

高悦,赵德,梁军,等.株行距配置对高粱杂交种吉杂 159 冠层结构和产量的影响[J].江苏农业科学,2025,53(8):64-74.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.009

株行距配置对高粱杂交种吉杂 159 冠层结构和产量的影响

高悦¹,赵德¹,梁军¹,侯佳明¹,杨微¹,丁博¹,赵国强²,胡博²,朱末³,李继洪¹,曲祥春¹
(1. 吉林省农业科学院,吉林长春 136100; 2. 内蒙古蒙龙种业科技有限公司,内蒙古赤峰 024005; 3. 吉林省农业技术推广站,吉林长春 130062)

摘要:为探究不同种植密度下株行距配置方式对春播早熟区高粱群体结构及产量的影响,明确春播早熟区高粱适宜的株行距配置方式,2018—2019 年在吉林省农业科学院公主岭试验点设置大田试验,以高粱杂交种吉杂 159(株高 131 cm,播期 120 d)为试验材料,设置 3 个种植密度(105 000、135 000、165 000 株/hm²)和 6 种等行距方式(50、55、60、65、70、75 cm),研究不同株行距配置方式对高粱产量和群体冠层特性的影响。结果表明,不同种植密度下,不同株行距对高粱群体结构的影响存在差异,在 105 000 株/hm² 密度下,不同行距处理下高粱产量、千粒重和穗粒数差异不显著;在 135 000 株/hm² 密度下,株行距在 50~65 cm 之间产量、千粒重和穗粒数无显著差异,但均显著高于 70~75 cm 行距配置;在 165 000 株/hm² 密度下,株行距在 50~55 cm 之间产量、千粒重和穗粒数无显著差异,但均显著高于其他行距处理。在 135 000 株/hm² 和 165 000 株/hm² 密度下,B1、B2 行距处理与其他行距处理相比,花后群体叶面积指数显著提高,中下部叶片推迟衰老,茎叶夹角变大,叶向值变小,同时增加冠层的中上部透光率,增加花后干物质积累量,花后干物质转移率降低。试验表明,高密度下,适当地采用缩行增株的等行距种植方式有利于形成高效的光合群体结构,延缓群体中下部叶片衰老,提高群体干物质积累,提高产量。由此可知,春播早熟区高粱通过增加密度并适当的缩行扩株(缩小行距,扩大株距),可以使高粱植株个体分布更均匀,起到光能资源高效利用和产量提升的协同作用;为获得高产,吉杂 159 推荐 165 000 株/hm² 种植密度搭配 50~55 cm 的等行距种植方式。

关键词:春播早熟区;高粱;行距配置;种植密度;产量;冠层结构

中图分类号:S514.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0064-11

高粱在中国被认为是最早开始栽培的禾谷类作物之一,历史悠久。推广杂交高粱曾在过去一定程度上解决了我国缺少口粮的问题^[1]。目前,我国高粱主要分布在四大产区,其中春播早熟区包括黑龙江、吉林、内蒙古等省、区,河北承德、张家口坝下,山西省和陕西省北部,宁夏干旱地区,甘肃省中部与河西,新疆北部等,是当地主要经济作物。随着调整种植结构的步伐加快,种植面积年年扩增,

特别是近几年随着国家供给侧结构改革不断深入,高粱等杂粮作物已成为一种优势作物。如何提高高粱产量,是人们一直关注的问题。增加种植密度是提高高粱产量的可行手段之一,不仅能够实现高粱大面积增产,提高高粱生产效益,还能增强高粱的抗倒伏能力,利于高粱的机械化生产,但当种植密度过高时会影响群体的透光性,不利于植株对光能的吸收利用^[2-4],个体间竞争加剧,茎秆强度下降,产量降低^[5]。合理的株行距配置方式在密植条件下协调水、光、温度等资源分布,能够优化群体结构,削弱个体间不利竞争,进而提高产量。

在当前的作物生产条件下,以优质的品种为主,搭配合理栽培模式,实现良种良法配套以促进增质、增产、增收的做法已有研究^[6]。前人认为,黄淮海地区玉米高密宽窄行种植方式下,群体的光合面积扩大,冠层结构发生改变,进而增加产量^[7]。有研究表明,甜高粱单株生产力随着播种行距增大表现出先增后减的趋势,过小或过大的种植行距都

