文章编号:1000-7601(2025)06-0110-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.11

株行距配置对覆膜滴灌复播大豆株型结构、光合特性及产量的影响

孙婷婷,周丽萍,唐江华,卢静静,陈志华,
姜 涛,汉佳乐,徐文修

(新疆农业大学农学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为筛选促进北疆覆膜滴灌复播大豆高产的株行距配置,于 2023—2024 年设置 5 种株行距配置(宽行距+窄行距)×株距处理:(50+15+15+15) cm×8.8 cm(T1)、(50+20+20+20) cm×7.6 cm(T2)、(45+15+15+15) cm×9.3 cm(T3)、(45+20+20+20) cm×8 cm(T4)、(40+25+25) cm×7 cm(T5),研究不同株行距配置对复播大豆株型结构、光合特性、产量及其构成因素的影响。结果表明:一膜三行的 T5 处理两年株高、茎粗、主茎节数、平均茎柄夹角均最大,较其余处理分别增加 0.75%~7.52%、2.37%~10.51%、2.61%~17.13%、4.34%~16.08%;平均叶柄最小,较其余处理降低 1.70%~12.35%,与 T3 处理无显著差异。一膜四行中的 T3 处理两年叶绿素含量和叶面积指数均显著大于其他处理,生育期平均值较 T2 处理分别显著增加 5.21%和 23.02%;T3 处理光合能力最优,与 T2 处理相比,其盛荚期和鼓粒期 P_n、T_r、G_s分别平均显著增加 18.85%、16.25%、28.62%,C_i显著降低 21.85%。T3 处理两年产量均最高,分别为 3 718.90、3 876.71 kg · hm^{-2},较 T5 处理分别增加 7.63%、6.95%,较同年产量最低的 T2 处理分别增加24.39%、28.17%。综上,北疆覆膜滴灌复播大豆适宜的田间株行距配置为宽行行距 45 cm+窄行行距 15 cm+株距9.3 cm。

关键词:复播大豆;株行距配置;株型结构;光合特性;产量

中图分类号:S565.1 **文献标志码**:A

Effects of plant row spacing on plant structure, photosynthetic characteristics, and yield of replanted soybean under film mulching and drip irrigation

SUN Tingting, ZHOU Liping, TANG Jianghua, LU Jingjing,
CHEN Zhihua, JIANG Tao, HAN Jiale, XU Wenxiu

(*College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*)

Abstract: In order to screen out the row spacing configurations that promote the high yield of replanted soybean under drip irrigation in northern Xinjiang, five different plant row spacing configurations were set up from 2023 to 2024. The plant spacing was (50+15+15+15) cm×8.8 cm (T1), (50+20+20+20) cm×7.6 cm (T2), (45+15+15+15) cm×9.3 cm (T3), (45+20+20+20) cm×8 cm (T4), and (40+25+25) cm×7 cm (T5), respectively. The results showed that the plant height, stem diameter, number of main stem nodes, and average stem angle of the T5 treatment with one film and three rows were the largest in two years, and the increase was 0.75%~7.52%, 2.37%~10.51%, 2.61%~17.13% and 4.34%~16.08%, respectively, compared with the other treatments. The average petiole was the smallest, which was 1.70%~12.35% lower than that of the other treatments, and there was no significant difference from the T3 treatment with four rows of one membrane. The chlorophyll content and leaf area index of the T3 treatment with the smallest row spacing and the largest plant spacing in one film were significantly higher than those of other treatments for two years, and the average growth period was

收稿日期:2024-12-08 **修回日期**:2025-02-17

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项计划项目(2022A02008-2);国家自然科学基金项目(32360549)

作者简介:孙婷婷(2000-),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为作物高产栽培理论与技术。E-mail:1322132411@qq.com

通信作者:徐文修(1962-),女,河北蠡县人,教授,主要从事绿洲高效耕作制度与资源高效利用研究。E-mail:xjxwx@sina.com

significantly increased by 5.21% and 23.02% compared with the T2 treatment with the largest row spacing and smallest plant spacing, respectively. T3 treatment had the best photosynthetic capacity, and compared with T2 treatment, P_n, T_r, and G_s increased significantly by 18.85%, 16.25%, and 28.62%, respectively, and C_i decreased by 21.85% at the pod stage and bulge stage, respectively. The yields of T3 treatment were the highest in two years, which were 3 718.90 kg · hm^{-2} and 3 876.71 kg · hm^{-2}, respectively, which were 7.63% and 6.95% higher than those of T5 treatment and 24.39% and 28.17% higher than that of T2 treatment, respectively. In conclusion, the suitable field row spacing of soybean reseeding under mulching drip irrigation in northern Xinjiang was as follows: wide row spacing of 45 cm + narrow row spacing of 15 cm + plant spacing of 9.3 cm.

Keywords: replanted soybeans; plant row spacing configuration; plant structure; photosynthetic characteristics; yield

大豆是重要的粮油作物,在国民生产中占据重要地位。20 世纪 50 年代前我国是世界最大的大豆生产国[1],但近年来国产大豆已无法满足市场需求。近 10 年我国大豆进口量激增,平均每年进口量达 8724 万 t,2020 年突破 1 亿 t,对外依存度达 80%左右[2],严重威胁我国粮食安全。为缓解大豆供需紧张局势,2018 年起我国多次提出扩种大豆油料和振兴大豆产业等相关指示[3]。仅依靠扩大春大豆种植面积提高国产大豆产能几乎难以实现,而麦后复播夏大豆可提高土地利用率,有效缓解粮、棉、油等作物争地矛盾,实现一地双收。在全球气温不断增加背景下,我国气温也呈增加趋势,尤其是新疆北部地区增温更显著[4],为麦后复播大豆的种植提供了机遇[5]。前人研究多集中于春大豆,目前复播大豆仍缺乏适宜的高产栽培技术,导致其单产水平较低,因此研究提高复播大豆产量的栽培技术成为亟待解决的问题,这对于提高我国大豆产能和保障粮食安全意义重大。

