大豆在单作中的产量;E 表示间作系统的土地当量比。$E>1$,表示间作系统存在产量优势;$E<1$,表示间作系统存在产量劣势。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2019和SPSS 19.0软件进行统计分析,显著性检验采用LSD法,采用SigmaPlot 12.5和Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 大豆-玉米复合间作对玉米形态特征的影响

由表1可以看出,大豆-玉米不同复合种植模式下玉米的株高、穗位高和穗位系数均较单作玉米(M_0)提高。复合种植模式下,3个生育时期玉米的株高平均较单作提高3.5%,其中2022年间作1∶4∶1模式(P_1)的增幅较大,较单作提高4.3%;2023年间作4∶2模式(P_3)的增幅较大,较单作提高4.1%,且均于乳熟期(R_3)达到显著水平($P<0.05$)。复合种植模式下,乳熟期玉米的穗位高平均较单作提高7.7%,其中2022年间作1∶4∶1模式的增幅较大,较单作提高10.6%;2023年间作2∶2∶2模式(P_2)的增幅较大,较单作提高7.4%,均达到显著水平($P<0.05$)。复合种植模式下,乳熟期玉米的穗位系数平均较单作提高1.5%,其中2022年间作1∶4∶1模式的增幅较大,较单作提高2.4%,达到显著水平($P<0.05$);2023年间作2∶2∶2模式的增幅较大,较单作提高1.5%。各玉米品种中垦玉4606(KY4606)的株高、穗位高和穗位系数最高,分别较登海618(DH618)提高16.4%,25.7%和3.0%,达到显著水平($P<0.05$)。

表 1　大豆-玉米复合间作对玉米形态特征的影响

Table 1　Effect of soybean-maize composite intercropping on morphological characteristics of maize

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	株高/cm Plant height			穗位高/cm Ear height	穗位系数/% Earliness ratio
			V6	VT	R3		
2022	M_0	DH618	93.3±4.1 b	241.7±4.9 b	240.7±4.6 b	79.9±5.4 b	33.2±2.9 b
		KY4606	110.7±7.4 a	268.0±5.9 a	273.0±7.8 a	106.7±4.6 a	39.1±0.7 a
		KY6189	102.0±4.9 ab	260.7±6.2 a	270.7±6.1 a	102.8±5.4 a	38.0±1.8 a
	P_1	DH618	99.7±4.5 b	247.7±4.5 b	250.0±6.2 b	88.5±4.5 b	35.4±1.4 b
		KY4606	116.3±5.0 a	272.7±5.6 a	283.3±5.9 a	117.1±4.3 a	41.3±0.9 a
		KY6189	110.3±6.6 ab	265.0±4.9 a	280.0±8.0 a	114.5±4.9 a	40.9±0.7 a
	P_2	DH618	94.7±4.6 b	248.7±7.4 b	246.3±4.1 b	84.9±4.1 b	34.5±1.5 b
		KY4606	115.7±10.2 a	273.7±6.6 a	281.3±3.4 a	110.7±4.1 a	39.3±1.0 a
		KY6189	108.7±6.1 ab	267.0±5.4 a	273.7±3.9 a	110.7±5.1 a	40.5±2.4 a
	平均 Average						
	M_0	/	102.0 a	256.8 a	261.5 b	96.5 b	36.8 b
	P_1	/	108.8 a	263.1 a	271.1 a	106.7 a	39.2 a
	P_2	/	106.4 a	261.8 a	267.1 ab	102.1 a	38.1 a
	/	DH618	95.9 b	246.0 b	245.7 b	84.4 b	34.4 b
	/	KY4606	114.2 a	271.4 a	279.2 a	111.5 a	39.9 a
	/	KY6189	107.0 a	264.2 a	274.8 a	109.4 a	39.8 a
2023	M_0	DH618	87.4±5.3 b	217.9±6.3 c	227.9±6.4 b	82.7±6.2 b	36.3±2.3 a
		KY4606	104.4±5.2 a	257.4±5.5 a	275.2±7.3 a	100.9±4.2 a	36.7±1.4 a
		KY6189	99.8±6.1 ab	243.5±5.1 b	264.9±7.4 a	100.5±4.6 a	37.9±1.6 a
	P_2	DH618	92.5±4.1 b	223.4±6.4 b	239.4±6.6 b	90.4±6.1 b	37.8±2.1 a
		KY4606	108.2±5.7 a	260.7±4.5 a	282.0±6.2 a	109.8±6.8 a	39.0±2.9 a
		KY6189	102.0±4.7 ab	249.3±6.8 a	270.4±8.3 a	105.0±5.7 ab	38.8±1.6 a
	P_3	DH618	90.8±4.5 b	224.6±8.5 b	243.3±6.4 b	93.6±5.1 a	38.5±2.7 a
		KY4606	112.0±4.7 a	265.1±5.4 a	281.5±7.1 a	107.5±6.1 a	38.1±1.2 a
		KY6189	103.8±7.8 ab	248.5±7.1 a	276.8±5.5 a	102.6±6.0 a	37.1±2.9 a
	平均 Average						
	M_0	/	97.2 a	239.6 b	256.0 b	94.7 b	37.0 a
	P_2	/	100.9 a	244.5 ab	263.9 a	101.7 a	38.5 a
	P_3	/	102.2 a	246.0 a	267.2 a	101.2 a	37.9 a
	/	DH618	90.3 b	222.0 c	236.9 c	88.9 b	37.5 a
	/	KY4606	108.2 a	261.1 a	279.6 a	106.0 a	37.9 a
	/	KY6189	101.9 a	247.1 b	270.7 b	102.7 a	38.0 a

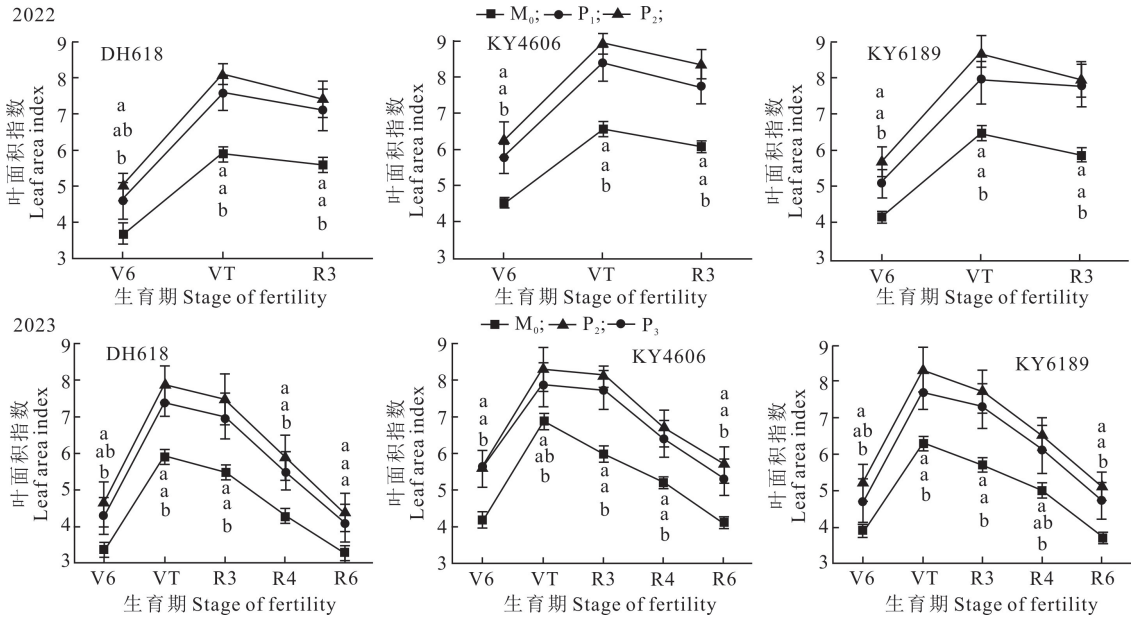
注：M_0. 单作玉米；P_1. 间作 1∶4∶1 模式；P_2. 间作 2∶2∶2 模式；P_3. 间作 4∶2 模式；DH618. 登海 618；KY4606. 垦玉 4606；KY6189. 垦玉 6189；V6. 拔节期；VT. 抽雄期；R3. 乳熟期。表中不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note：M_0. Monoculture maize；P_1. Intercropping 1∶4∶1 pattern；P_2. Intercropping 2∶2∶2 pattern；P_3. Intercropping 4∶2 pattern；DH618. Denghai 618；KY4606. Kenyu 4606；KY6189. Kenyu 6189；V6. Jointing stage；VT. Tasseling stage；R3. Milky stage. Different lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below.

2.2　大豆-玉米复合间作对玉米光合特征的影响

2.2.1　*对玉米叶面积指数的影响*　由图 2 可以看出，随着生育时期推进，玉米叶面积指数呈先升高后下降的趋势，于抽雄期（VT）达到最大值。大豆-玉米复合间作下，玉米的叶面积指数平均较单作玉米（M_0）提高 30.4%，达到显著水平（$P<0.05$），其中间作 2∶2∶2 模式（P_2）的增幅较大，为 34.6%。各玉米品种中垦玉 4606（KY4606）的叶面积指数最高，较其他 2 个品种提高 10.4%。

2.2.2　*对玉米冠层叶片叶绿素含量的影响*　由表 2 可以看出，复合间作下玉米冠层叶片叶绿素含量表现为中层叶片＞上层叶片＞下层叶片。两年试验结果表明，大豆-玉米不同复合种植模式下，灌浆期（R2）玉米叶片叶绿素含量高于单作玉米（M_0），且达到显著水平（$P<0.05$），平均较单作增加 7.5%，其中间作 2∶2∶2 模式（P_2）的增幅较大，平均增幅为 9.4%；上层叶片、中层叶片和下层叶片叶绿素含量平均较单作增加 7.6%，6.9% 和 8.0%。各玉米品种中垦玉 4606（KY4606）叶片的叶绿素含量最高，平均较其他 2 个品种提高 5.9%。



图中不同小写字母表示不同种植模式之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between different planting patterns($P<0.05$). The same below.