生产实践和科学研究表明,株行距配置通过调整田间株距和行距改善作物的植株形态,构建合理的群体冠层结构,从而增加光能利用效率[6],提高群体内个体的生产潜力对作物增产有重要意义[7]。研究表明,合理调整大豆株距,增加了个体在群体内部分布的均匀程度[8],有利于发挥个体生长优势,促进单株荚数和产量增加[9]。周勋波等[10]研究发现,在等行距播种方式下,大豆株高、茎粗和叶面积指数随着行距的缩小和株距的增大呈增加趋势,同时光能利用率提高,产量也显著提升。于晓波等[11]研究表明,株距增大有利于发挥作物个体生产潜力,且宽窄行较等行距处理显著增加了大豆单株粒重和百粒重。彭姜龙等[12]和陈传信等[13]研究发现,在不覆膜种植条件下,宽窄行处理较等行距处理的夏大豆光合特性、单株荚数、粒数、粒重增加显著,宽窄行种植方式是促进夏大豆增产的有效措施。吴树等[14]研究表明,随着行距的扩大,大豆的单株粒数、单株粒重和产量均有所减小。Gulluoglu 等[15]发现,双行的宽窄行配置相较于单行种植方式大豆产量更优,且随着行距的缩小,产量呈显著增加趋势。

前人关于大豆株行距配置的研究多集中于裸地种植和等行距播种,虽然地膜因其具有增温、保墒等作用在生产中被广泛应用[16],宽窄行配置在玉米[17]、小麦[18]、棉花[19]等作物上增产效果显著,但覆膜滴灌条件下复播大豆宽窄行的株行距配置相关研究鲜有报道。因此,本试验在前期宽窄行种植方式[12-13]的研究基础上,增加覆膜滴灌条件的同时细化株行距配置,探究覆膜滴灌条件下不同株行距配置对复播大豆株型结构、光合特性及产量的影响,以筛选出促进北疆复播大豆高产的适宜配置方式,为该地区大豆产业高效发展提供技术参考和理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2023 年 7 月—2024 年 10 月在新疆乌鲁木齐头屯河区新疆农业大学陆港校区进行。试验地属于典型的中温带大陆性气候,年平均气温 7.2℃,无霜期 163 d,年平均降水量 228.8 mm。试验地地势平坦,0~20 cm 土壤耕层有机质含量 29.42 g · kg^{-1}、速效氮84.73 mg · kg^{-1}、速效磷 18.19 mg · kg^{-1}、速效钾95.03 mg · kg^{-1}、pH 为 7.64。

1.2　试验设计

试验采用单因素完全随机区组试验设计,试验因子为株行距配置,设置(宽行距+窄行距)×株距 5 种处理,包括(50+15+15+15) cm×8.8 cm(T1)、(50+20+20+20) cm×7.6 cm(T2)、(45+15+15+15) cm×9.3 cm(T3)、(45+20+20+20) cm×8.0 cm(T4)、(40+25+25) cm×7.0 cm(T5),T1~T4 处理均为一

膜四行,T5 处理为一膜三行(图 1),小区面积 40 m^2(8 m×5 m),3 次重复。

供试大豆品种为'黑河 45 号',种植密度为47.6 万株·hm^{-2},膜宽 90 cm。2023 年 7 月 2 日播种,10 月 5 日收获;2024 年 7 月 12 日播种,10 月 11 日收获。播种前结合整地施入有机肥(含有机质 126.90 g·kg^{-1}、碱解氮 201 mg·kg^{-1}、速效磷 401.7 mg·kg^{-1}、速效钾 2377 mg·kg^{-1}、硝态氮7.56 mg·kg^{-1}、铵态氮 21.46 mg·kg^{-1})30 t·hm^{-2},225 kg·hm^{-2}磷酸二铵(总磷≥46%)、75 kg·hm^{-2}硫酸钾(K_2O≥52%)、75 kg·hm^{-2}尿素(总氮≥46%),于开花期随水滴施尿素 150 kg·hm^{-2},鼓粒期随水滴施硫酸钾 75 kg·hm^{-2},灌溉方式为膜下滴灌,全生育期滴水 6 次,共滴水 2 400 m^3·hm^{-2},其它田间管理措施同大田。

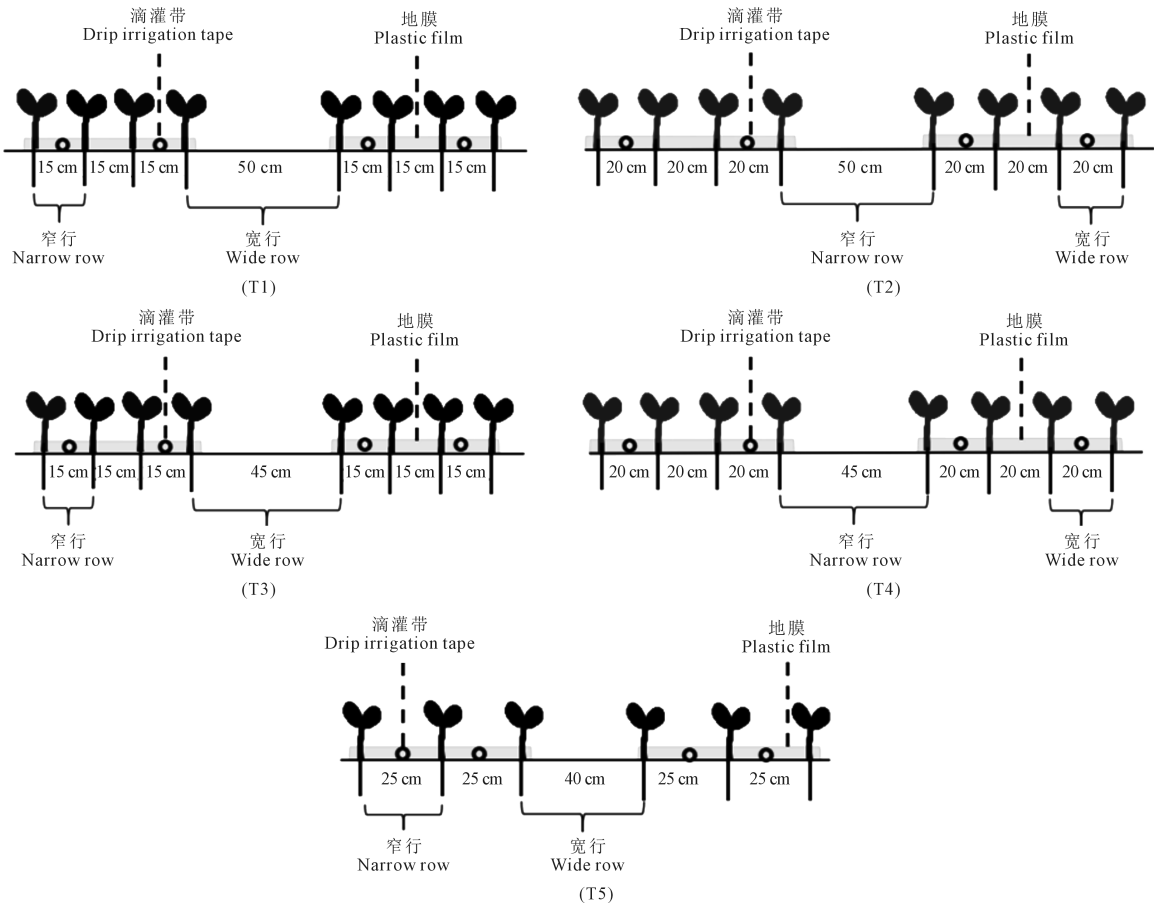

图 1 田间种植示意图

Fig.1 Schematic diagram of field planting

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农艺性状 于大豆成熟期在各小区膜上中间行随机选取长势均匀一致的 10 株大豆,测定株高(从子叶节至植株顶端的高度)、基部茎粗(用游标卡尺测子叶节处直径)、主茎节数和底荚高度。