图 2 大豆-玉米复合间作对玉米叶面积指数的影响

Fig. 2 Effect of soybean-maize composite intercropping on leaf area index of maize

表 2 大豆-玉米复合间作对玉米灌浆期冠层叶片叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of soybean-maize composite intercropping on the chlorophyll content of canopy leaves during maize filling stage

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	叶绿素含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll content		
			上层叶片 Upper leaf	中层叶片 Middle leaf	下层叶片 Lower leaf
2022	M_0	DH618	3.89±0.11 b	3.98±0.06 b	3.69±0.08 a
		KY4606	4.31±0.13 a	4.69±0.07 a	3.88±0.11 a
		KY6189	3.98±0.14 b	4.69±0.10 a	3.77±0.09 a
	P_1	DH618	4.16±0.08 b	4.27±0.06 b	3.97±0.05 b
		KY4606	4.56±0.07 a	4.97±0.11 a	4.19±0.07 a
		KY6189	4.30±0.10 b	4.94±0.06 a	4.04±0.09 ab
	P_2	DH618	4.36±0.11 b	4.43±0.05 b	4.17±0.05 a
		KY4606	4.76±0.12 a	5.17±0.04 a	4.36±0.07 a
		KY6189	4.45±0.11 b	5.16±0.06 a	4.21±0.12 a
	平均 Average				
	M_0	/	4.06 c	4.45 c	3.78 c
	P_1	/	4.34 b	4.73 b	4.06 b
	P_2	/	4.52 a	4.92 a	4.25 a
	/	DH618	4.14 c	4.23 b	3.94 c
	/	KY4606	4.55 a	4.94 a	4.14 a
	/	KY6189	4.24 b	4.93 a	4.01 b
2023	M_0	DH618	4.30±0.10 b	4.53±0.05 b	4.03±0.09 b
		KY4606	4.59±0.00 a	4.83±0.02 a	4.39±0.02 a
		KY6189	4.49±0.07 a	4.76±0.08 a	4.29±0.05 a
	P_2	DH618	4.64±0.07 b	4.83±0.06 b	4.37±0.11 b
		KY4606	4.94±0.08 a	5.18±0.04 a	4.71±0.01 a
		KY6189	4.83±0.01 a	5.08±0.09 a	4.61±0.02 a
	P_3	DH618	4.49±0.11 b	4.72±0.05 b	4.22±0.06 b
		KY4606	4.80±0.09 a	5.03±0.12 a	4.57±0.01 a
		KY6189	4.71±0.00 a	4.92±0.02 a	4.50±0.11 a
	平均 Average				
	M_0	/	4.46 c	4.71 c	4.24 c
	P_2	/	4.80 a	5.03 a	4.56 a
	P_3	/	4.67 b	4.89 b	4.43 b
	/	DH618	4.48 c	4.69 b	4.21 b
	/	KY4606	4.78 a	5.01 a	4.56 a
	/	KY6189	4.68 b	4.92 a	4.47 a

2.3　大豆-玉米复合间作对玉米干物质积累的影响

由表 3 可以看出,大豆-玉米不同复合种植模式下玉米总干质量及各器官干质量均增加。蜡熟期(R4)和完熟期(R6)间作模式下玉米总干质量平均较单作玉米(M_0)分别增加 55.2%和 58.3%,平均增幅为 56.8%;R4 和 R6 间作模式下玉米雌穗干质量平均较单作分别增加 61.1%和 60.5%,均达到显著水平($P<0.05$)。间作 2∶2∶2 模式(P_2)增幅较大,蜡熟期和完熟期玉米总干质量平均较单作分别增加 65.6%和 70.0%,两个时期平均增幅为 67.8%,显著高于间作 4∶2 模式(P_3)。各玉米品种中垦玉 4606(KY4606)的总干质量最高,平均较其他 2 个品种提高 10.8%。

表 3　大豆-玉米复合间作对玉米干物质积累的影响(2023 年)

Table 3　Effect of soybean-maize composite intercropping on dry matter accumulation in maize(2023)

生育期 Stage of fertility	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	干物质积累量/(kg·m^{-2}) Dry matter accumulation			
			茎 Stalk	叶 Leaf	雌穗 Female ear	合计 Total
R4	M_0	DH618	0.7±0.1 a	0.3±0.0 a	1.6±0.1 b	2.6±0.1 b
		KY4606	0.7±0.0 a	0.4±0.0 a	1.9±0.1 a	3.0±0.1 a
		KY6189	0.7±0.1 a	0.4±0.0 a	1.8±0.1 a	2.9±0.1 a
	P_2	DH618	1.1±0.1 a	0.5±0.0 a	2.7±0.1 b	4.3±0.2 b
		KY4606	1.2±0.1 a	0.6±0.0 a	3.4±0.2 a	5.2±0.3 a
		KY6189	1.1±0.1 a	0.5±0.0 a	3.2±0.1 a	4.8±0.3 ab
	P_3	DH618	0.9±0.1 a	0.5±0.0 a	2.3±0.2 b	3.7±0.3 a
		KY4606	1.0±0.1 a	0.5±0.0 a	2.9±0.2 a	4.4±0.3 a
		KY6189	0.9±0.0 a	0.5±0.0 a	2.8±0.2 a	4.2±0.2 a
	平均 Average					
	M_0	/	0.7 c	0.4 c	1.8 c	2.9 c
	P_2	/	1.1 a	0.6 a	3.1 a	4.8 a
	P_3	/	1.0 b	0.5 b	2.7 b	4.2 b
	/	DH618	0.9 a	0.4 a	2.2 b	3.5 b
	/	KY4606	1.0 a	0.5 a	2.7 a	4.2 a
	/	KY6189	0.9 a	0.5 a	2.6 a	4.0 a
R6	M_0	DH618	0.7±0.1 a	0.4±0.0 a	1.7±0.1 b	2.8±0.1 b
		KY4606	0.8±0.0 a	0.4±0.0 a	2.0±0.1 a	3.2±0.1 a
		KY6189	0.8±0.1 a	0.4±0.0 a	1.9±0.1 a	3.1±0.1 a
	P_2	DH618	1.2±0.1 a	0.6±0.0 a	2.9±0.1 b	4.7±0.2 b
		KY4606	1.3±0.1 a	0.6±0.0 a	3.6±0.2 a	5.5±0.3 a
		KY6189	1.2±0.1 a	0.6±0.0 a	3.4±0.1 a	5.2±0.3 ab
	P_3	DH618	1.0±0.1 a	0.5±0.0 a	2.5±0.2 b	4.0±0.3 a
		KY4606	1.1±0.1 a	0.6±0.0 a	3.1±0.2 a	4.8±0.2 a
		KY6189	1.0±0.0 a	0.5±0.0 a	3.0±0.2 ab	4.5±0.3 a
	平均 Average					
	M_0	/	0.8 c	0.4 c	1.9 c	3.0 c
	P_2	/	1.2 a	0.6 a	3.3 a	5.1 a
	P_3	/	1.0 b	0.5 b	2.8 b	4.4 b
	/	DH618	1.0 a	0.5 a	2.3 b	3.8 b
	/	KY4606	1.1 a	0.5 a	2.9 a	4.4 a
	/	KY6189	1.0 a	0.5 a	2.8 a	4.3 a

注:R4. 蜡熟期;R6. 完熟期。

Note:R4. Waxing stage;R6. Maturity stage.

2.4　大豆-玉米复合间作对玉米产量及群体复合产量的影响

2.4.1　*对玉米产量及其结构因子的影响*　由表 4 可以看出,大豆-玉米不同复合种植模式均提高了玉米净面积产量,且达到显著水平($P<0.05$)。间作模式下玉米净面积产量平均较单作玉米(M_0)提高 92.0%,其中间作 2∶2∶2 模式(P_2)较单作增幅较大,在两年试验中分别较单作玉米提高 97.8%和 96.6%。各玉米品种中垦玉 4606(KY4606)的净面积产量最高,平均较其他 2 个品种提高 9.9%。

2.4.2　*对群体复合产量的影响*　由表 5 可以看出,大豆-玉米不同种植模式下群体复合产量均在 10 000 kg/hm^2 以上,均高于单作大豆(B_0)产量,说明间作具有一定的增产优势。间作模式下,复合产量平均较单作大豆提高 193.1%,达到显著水平($P<0.05$),其中间作 2∶2∶2 模式(P_2)较单作增幅较大,平均增幅 200.1%。两年试验中复合产量最高的均是间作 2∶2∶2 模式下垦玉 4606

(KY4606)搭配中黄 35(ZH35),较其他品种搭配增加 0.9%～23.6%。综合比较,垦玉 4606 搭配中黄 35 是具有一定产量优势的品种搭配方式,有利于提高群体复合产量。

表 4 大豆-玉米复合间作对玉米产量及其结构因子的影响

Table 4 Effect of soybean-maize composite intercropping on maize yield and yield structure factors

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	有效收获穗数/(个·hm^{-2}) Effective number of ears harvested	穗粒数 Number of grains per ear	千粒质量/g 1 000-grain weight	净面积产量/(kg·hm^{-2}) Net area yield
2022	M_0	DH618	83 232±3 186 a	531±14 b	321.3±18.4 a	14 201.3±902.2 a
		KY4606	80 790±3 067 a	575±16 a	344.4±10.0 a	16 034.6±1 346.8 a
		KY6189	80 188±3 257 a	559±16 ab	340.7±15.1 a	15 320.0±1 430.9 a
	P_1	DH618	150 535±7 043 a	529±17 a	318.8±13.6 a	25 471.9±2 701.3 a
		KY4606	152 819±7 018 a	564±23 a	341.4±13.7 a	29 469.1±2 652.4 a
		KY6189	155 113±10 066 a	548±11 a	334.7±11.8 a	28 438.7±2 046.5 a
	P_2	DH618	160 294±9 551 a	531±13 a	318.7±13.2 a	27 195.9±3 008.7 a
		KY4606	165 490±7 811 a	572±23 a	343.8±9.8 a	32 595.5±2 830.7 a
		KY6189	162 204±8 688 a	553±16 a	337.2±18.0 a	30 340.9±3 103.2 a
	平均 Average					
	M_0	/	81 403 c	555 a	335.5 a	15 185.3 b
	P_1	/	152 822 b	547 a	331.6 a	27 793.2 a
	P_2	/	162 663 a	552 a	333.3 a	30 044.1 a
	/	DH618	131 354 a	530 b	319.6 b	22 289.7 b
	/	KY4606	133 033 a	570 a	343.2 a	26 033.1 a
	/	KY6189	132 502 a	554 ab	337.6 ab	24 699.9 ab
2023	M_0	DH618	78 941±2 885 a	510±13 b	334.8±7.7 a	13 507.2±989.8 b
		KY4606	78 313±2 626 a	587±12 a	343.4±14.6 a	15 784.9±699.2 a
		KY6189	75 076±2 231 a	596±16 a	344.1±13.5 a	15 397.0±768.6 ab
	P_2	DH618	160 082±7 060 a	511±9 b	326.0±5.9 a	26 723.6±1 989.9 a
		KY4606	158 012±7 735 a	583±14 a	333.8±11.9 a	30 731.3±1 813.1 a
		KY6189	156 607±4 879 a	588±8 a	329.5±13.0 a	30 409.4±2 578.4 a
	P_3	DH618	158 925±7 361 a	499±10 b	325.5±11.3 a	25 815.2±1 955.9 a
		KY4606	157 352±7 606 a	574±11 a	330.7±15.2 a	29 976.4±3 170.5 a
		KY6189	154 642±7 076 a	573±10 a	330.7±16.4 a	29 352.2±2 769.6 a
	平均 Average					
	M_0	/	77 443 b	565 a	340.8 a	14 896.3 b
	P_2	/	158 234 a	561 ab	329.8 a	29 288.1 a
	P_3	/	156 973 a	549 b	329.0 a	28 381.3 a
	/	DH618	132 649 a	507 b	328.8 a	22 015.3 b
	/	KY4606	131 226 a	582 a	336.0 a	25 497.5 a
	/	KY6189	128 775 a	586 a	334.8 a	25 052.8 a