自出苗 20 d 起至鼓粒期,每隔 10 d 选取各小区膜上中间行长势均匀的连续 10 株,调查其各节叶柄长度和茎柄夹角(用电子量角器测量茎秆和叶柄间夹角)。

1.3.2 光合特性 于盛花期、盛荚期、鼓粒期,在各小区膜上中间行随机选取长势均匀一致的 5 株大豆,使用 Cl-340 Handheld Photosynthesis System(美国)光合测定仪,在天气晴朗的条件下于 11∶00—13∶00 测定倒 3 叶中间叶胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)。

1.3.3 叶绿素含量 自出苗后 20 d 开始至成熟期,每 10 d 测定一次,选择天气无风晴朗的 11∶00—13∶30,用便携手持式 SPAD-502 型(日本)叶绿素仪,在各小区膜上中间行选取长势均匀一致的 3 株,夹取每一株主茎上倒 3 叶中间小叶片测定。测量时避开叶脉,取叶片的底部、中部与顶部记录其平均值。

1.3.4 叶面积指数 自大豆出苗后 20 d 开始至成熟期,每 10 d 于各小区膜上中间行选择具代表性的连续 3 株大豆,通过打孔称重法测定单株叶面积,并计算叶面积指数(*LAI*)。

LAI=单株叶面积×单位土地面积上的大豆的株

数/单位土地面积

1.3.5　产量及产量构成　于成熟期在各小区选取长势均匀的 3 个面积为 0.6 m^2(1.0 m×0.6 m)样方实收计产,实收前在各小区膜上内行和外行分别取样长势均匀一致的大豆连续 10 株进行室内考种,记录其平均值作为各处理的的单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重等指标。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Execl 2010 和 GraphPad Prism 8 软件对试验数据进行处理和图表的制作,使用 SPSS 27 和 DPS 数据处理系统软件进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　株行距配置对复播大豆株型结构的影响

2.1.1　对复播大豆农艺性状的影响　由表 1 可知,2023 年和 2024 年各处理大豆株高、茎粗、主茎节数均有相同规律,一膜三行的 T5 处理均高于一膜四行的其他处理,具体表现为 T5>T3>T4>T1>T2,但 T5 处理与 T3 处理间差异不显著。一膜四行的 4 个处理中,宽行行距较小的 T3、T4 处理两年的平均株高、茎粗、主茎节数较大,较 T1、T2 处理的平均值分别增加 4.44%、5.33%、11.10%。宽行行距一致时,窄行行距较小(15 cm)的 T1、T3 处理较窄行行距较大(20 cm)的 T2、T4 处理两年平均株高、茎粗、主茎节数分别增加 2.16%、2.26%、4.54%。底荚高度则表现为 T3、T4 处理两年平均值较 T1、T2 处理平均减小 7.50%,T1、T3 处理较 T2、T4 处理平均减小 5.31%。综上可知,窄行一定时,缩小宽行行距可促进株高、茎粗和主茎节数的增加;宽行一致时,缩小窄行行距有利于株高、茎粗和主茎节数的增加,但植株底荚高度则基本与之呈相反规律。

2.1.2　对复播大豆茎柄夹角和叶柄长度的影响　大豆的茎柄夹角和叶柄长度决定了叶片的空间分布,共同影响太阳辐射在冠层内的重新分配。由图 2 可知,随着大豆生育进程的推进,两年各处理不同时期的单株平均茎柄夹角逐渐呈不断减小趋势,尤其是 V4 期(四叶期)至 R3 期(初荚期)呈快速减少的趋势,R4 期(盛荚期)至 R5 期(鼓粒期)茎柄夹角逐渐稳定。进一步比较可知,两年各处理的茎柄夹角均表现为 T5>T3>T4>T1>T2,T5、T3 处理之间无显著差异,但基本显著大于 T1、T2 处理,与 T1、T2、T4 各处理生育期茎柄夹角均值相比,T5 处理生育期茎柄夹角均值分别增加 11.78%、16.08%、8.70%,T3 处理生育期均值分别增加 7.13%、11.25%、4.19%,这说明 T5 和 T3 处理能够显著改变大豆叶柄的着生角度和方向,使冠层中叶片空间分布趋于平展以获取更多的光能。

由图 3 可知,随着生育进程的不断推进,两年中各处理不同生育时期的单株平均叶柄长度也不断伸长,整体呈现快增-慢增的趋势,且与平均茎柄夹角表现出相反规律。各处理在 R3 期之前差异不显著,R3~R5 期差异逐渐显现,具体表现为 T2>T1>T4>T3>T5。R5 期 T2 处理的平均叶柄长度最长(18.58 cm)、T1 处理次之、T5 处理最低,T1 和 T2 处理生育期平均叶柄长度较其余处理平均值分别增加9.33%和 12.16%,说明宽行行距为 50 cm 的 T1、T2 处理能较其他处理显著促进叶柄长度增加,宽行行距相同时,窄行行距大(20 cm)的 T2、T4 处理较窄行行距小(15 cm)的 T1、T3 处理叶柄长度也有所增加,但总体差异不显著。

表 1　株行距配置对复播大豆农艺性状的影响

Table 1　Effects of plant row spacing on agronomic traits of replanted soybean

年份 Year	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	主茎节数 Nodes number of main stem	底荚高度/cm Bottom pod height
2023	T1	78.50±0.20c	6.75±0.18c	11.78±0.19c	9.02±0.01b
	T2	76.62±0.46d	6.45±0.03d	11.11±0.19c	9.59±0.29a
	T3	81.84±0.14a	7.31±0.10ab	13.56±0.38ab	8.48±0.11c
	T4	81.01±0.02b	7.19±0.08b	12.78±0.51b	8.89±0.25b
	T5	82.06±0.34a	7.48±0.06a	14.00±0.00a	9.44±0.12a
2024	T1	67.99±0.03c	7.73±0.07c	13.33±0.15c	9.13±0.29b
	T2	66.14±0.08d	7.64±0.19d	12.77±0.32d	9.55±0.16a
	T3	70.51±0.34a	7.90±0.11a	13.70±0.10ab	8.43±0.09c
	T4	68.84±0.23b	7.77±0.10b	13.47±0.12bc	8.89±0.14b
	T5	71.43±0.25a	8.09±0.20a	13.97±0.06a	9.50±0.19a

注:同列不同小写字母表示处理间差异达显著水平(P<0.05),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments (P<0.05), the same below.