表 5 大豆-玉米复合间作对群体复合产量的影响

Table 5 Effect of soybean-maize composite intercropping on population composite yield

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	大豆品种 Soybean variety	玉米产量/(kg·hm^{-2}) Maize yield	大豆产量/(kg·hm^{-2}) Soybean yield	复合产量/(kg·hm^{-2}) Compound yield
2022	M_0	DH618	/	14 201.3	/	14 201.3
		KY4606	/	16 034.6	/	16 034.6
		KY6189	/	15 320.0	/	15 320.0
	B_0	/	ZH35	/	4 002.6	4 002.6
	P_1	DH618	ZH35	9 434.0	1 902.4	11 336.4
		KY4606	ZH35	10 914.5	1 902.4	12 816.9
		KY6189	ZH35	10 532.9	1 902.4	12 435.3
		平均 Average		10 293.8	1 902.4	12 196.2
	P_2	DH618	ZH35	10 072.6	1 936.5	12 009.1
		KY4606	ZH35	12 072.4	1 936.5	14 009.0
		KY6189	ZH35	11 237.4	1 936.5	13 173.9
		平均 Average		11 127.4	1 936.5	13 063.9

表 5(续)　Table 5(continued)

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	大豆品种 Soybean variety	玉米产量/(kg·hm^{-2}) Maize yield	大豆产量/(kg·hm^{-2}) Soybean yield	复合产量/(kg·hm^{-2}) Compound yield
2023	M_0	DH618	/	13 507.2	/	13 507.2
		KY4606	/	15 784.9	/	15 784.9
		KY6189	/	15 397.0	/	15 397.0
	B_0	/	ZH35	/	4 847.3	4 847.3
	P_2	DH618	ZH35	9 876.1	2 445	12 321.1
		KY4606	ZH35	11 357.2	2 445	13 802.2
		KY6189	ZH35	11 238.3	2 445	13 683.3
		平均 Average		10 823.9	2 445	13 268.9
	P_3	DH618	ZH35	9 540.4	2 475.9	12 016.3
		KY4606	ZH35	11 078.2	2 475.9	13 554.2
		KY6189	ZH35	10 847.5	2 475.9	13 323.5
		平均 Average		10 488.7	2 475.9	12 964.7

注：ZH35. 中黄 35。下同。

Note: ZH35. Zhonghuang 35. The same below.

2.4.3　对群体土地当量比的影响　由表 6 可以看出，在大豆-玉米间作模式下，复合群体土地当量比(E)为 1.14～1.24，均超过 1，表明大豆-玉米间作模式在产量上相对于单作具有明显优势。间作 2∶2∶2 模式(P_2)下土地当量比较高，2022 年间作 2∶2∶2 模式下土地当量比平均为 1.21，较间作 1∶4∶1 模式(P_1)提高 5.0%；2023 年间作 2∶2∶2 模式下土地当量比平均为 1.23，较间作 4∶2 模式(P_3)提高 2.0%。2022 年各品种玉米的土地当量比(E_m)最高的是垦玉 4606(KY4606)，说明垦玉 4606 具有较高的土地利用率。

表 6　大豆-玉米复合间作对群体土地当量比的影响

Table 6　Effect of soybean-maize composite intercropping on population land equivalent ratio

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	玉米品种 Maize variety	大豆品种 Soybean variety	E_m	E_s	E
2022	P_1	DH618	ZH35	0.66	0.48	1.14
		KY4606	ZH35	0.70	0.48	1.18
		KY6189	ZH35	0.69	0.48	1.17
		平均 Average		0.68	0.48	1.16
	P_2	DH618	ZH35	0.71	0.48	1.19
		KY4606	ZH35	0.75	0.48	1.23
		KY6189	ZH35	0.73	0.48	1.21
		平均 Average		0.73	0.48	1.21
2023	P_2	DH618	ZH35	0.73	0.50	1.24
		KY4606	ZH35	0.72	0.50	1.22
		KY6189	ZH35	0.73	0.50	1.23
		平均 Average		0.73	0.50	1.23
	P_3	DH618	ZH35	0.71	0.51	1.22
		KY4606	ZH35	0.70	0.51	1.21
		KY6189	ZH35	0.70	0.51	1.21
		平均 Average		0.70	0.51	1.21

注：E_m. 玉米在间作中的土地当量比；E_s. 大豆在间作中的土地当量比；E. 间作系统的土地当量比。

Note: E_m. Land-equivalent ratio of maize in intercropping; E_s. Land-equivalent ratio of soybeans in intercropping; E. Land-equivalent ratio of intercropping systems.