2.2 株行距配置对复播大豆叶片叶绿素含量的影响

叶绿素含量(SPAD)是影响作物叶片光合速率重要的内在因素。由图 4 可知,不同处理对大豆 SPAD 值影响显著,随着生育进程的推进,两年中各处理 SPAD 值均呈逐渐增加后快速下降的变化趋势,且均在 R5 期达到峰值。进一步分析可知,R2~R5 期,T2 处理 SPAD 值均最低,T3 处理 SPAD 值升高最显著且始终高于其他处理,表明 T3 处理下的株行距配置能提高大豆各生育时期叶片叶绿素含量,尤其可促进 R3 期后叶片保持较高的叶绿素含量,防止叶片早衰,延长光合作用时间,从而促进其干物质生产和产量提高。

2.3 株行距配置对复播大豆单株叶面积指数的影响

由图 5 可知,两年中各处理大豆的叶面积指数(*LAI*)随生育进程推进整体均呈开口向下的抛物线变化趋势,但同年各处理出现峰值的生育时期略有不同。T3、T5 各处理的生育期平均 *LAI* 在 R4 期达到最大,较生育期平均 *LAI* 最低的 T2 处理分别增加

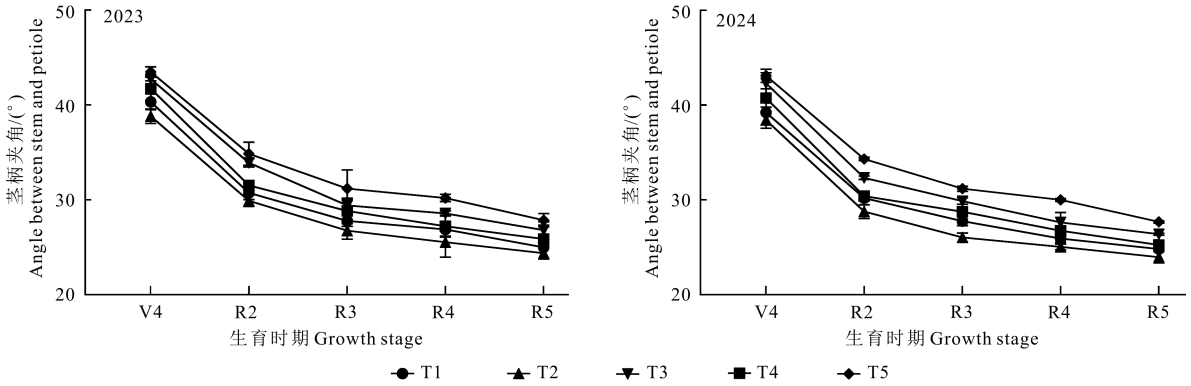

图 2 株行距配置对复播大豆不同生育时期平均茎柄夹角的影响

Fig.2 Effects of plant row spacing on the average stem stalk angle at different growth stages of replanted soybean

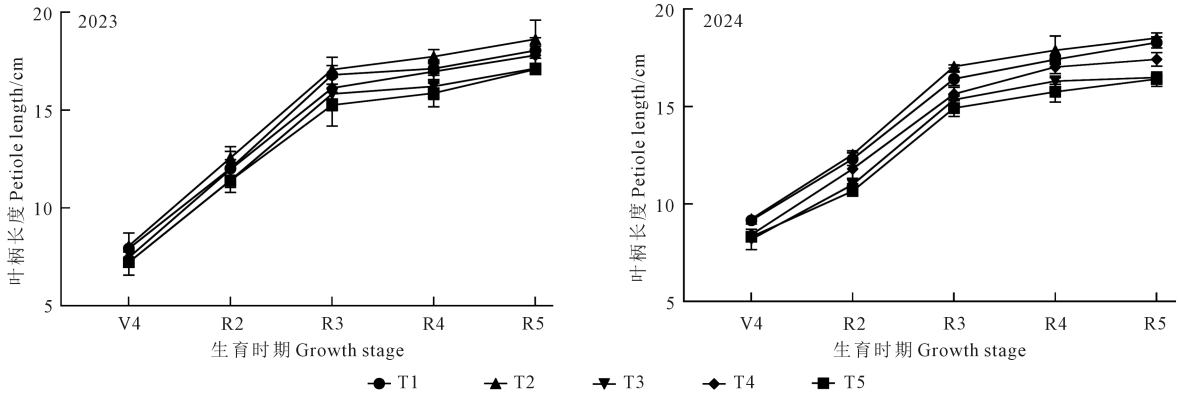

图 3 株行距配置对复播大豆不同生育时期叶柄长度的影响

Fig.3 Effects of plant row spacing on petiole length at different growth stages of replanted soybean

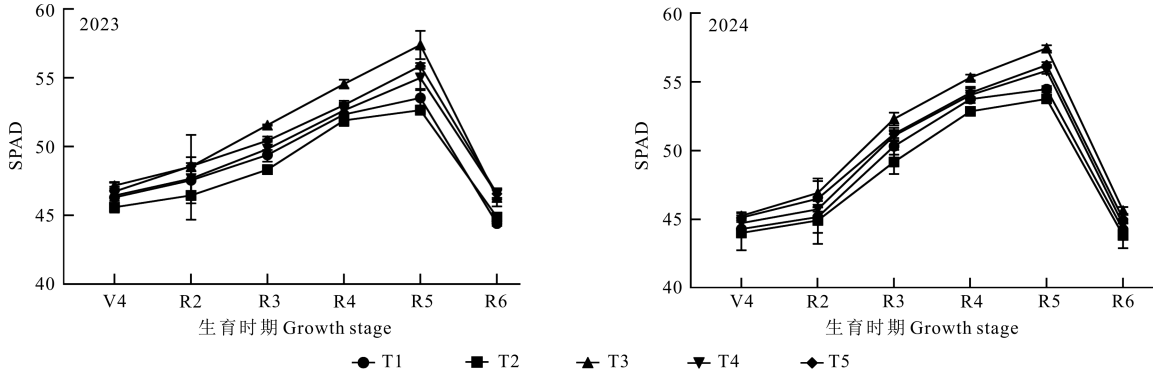

图 4 株行距配置对复播大豆不同生育时期 SPAD 值的影响

Fig.4 Effects of plant row spacing on SPAD value at different growth stages of replanted soybean

34.48%、26.37%,T1、T2、T4 处理的 *LAI* 峰值均出现于 R5 期,三个处理两年平均值分别为 4.07、3.79、4.12。进一步分析可知,R2~R5 期 T3 处理的 *LAI* 始终高于其他处理,且在 R3 和 R4 期与其他处理差异显著。在 R7 期(初熟期),T5 处理 *LAI* 最大、T3 处理次之,但二者之间差异不显著。总体而言,T1、T2 处理的 *LAI* 在生育期内基本保持较低水平,T4 处理基本处于中间水平,尽管在 R5 期 T1、T2、T4 处理的 *LAI* 达到最大值,但未与 T3、T5 处理产生显著差异,且在生育后期 *LAI* 快速降低,说明 T3 和 T5 处理在生育后期也能保持较高的叶面积指数,其对延缓叶片衰老、延长植株光合作用时间和提高大豆产量有积极作用。

2.4　株行距配置对复播大豆光合特性的影响

由图 6~8 可知,两年的大豆光合特性变化规律基本一致,在 R2~R6 期,T1、T2 处理的净光合速率(P_n)变化规律与 T3、T4、T5 处理的 P_n、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)变化规律一致,基本呈先增后降的倒“V”型趋势,均在 R4 期达到最高值、在 R6 期降至最低;而 T1、T2 处理的 T_r、G_s 呈下降趋势,均在 R2 期达到最大值。进一步分析可知,在 R2 期,T1、T2 处理的 P_n、T_r、G_s 均显著高于 T3、T4、T5 处理,且 T3、T4、T5 处理间基本未表现出显著差异;在 R4 和 R6 期,T3 处理的 P_n、T_r 和 G_s 基本较其他处理显著提高,同时 T1、T2 处理的增长幅度开始下降,其中 T2 处理最低,T3 处理生育后期 P_n、T_r 和 G_s 提升明显,说明该处理可能由于株距最大,导致叶片的相互遮蔽面积小,通风透光效果好,净光合速率和蒸腾作用增强,且较其他处理相比有利于叶片气孔的张开,同时促进了气体交换进而增强了光合作用,减缓了叶片光合功能的衰弱。

由图 9 可知,各处理 2023 年和 2024 年的胞间二氧化碳浓度(C_i)规律略有不同。2023 年,T1、T2、T5 处理的 C_i 从 R2 期起随生育进程推进呈持续下降趋势,而 T3、T4 处理 C_i 则呈先增后降趋势,在 R4 期达到最大;各生育时期均为 T1 处理 C_i 最大、T2 处理次之、T3 处理最低,T3 处理生育期平均 C_i 较 T1、T2 处理分别降低 19.05%、21.85%。2024 年,各处理 C_i 从 R2 期起均呈下降趋势,T3 处理始终最小,表明该处理转换 CO_2 的能力较 T1、T2 处理更强。

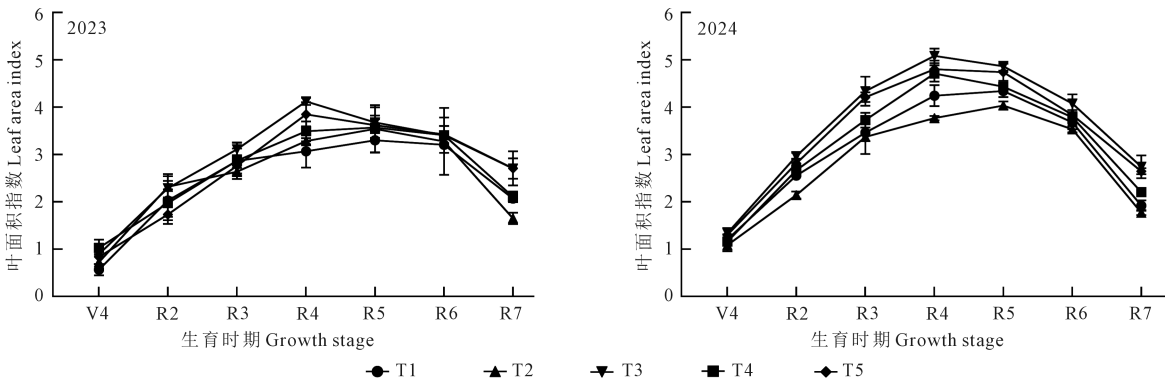

图 5　株行距配置对复播大豆不同生育时期叶面积指数的影响

Fig.5　Effects of plant row spacing on leaf area index at different growth stages of replanted soybean

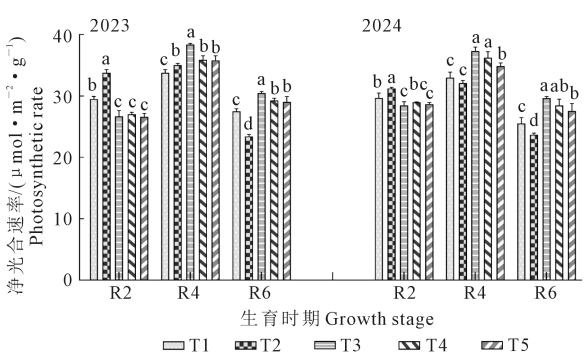

图 6　株行距配置对复播大豆净光合速率的影响

Fig.6　Effects of plant row spacing on net photosynthetic rate of replanted soybean

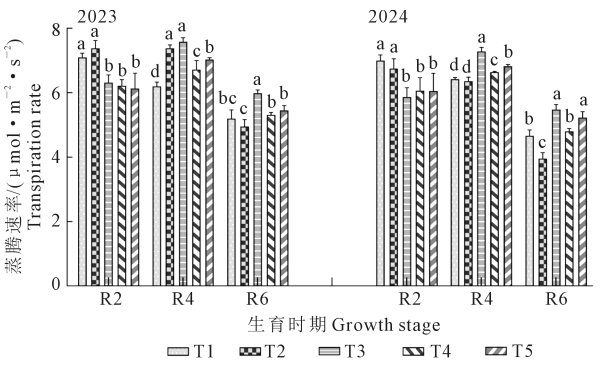

图 7　株行距配置对复播大豆蒸腾速率的影响

Fig.7　Effects of plant row spacing on transpiration rate of replanted soybean

2.5 株行距配置对复播大豆产量及其构成因素的影响

由表 2 可知,株行距配置对复播大豆产量及产量构成因素有显著影响,两年中各处理大豆产量均表现为 T3>T5>T4>T1>T2,T3 处理的平均产量为 3 797.80 kg·hm^{-2},较 T1、T2、T4、T5 处理分别显著提高23.51%、26.28%、13.56%、7.29%。宽行行距 45 cm 的 T3、T4 处理产量优于宽行行距 50 cm 的 T1、T2 处理,产量平均提高 17.42%,且宽行行距同为 45 cm 时,窄行行距小(15 cm)的 T1、T3 处理增产效果优于窄行行距为 20 cm 的 T2、T4 处理,平均增产 7.59%。