3　讨　论

3.1　大豆-玉米复合间作对玉米形态特征的影响

株高是作物重要的株型性状，株高与玉米的产量和抗倒伏等性状密切相关，株高过高会增加作物的倒伏，过低则影响生物量，降低光合产物的积累，最终导致产量降低。WEI 等[21]提出，与单作相比，间作玉米株高增加了 6.1%～8.4%。张忠华等[22]研究发现，与玉米单作处理相比，大豆-玉米复合间作可以提高玉米株高，增幅为 4.7%。林平等[23]研

究表明,玉米与大豆复合间作可明显促进抽雄期和灌浆期玉米株高生长。本研究结果表明,大豆-玉米不同复合间作模式均提高了玉米株高、穗位高及穗位系数,平均较单作分别提高3.5%,7.7%和1.5%,其中间作1∶4∶1模式和间作4∶2模式的增幅较大。这是由于本研究在间作复合群体中玉米的种植密度与单作一致,间作条件下缩小了玉米株距,植株个体为了获取更多的光热资源,纵向生长加快,使植株株高、穗位高提升,但这会增加田间倒伏的风险,影响后期干物质积累及产量的形成。因此,后续可通过改进间作模式中玉米和大豆的占比,探寻适宜的株行距配置,进而提高玉米产量及群体复合产量。

3.2 大豆-玉米复合间作对玉米光合特征的影响

王秀领等[16]研究结果表明,间作玉米的叶绿素含量显著高于单作玉米,提高幅度为9.2%~12.0%。刘朝茂等[18]研究发现,玉米-大豆2∶2间作模式下,玉米叶片叶绿素含量高于玉米单作种植模式。李美霞等[24]研究发现,与单作相比,间作种植模式下,在各生育时期玉米叶片叶绿素含量相对较高,其中玉米-大豆2∶4间作模式表现差异显著。本试验结果表明,大豆-玉米复合间作种植明显提高了玉米叶片叶绿素含量,间作条件下玉米叶片叶绿素含量平均较单作增加7.5%,其中间作2∶2∶2模式的增幅较大,平均增幅为9.4%,不同复合间作模式间差异不显著。前人对玉米叶片叶绿素含量变化的研究大多集中在穗位叶上,但玉米叶片的光合作用贯穿于整个植株冠层。本试验通过分层对穗位叶、穗位以上第3片叶及穗位以下第3片叶进行叶绿素含量分析发现,复合间作模式下玉米叶片叶绿素含量较单作增幅最大的叶层均为玉米上层叶片,其次为中部穗位叶片。说明大豆-玉米复合间作能促进玉米上层叶片叶绿素含量的增加,改善上层叶片光合条件,进而促进玉米光合产物的积累。

3.3 大豆-玉米复合间作对玉米干物质积累的影响

干物质积累是籽粒形成的物质基础,产量的形成与其在各器官间的积累、分配和转移密切相关,其积累水平决定了最终籽粒产量的高低[25]。赵德强等[12]研究发现,大豆-玉米不同间作模式下,从大喇叭口期之后玉米干物质积累变化趋势为大豆-玉米间作6∶3模式>大豆-玉米间作6∶6模式>大豆-玉米间作3∶3模式>大豆-玉米间作3∶6模式>单作玉米,成熟期大豆-玉米6∶3间作模式下干物质积累在2017年和2018年较单作玉米分别提高52.63%和51.85%,达到显著水平。蔡倩等[14]研究发现,玉米-大豆间作2∶2模式、玉米-大豆间作4∶4模式、玉米-大豆间作6∶6模式3种间作模式,均提高了玉米拔节期和灌浆期的干物质积累量,较单作玉米分别增加16.9%~20.3%和51.3%~52.6%,说明大豆-玉米间作可显著增加玉米干物质积累量。本研究结果表明,复合间作显著提高了单位面积内玉米干物质积累量,2023年间作模式下玉米蜡熟期、完熟期总干物质量平均较单作玉米增加55.2%和58.3%,雌穗干物质量平均较单作玉米增加61.1%和60.5%,均达到显著水平,其中间作2∶2∶2模式较单作玉米的增幅较大,蜡熟期、完熟期玉米总干物质积累量平均较单作玉米增加65.6%和70.0%,显著高于间作4∶2模式。

3.4 大豆-玉米复合间作对玉米产量的影响

蔡倩等[7]研究发现,不同间作模式均提高了单位面积玉米产量。曹曼君[26]研究发现,与单作相比,间作显著提高了玉米的穗质量、穗粒质量、百粒质量,各处理从高到低依次为玉米-大豆间作2∶4模式>玉米-大豆间作4∶4模式>玉米-大豆间作4∶6模式>单作玉米,各间作带内玉米产量较单作分别增产68.47%,66.52%和61.82%;复合总产量大体表现为各间作处理均低于单作玉米,高于单作大豆,且均具有显著差异,从高到低依次为单作玉米>玉米-大豆间作4∶4模式>玉米-大豆间作4∶6模式>玉米-大豆间作2∶4模式>单作大豆。本试验中,复合间作模式下玉米净面积产量平均较单作提高92.0%,达到显著水平,其中间作2∶2∶2模式较单作增幅较大,在两年试验中分别较单作提高97.8%和96.6%。各玉米品种中垦玉4606(KY4606)的净面积产量最高,平均较其他2个品种提高9.9%。间作群体复合产量显著高于单作大豆产量,说明间作具有一定的增产优势。虽然大豆-玉米不同复合间作模式均显著提高了玉米净面积产量,但群体复合产量仍低于单作玉米,这是由于在本试验设计中大豆-玉米间作4∶2模式的行比配置导致玉米的占地比例较小,若增大玉米的占地比例,群体复合产量可有望提高到接近或高于单作玉米的目标。

4 结 论

大豆-玉米不同复合间作模式均能提高玉米株高、穗位高及穗位系数,增加玉米叶面积指数、冠层叶片叶绿素含量及干物质积累量,同时提高了玉米

净面积产量及复合群体土地利用效率。其中间作 2∶2∶2 模式优势明显，玉米叶面积指数及干物质积累量平均较单作提高 34.6%和 67.8%，适宜在新疆干旱半干旱春玉米灌溉农业区推广应用。间作模式下垦玉 4606 的叶面积指数、冠层叶片叶绿素含量和干物质积累量均最高，平均较其他 2 个品种分别提高 10.4%，5.9%和 10.8%，是适宜大豆-玉米复合间作的春玉米品种。

[参考文献]

[1] 刘巽浩. 中国耕作制度[M]. 北京：农业出版社，1993.
LIU X H. Farming system in China[M]. Beijing：China Agricultural Press，1993.

[2] GUTU T. Influence of varieties and population of intercropped soybean with maize on land equivalent ratio (LER) and growth monetary value (GMV) of the component crops[J]. Journal of Biology，Agriculture and Healthcare，2016，6(11)：25-29.

[3] 张晓娜，陈平，庞婷，等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. 四川农业大学学报，2017，35(4)：484-490.
ZHANG X N，CHEN P，PANG T，et al. The effects of dry matter accumulation，distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system[J]. Journal of Sichuan Agricultural University，2017，35(4)：484-490.

[4] 董楠. 不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制[D]. 北京：中国农业大学，2017.
DONG N. Ecological mechanism of intercropping advantages and temporal and spatial stability of different crop combinations[D]. Beijing：China Agricultural University，2017.

[5] 封亮. 红壤旱地玉米大豆间作田间配置方式对作物产量、养分吸收及种间关系的影响[D]. 南昌：江西农业大学，2021.
FENG L. Effects of field configuration of maize-soybean intercropping on crop yield，nutrient absorption and interspecific relationship in red soil dryland[D]. Nanchang：Jiangxi Agricultural University，2021.

[6] ALI RAZA M，GUL H，WANG J，et al. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas：a case study in Punjab Province，Pakistan[J]. Journal of Cleaner Production，2021，308：127282.

[7] 蔡倩，孙占祥，王文斌，等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响[J]. 中国农业气象，2022，43(7)：551-562.
CAI Q，SUN Z X，WANG W B，et al. Yield and water use of maize/soybean intercropping systems in semi-arid western Liaoning[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，2022，43(7)：551-562.

[8] 刘洋，孙占祥，白伟，等. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响[J]. 大豆科学，2011(2)：224-228.
LIU Y，SUN Z X，BAI W，et al. Effect of maize and soybean interplanting on crops growth and yield in western Liaoning Province[J]. Soybean Science，2011(2)：224-228.

[9] CHEN X F. Maize-soybean strip intercropping improved lodging resistance and productivity of maize[J]. International Journal of Agriculture and Biology，2020，24(5)：1383-1392.

[10] 朱元刚，高凤菊. 不同间作模式对鲁西北地区玉米-大豆群体光合物质生产特征的影响[J]. 核农学报，2016，30(8)：1646-1655.
ZHU Y G，GAO F J. Effects of different maize and soybean intercropping patterns on population characteristics of photosynthetic and matter production in northwest Shandong region[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2016，30(8)：1646-1655.

[11] 高阳，段爱旺，刘祖贵，等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. 中国农学通报，2009，25(2)：214-221.
GAO Y，DUAN A W，LIU Z G，et al. Effect of intercropping patterns on dry matter accumulation and yield components of maize and soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2009，25(2)：214-221.

[12] 赵德强，李彤，侯玉婷，等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. 中国农业科学，2020，53(10)：1971-1985.
ZHAO D Q，LI T，HOU Y T，et al. Benefits and marginal effect of dry matter accumulation and yield in maize and soybean intercropping patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica，2020，53(10)：1971-1985.

[13] 袁嘉磊. 玉米大豆不同间作模式群体生理基础及适宜性研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.
YUAN J L. Study on physiological basis and suitability of different intercropping patterns of maize and soybean[D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2021.

[14] 蔡倩，孙占祥，郑家明，等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业科学，2021，54(5)：909-920.
CAI Q，SUN Z X，ZHENG J M，et al. Dry matter accumulation，allocation，yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province[J]. Scientia Agricultura Sinica，2021，54(5)：909-920.