进一步分析产量构成因素发现,两年百粒重均表现为 T5>T3>T4>T1>T2,其中 T5 处理百粒重最大,较 T2 处理平均显著增加 8.32%,T1、T2 处理间无显著差异,T3、T4 处理间差异显著。在一膜四行种植方式下,T3 处理的单株粒数、单株粒重、单株荚数均最高且显著高于其他处理,T2 处理均为最低,产量构成因素的规律同产量一致,说明同时缩小宽行和窄行行距有利于增加大豆产量。

2.6 复播大豆产量与光合特性指标之间的相关性分析

由表 3 可知,光合特性各指标系数相关性分析显示,复播大豆产量和净光合速率及气孔导度呈显著正相关关系,与胞间 CO_2 浓度呈极显著负相关关系,相关系数分别为 0.89、0.84 和-0.95,与蒸腾速率呈正相关关系,但相关性未达显著水平,相关系数为 0.62;净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈显著负相关关系,相关系数为-0.92,气孔导度与蒸腾速率呈显著正相关关系,相关系数为 0.93。综上可知,提升净光合速率和气孔导度、降低胞间 CO_2 浓度能够显著促进产量增加。

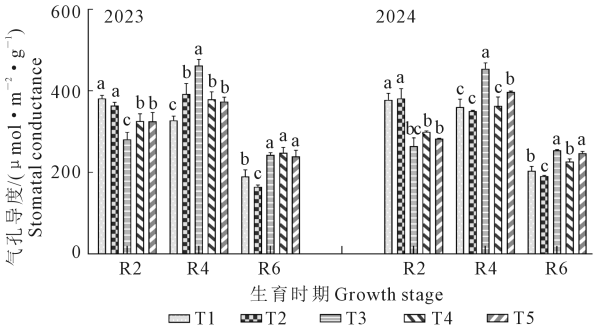

图 8 株行距配置对复播大豆气孔导度的影响

Fig.8 Effects of plant row spacing on stomatal conductance replanted soybean

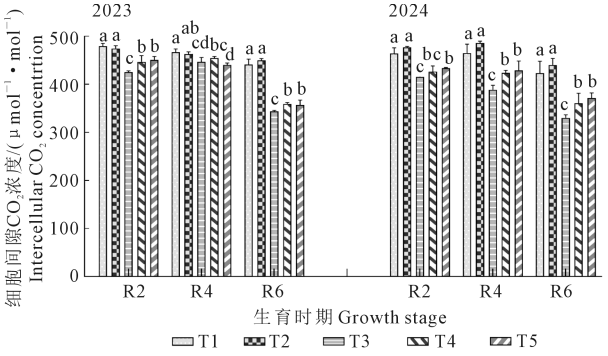

图 9 株行距配置对复播大豆胞间 CO_2 浓度的影响

Fig.9 Effects of plant row spacing on intercellular CO_2 concentration of replanted soybean

表 2 株行距配置对复播大豆产量性状的影响

Table 2 Effects of plant row spacing on yield traits of replanted soybean

年份 Year	处理 Treatment	收获株数/(万株·hm^{-2}) Number of harvested plants/(10^4plant·hm^{-2})	百粒重 100-seed weight/g	单株粒数 Seeds per plant	单株粒重 Grain weight per plant/g	单株荚数 Pods per plant	产量 Yield/(kg·hm^{-2})
2023	T1	37.80±0.30a	18.82±0.19d	80.60±0.23c	15.60±0.18cd	30.55±0.20c	3000.42±13.54d
	T2	37.50±0.30a	18.70±0.11d	78.62±1.54c	15.30±0.44d	29.11±0.43d	2989.76±11.81d
	T3	38.10±0.84a	19.74±0.09b	95.95±1.94a	18.38±0.17a	33.59±0.36a	3718.90±12.82a
	T4	38.10±0.60a	19.32±0.14c	84.45±0.29b	16.21±0.53c	31.26±0.39b	3328.61±18.22c
	T5	37.95±0.79a	20.09±0.19a	86.40±0.25b	16.87±0.24b	31.77±0.26b	3455.12±13.07b
2024	T1	44.91±0.61a	19.69±0.12d	80.77±0.32d	15.53±0.39d	30.53±0.28c	3150.17±3.96d
	T2	44.45±0.20a	19.52±0.27d	78.72±0.71d	15.17±0.11d	29.43±0.06d	3024.65±8.35d
	T3	44.81±0.65a	20.87±0.33b	96.55±0.74a	18.51±0.06a	34.02±0.28a	3876.71±4.47a
	T4	44.76±0.10a	20.39±0.21c	84.25±0.23c	16.08±0.15c	30.95±0.09b	3359.72±5.94c
	T5	44.44±0.10a	21.42±0.16a	86.45±0.18b	16.84±0.25b	31.83±0.13b	3624.62±2.38b

表 3　复播大豆产量与光合特性指标之间的相关性分析

Table 3　Correlation coefficient between yield and photosynthetic characteristics of replanted soybean

指标 Index	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	产量 Yield
净光合速率 P_n	1.00				
蒸腾速率 T_r	0.57	1.00			
气孔导度 G_s	0.83	0.93*	1.00		
胞间 CO_2 浓度 C_i	−0.92*	−0.40	0.71	1.00	
产量 Yield	0.89*	0.62	0.84*	−0.95**	1.00

注:* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$。　Note: * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$.

3　讨　论

3.1　不同株行距配置对复播大豆株型结构的影响

株行距配置显著影响大豆的株型结构,植株形态的改变在群体功能发挥中起着重要的调节作用,其中茎秆特性是判定植株是否健壮的重要指标[20]。调整株行距配置、协调好个体和群体的关系是提高作物产量的有效措施之一。本研究表明,一膜四行种植方式下,行距最小、株距最大的 T3 处理其株高、茎粗、主茎节数、茎柄夹角较行距最大、株距最小的 T2 处理分别显著增加 6.71%、7.95%、14.15%、11.20%,底荚高度和叶柄长度分别显著减小 13.19%、10.51%。这与前人研究结果相一致,即随着种植行距缩小和株距扩大,大豆的株高、茎粗、主茎节数随之增大,叶柄长度和平均茎柄夹角随之减小[21]。可能是因为 T3 处理较其他处理株距大,个体分布最为均匀且合理,促进了植株生长发育,使得叶姿形态更趋于平展[22],且保证了较低的底荚高度,促进主茎节数增多[23],可结荚节数也增加,可结荚垂直空间增大。这说明缩小行距和扩大株距有利于群体内部通风透光,进而促进植株生长发育,为大豆后期生长奠定了良好基础[24]。一膜三行的 T5 处理农艺性状虽也表现良好,但与 T3 处理并无显著差异,但光合特性和最终产量却显著低于 T3 处理,可见判断能否获得高产的标准不能只依据农艺性状,还需综合考察和评定。

3.2　不同株行距配置对复播大豆叶面积指数及光合特性的影响

宽窄行配置能调节作物群体冠层的光分布[25],在等密种植条件下,调整株行距会对大豆的叶面积指数及产量产生显著影响[26]。本研究表明,T3 处理盛荚期的叶面积指数显著大于其他处理,且在生育后期能够保持较高水平,其生育期平均值较 T2 处理显著增加 23.02%。Keerthana 等[27]研究发现,夏大豆行距缩小和株距增大减缓了个体间竞争,叶面积指数显著增大。本研究中,结荚期和鼓粒期 T3 处理的 P_n、T_r、G_s 均值分别较 T2 处理显著增加 18.85%、16.25%、28.62%,C_i 均值显著降低 21.85%,最终产量也最高。这与陈传信等[13]的研究结果一致,即在结荚期和鼓粒期保证较高的光合特性和光能利用率有利于提升大豆产量。一膜三行的 T5 处理叶面积指数和光合特性均显著低于一膜四行的 T3 处理,可能是株距较大时,能缓解冠层内部植株间相互遮光和不透气的不良状况,促进光的合理分布,增加透光率[28],改善了光合生产环境,延缓生育中后期叶片衰老,提高群体光能利用效率,进而达到增产效果[29]。

3.3　不同株行距配置对复播大豆产量及其构成因素的影响

适宜的株行距是作物获得高产的基础,充分发挥个体生产优势,创建优良的群体结构,使环境资源得到充分利用,对提高群体产量有重要作用[30]。本研究中,T3 处理产量最高,较产量最低的 T2 处理增加 26.28%;这与前人研究发现的缩小行距和扩大株距能够提升夏大豆生产力且产量和行距呈负相关关系的观点一致。这可能是由于缩小行距和增加株距使植株形成了趋于均匀分布的群体结构,光能和土地的使用效率大幅提高,促进了产量的增加[31]。本研究中,T3 处理的单株荚数、粒数、粒重均最大,分别较 T2 处理显著增加 15.49%、22.35%、21.07%,这与前人研究结果也相符[32],即大豆产量与单株荚数呈显著正相关关系。本研究还发现,株距最小的 T5 处理其单株荚数、单株粒数和单株粒重显著低于 T3 处理,可能是在种植密度相同的条件下,行距越大和株距越小使植株个体的生长空间被压缩,不利于单株发育和产量的形成[33]。因此需

要适当缩小行距、扩大株距才能促进单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重和产量增加。

本试验对覆膜滴灌条件下复播大豆的株型结构和光合特性及产量进行了研究分析,但未对大豆根系结构及生理生化特性等进行更深层次的探索,未来还可从株行距配置与密度或滴灌互作的角度进行深入的系统性分析,为复播大豆的种植提供更多的技术参考和选择。

4 结 论

在本试验5个不同株行距设置中,一膜四行的T3处理((45+15+15+15) cm×9.3 cm)较其他处理更有利于构建适宜的株型结构,提高光合物质生产水平,最终获得较高产量,较产量最低的T2处理((50+20+20+20) cm×7.6 cm)增加26.28%。一膜三行的T5处理((40+25+25) cm×7.0 cm)虽株高、茎粗、平均茎柄夹角和平均叶柄表现最优,整体株型最为健壮,且呈现松散型的结构,但与一膜四行的T3处理差异不显著;而T5处理的叶绿素含量、叶面积指数和光合特性表现均不及T3处理,最终产量较T3处理降低7.29%。综上,北疆地区覆膜滴灌条件下复播大豆适宜的田间株行距配置为:宽、窄行行距分别是45 cm+15 cm+15 cm+15 cm,株距为9.3 cm。

参 考 文 献:

[1] 张慧, 怀燕, 周伟军, 等. 浙江省大豆油料产业现状及未来展望[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(4): 454-462.
ZHANG H, HUAI Y, ZHOU W J, et al. Current status and future prospects of soybean and oil crop production in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2023, 49(4): 454-462.

[2] 孙玉栋, 丛树峰. "双循环"背景下我国粮食贸易可持续发展的问题与对策[J]. 农业经济, 2024, (11): 121-123.
SUN Y D, CONG S F. The problems and countermeasures of sustainable development of grain trade in China under the background of "dual circulation"[J]. Agricultural Economy, 2024, (11): 121-123.

[3] 苗红萍, 田聪华, 王仙. 新疆大豆生产与布局历史演变分析[J]. 大豆科技, 2024, (5): 36-43, 47.
MIAO H P, TIAN C H, WANG X. Analysis of historical evolution of soybean production and distribution in Xinjiang[J]. Soybean Science & Technology, 2024, (5): 36-43, 47.

[4] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57-72.
YAO J Q, MAO W Y, CHEN J. Exploration into the signals and effects of the 'wet dry transition' in Xinjiang climate[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57-72.

[5] 徐娇媚, 徐文修, 李大平. 近51a伊犁河谷热量资源时空变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 472-480.
XU J M, XU W X, LI D P. Spatiotemporal variation of heat resources in the Yili river basin in recent 51 years[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 472-480.

[6] 白晶, 张春雨, 丁相鹏, 等. 行距配置和覆反光膜对夏玉米产量及光能利用的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3942-3953.
BAI J, ZHANG C Y, DING X P, et al. Effects of row spacing and mulching reflective film on the yield and light utilization of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 3942-3953.

[7] BERGER DOYLE J, SMITH S F, ZHANG B, et al. Planting date, irrigation, and row spacing effects on agronomic traits of food-grade soybean[J]. Advances in Crop Science and Technology, 2014, 2(4): 1000149.

[8] MOURTZINIS S, ROTH A, JOHN G, et al. Planting method and seeding rate effect on whole and partitioned soybean yield[J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2021, 4(3): e20208.