[15] 谢永利，陈颖. 不同间作方式对玉米产量的影响[J]. 山地农业生物学报，2004，23(5)：381-385.
XIE Y L，CHEN Y. The influence of different intercropping patterns on corn yield[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology，2004，23(5)：381-385.

[16] 王秀领，闫旭东，徐玉鹏，等. 玉米-大豆间作复合体系光合特性研究[J]. 河北农业科学，2012，16(4)：33-35，59.
WANG X L，YAN X D，XU Y P，et al. Study on the photosynthetic characteristics of intercropping system of maize and soybean[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences，2012，16(4)：33-35，59.

[17] 杨磊，吴晗，赵立华，等. 玉米与大豆间作对玉米叶片气孔及光合效率的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版)，2012(1)：39-43.

YANG L,WU H,ZHAO L H,et al. The effect of intercropping of maize and soybean on stomata and photosynthetic efficiency of maize[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science),2012(1):39-43.

[18] 刘朝茂,李成云. 玉米与大豆、马铃薯间作对玉米叶片衰老、产量及病害控制的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):75-78.
LIU C M,LI C Y. Effects of intercropping maize with soybean and potato on leaf senescence, yield and disease control of maize[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(6):75-78.

[19] 张宪政. 植物叶绿素含量测定:丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学,1986(3):26-28.
ZHANG X Z. Determination of chlorophyll content in plant: acetone-ethanol mixed solution method[J]. Liaoning Agricultural Sciences,1986(3):26-28.

[20] 王雅梅,许彦骁,王亚露,等. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2587-2595.
WANG Y M,XU Y X,WANG Y L,et al. Effects of corn-soybean intercropping with different widths on photosynthetic characteristics and population yield of soybean[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2020, 39(11): 2587-2595.

[21] WEI W W,LIU T T,SHEN L,et al. Effect of maize (*Zeal mays*) and soybean (*Glycine max*) intercropping on yield and root development in Xinjiang,China[J]. Agriculture,2022,12(7):996.

[22] 张忠华,尹士芳,谢宾. 大豆玉米间作对作物生长特性及产量效益的影响[J]. 中国农技推广,2024,40(3):44-47.
ZHANG Z H,YIN S F,XIE B. Effects of soybean and maize intercropping on crop growth characteristics and yield benefit [J]. China Agricultural Technology Extension,2024,40(3):44-47.

[23] 林平,庞成民,海涛,等. 黄淮地区玉米与大豆不同间作模式的产量和效益比较[J]. 河北农业科学,2020,24(4):14-18.
LIN P,PANG C M,HAI T,et al. Comparison of yield and benefit of different intercropping patterns of maize and soybean in Huanghuai region[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2020,24(4):14-18.

[24] 李美霞,陈骋,汪健,等. 不同带状复合种植模式对大豆玉米农艺性状及产量的影响[J/OL]. 甘肃农业大学学报,2024:1-13(2024-05-11). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GSND20240508006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
LI M X,CHEN C,WANG J,et al. Effects of different strip compound planting patterns on agronomic traits and yield of soybean and maize[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University,2024: 1-13(2024-05-11). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GSND20240508006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[25] 刘浩,左青松,刘婧怡,等. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(22):19-23.
LIU H,ZUO Q S,LIU J Y,et al. Effects of saltion content on dry matter accumulation and distribution, agronomic traits and quality of rapeseed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(22):19-23.

[26] 曹曼君. 不同间作比例对玉米大豆光合特性及产量的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
CAO M J. Effects of different intercropping proportions on photosynthetic characteristics and yield of maize and soybean [D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2022.

(责任编辑:屈李纯)

(上接第32页)

[30] 郭连安,胡运高,杨国涛,等. 不同直链淀粉含量水稻籽粒淀粉积累及其相关酶的活性变化研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2014,36(6):942-949.
GUO L A,HU Y G,YANG G T,et al. The research on the accumulation of grain starch and change of related enzymes activity in rice with different amylose contents[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition),2014,36(6):942-949.

[31] YANG J C,ZHANG J H,WANG Z Q,et al. Activities of enzymes involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling[J]. Field Crops Research,2003,81(1):69-81.

[32] 高振楠,郝媛媛,李春寿,等. 水稻调控淀粉合成基因的研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(1):61-74.
GAO Z N,HAO Y Y,LI C S,et al. Study on genes regulating starch synthesis in rice[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(1):61-74.

[33] 张诚信. 灌浆结实期低温弱光复合胁迫对水稻产量和品质的影响[D]. 江苏扬州:扬州大学,2020.
ZHANG C X. Effects of low temperature and weak light combined stress on rice yield and quality during grain filling and filling stage[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2020.

[34] 付江鹏,柳发财,闫宝琴,等. 不同高粱品种适应性综合评价与筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(5):35-46.
FU J P,LIU F C,YAN B Q,et al. Comprehensive evaluation and screening of adaptability of different sorghum varieties [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(5):35-46.

[35] 王英成,芦光新,邓晖,等. 基于主成分分析的青贮玉米品种农艺性状评价及筛选研究[J]. 草地学报,2019,27(6):1725-1732.
WANG Y C,LU G X,DENG H,et al. Evaluation and screening of agricultural characters of silage maize varieties based on principal component analysis[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019,27(6):1725-1732.

(责任编辑:屈李纯)