[9] JOKO T, CHANIFAH C, ARIF S, et al. Plant performance and added value of soybean farming by tillage and plant spacing[J]. E3S Web of Conferences, 2022, 361: 04006.

[10] 周勋波, 孙淑娟, 陈雨海, 等. 株行距配置对夏大豆光利用特性、干物质积累和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30(3): 322-326.
ZHOU X B, SUN S J, CHEN Y H, et al. Effect of plant-row spacings on solar utilization, dry matter weight and yield in summer soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2008, 30(3): 322-326.

[11] 于晓波, 梁建秋, 何泽民, 等. 株行距配置对大豆农艺性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(4): 482-489.
YU X B, LIANG J Q, HE Z M, et al. Effects of different spacing configurations on soybean agronomic traits and yield[J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 482-489.

[12] 彭姜龙, 张永强, 唐江华, 等. 株行距配置对夏大豆光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(5): 794-800, 807.
PENG J L, ZHANG Y Q, TANG J H, et al. Effect of plant-row spacing on photosynthetic characteristics and yield of summer soybean[J]. Soybean Science, 2015, 34(5): 794-800, 807.

[13] 陈传信, 唐江华, 陈佳君, 等. 种植方式对夏大豆鼓粒期叶片光合能力及籽粒灌浆特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 101-105.
CHEN C X, TANG J H, CHEN J J, et al. Effect of planting patterns on photosynthetic capacity and grain filling characteristics of summer soybean at seed-filling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 101-105.

[14] 吴树, 冉新月, 黄兴军, 等. 株行配置对南疆复播大豆生长和产量的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(2): 194-203.
WU S, RAN X Y, HUANG X J, et al. Effects of plant and row configuration on growing and yield of multiple planting soybean in southern Xinjiang[J]. Soybean Science, 2023, 42(2): 194-203.

[15] GULLUOGLU L, BAKAL H, ARIOGLU H. The effects of twin-row planting pattern and plant population on seed yield and yield compo-

nents of soybean at late double-cropped planting in Cukurova region [J]. Turkish Journal of Field Crops, 2016, 21(1): 59-59.

[16] 刘承岳, 杨广, 郭明华, 等. 灌水梯度及覆膜组合模式对滴灌棉田蒸散规律的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(6): 172-180, 215.
LIU C Y, YANG G, GUO M H, et al. Effects of irrigation gradients and film mulching combinations on evapotranspiration in drip-irrigated cotton field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(6): 172-180, 215.

[17] ZHENG H Y, WANG J Y, CUI Y, et al. Effects of row spacing and planting pattern on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and related enzyme activities of maize ear leaf in maize-soybean intercropping[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2503-2503.

[18] 王晨, 唐江华, 徐文修, 等. 宽窄行播种对滴灌冬小麦干物质积累及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(10): 1287-1293.
WANG C, TANG J H, XU W X, et al. Effect of row width on dry matter accumulation and yield of winter wheat under drip irrigation [J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(10): 1287-1293.

[19] 辛明华, 秘雅迪, 王国平, 等. 行距配置和种植密度对棉花干物质生产及产量的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(1): 221-232.
XIN M H, MI Y D, WANG G P, et al. Effect of row spacing configuration and density regulation on dry matter production and yield in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(1): 221-232.

[20] 于晓波, 梁建秋, 何泽民, 等. 撒播量对大豆茎秆特性和产量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 117-124.
YU X B, LIANG J Q, HE Z M, et al. Response of stem characteristics and yield to sowing rate in soybean[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 117-124.

[21] 李劲松, 章建新, 张佩玲, 等. 窄行密植对高产春大豆株型及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(2): 21-25.
LI J S, ZHANG J X, ZHANG P L, et al. Effect of narrow close planting on canopy and yield of high-yield spring soybean[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30(2): 21-25.

[22] 黄兴军. 播期和种植密度对南疆春大豆生长发育的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
HUANG X J. The effects of sowing time and planting density on the growth and development of spring soybeans in southern Xinjiang[D]. Ala'er: Tarim University, 2023.

[23] 杨梦平, 潘丽丽, 张勇, 等. 株距对不同株型大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 377-384.
YANG M P, PAN L L, ZHANG Y, et al. Effect of plant spacing on agronomic trait and yield of different plant type soybean[J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 377-384.

[24] OTTO D, MUNZ S, MALIK W A, et al. Effect of row distance on plant architecture, weed suppression and yield of silage maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in a pesticide-free cultivation system in Southern Germany[J]. Crop Protection, 2024, 185: 106866.

[25] 崔晓朋, 郭家选, 刘秀位, 等. 不同种植模式对夏玉米光能利用率和产量的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 231-238.
CUI X P, GUO J X, LIU X W, et al. Effect of different planting patterns on radiation use efficiency and yield of summer maize[J]. Acta-Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(5): 231-238.

[26] SALEHIAN H, NAJAFIAN M. Study of relationship between soybean (*Glycine max* (L.) *Merr.*) planting spatial arrangements and velvetleaf (*Abutilon theophrasti* L.) population dynamic[J]. Acta Agriculturae Slovenica, 2015, 105(2): 293-302.

[27] KEERTHANA S M, RAMAKRISHNAN R S, PATHAK N, et al. Soybean physiology and yield response to seed rate and sowing method [J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2021, 33(15): 18-27.

[28] AN M J, WANG H J, FAN H, et al. Effects of modifiers on the growth, photosynthesis, and antioxidant enzymes of cotton under cadmium toxicity[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(4): 1196-1205.

[29] 李瑞东, 尹阳阳, 宋雯雯, 等. 增密对不同分枝类型大豆品种同化物积累和产量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 942-951.
LI R D, YIN Y Y, SONG W W, et al. Effects of close planting densities on assimilate accumulation and yield of soybean with different plant branching types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(4): 942-951.

[30] 杨建新. 不同密度下大豆物质分配、养分转运与产量形成的关系[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
YANG J X. The relationship between soybean material allocation, nutrient transport, and yield formation under different densities[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[31] ZHOU X B, YANG G M, SUN S J, et al. Plant and row spacing effects on soil water and yield of rainfed summer soybean in the northern China[J]. Plant Soil and Environment, 2010, 56(1): 1-7.

[32] FLAJŠMAN M, ŠANTAVEC I, KOLMANIC A, et al. Bacterial seed inoculation and row spacing affect the nutritional composition and agronomic performance of soybean[J]. International Journal of Plant Production, 2019, 13(3): 183-192.

[33] KOLARIC L J, ŽIVANOVIC L J, POPOVIC V, et al. Influence of interrow spacing and cultivar on the productivity of soybean[J]. Biotechnology in Animal Husbandry, 2014, 30(3): 517-528.