收稿日期:2024-03-26

基金项目:吉林省产业技术与开发项目(编号 2023C035-6);吉林省重点研发计划(编号:20240303008NC);国家现代农业产业技术体系项目(编号:CARS-06-14.5-A12)。

作者简介:高悦(1990—),男,辽宁沈阳人,硕士,助理研究员,主要从事高粱栽培研究工作,E-mail:gylina9003@163.com;共同第一作者:赵德(1979—),男,吉林公主岭人,助理研究员,主要从事高粱育种工作,E-mail:496354806@qq.com。

通信作者:李继洪,研究员,主要从事高粱遗传育种工作。E-mail:nky106@163.com。

不适宜作物生长^[8];王劲松等对粒用高粱的行距研究表明,行距与密度交互作用显著影响高粱的株高、生物量、养分积累量、产量及品质等,适宜的密度搭配适宜的行距种植在改善群体透光性、增加群体叶面积指数等方面优势显著^[9]。因此,可以看出,在高密度下采用适宜的株行距配置来调控群体冠层结构,更有利于群体充分利用光能进而提高产量。

前人对宽窄行和等行距种植模式与密度互作对高粱群体光分布、冠层结构和产量方面的研究很多^[10-13],但对结合区域内温、光特点,在高密度下,采用不同等行距种植方式调控春播早熟区高粱冠层光分布、光能利用效率和干物质积累与分布等来实现光能利用和产量协同的研究鲜见报道。

吉杂 159 是吉林省农业科学院作物资源研究所选育出的高粱杂交种,在我国高粱北方早熟区有广泛的推广面积。本试验旨在通过研究不同种植密度和行距种植模式下吉杂 159 的群体冠层结构差异、冠层光分布及利用情况,进而阐明高粱产量与春播早熟区光能资源的互作关系,明确等行距和密度对春播早熟区高粱群体冠层结构和产量形成的调控机制,为实现春播早熟区高粱的高产稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年和 2019 年在吉林省农业科学院试验基地(43°30'N,124°48'E)进行,试验地为黑钙土,土壤肥沃,酸碱度适宜,前茬种植大豆。

1.2 试验材料与处理

以高粱杂交种吉杂 159(生育期 120 d,中早熟杂交种)为试验材料。

试验采用裂区设计,密度为主区,行距为副区。6 个不同株行距处理:50 cm(B1)、55 cm(B2)、60 cm(B3)、65 cm(B4)、70 cm(B5)和 75 cm(B6);3 个种植密度:低密度 105 000 株/hm²(D1)、中密度 135 000 株/hm²(D2)、高密度 165 000 株/hm²(D3)。小区行长 6 m,每小区 8 行,3 次重复,共 54 区。春播时期为 5 月 6 日,播种深度为 2.5 ~ 3.0 cm,种肥为磷酸二铵或复合肥 300 kg/hm²。播后注意保墒、保出苗;拔节初期,追施尿素 225 ~ 300 kg/hm²,蜡熟期及时收获,及时进行田间管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状测定

在灌浆期,每小区选取有代表性的 5 株高粱植株,用直尺测定高粱的株高;用游标卡尺测定茎粗,在第 3、4 节间用游标卡尺测量茎的最大直径(A)和最小直径(a),茎秆面积(cm²) = $\frac{A(\text{mm})}{2} \times \frac{a(\text{mm})}{2} \times \frac{\pi}{2}$, π 为圆周率。收获时取 10 株整齐一致、差异小、具有代表性的植株,晒干脱粒后测定穗粒数和千粒重。

1.3.2 光照度测定 在灌浆期,使用光照计(型号为 Li-250),对各处理冠层垂直部位的光量子密度进行测定,分别为冠层上部(上数第 2 张叶)、冠层中部(上数第 5 张叶)和冠层下部(上数第 8 张叶),并计算群体透光率。

1.3.3 叶向值的测定 在高粱成熟期选取生长一致、无叶病、无损伤的植株,选择上数第 2 张叶测定,每处理选 5 株,重复 3 次,叶向值(LOV) = $\sum_{i=1}^n \theta(L_f/L)/n$ 。式中, θ 为叶倾角, L_f 为叶基部到叶片最高处的长度, L 为叶片长度, n 为叶片数,取平均值,茎叶夹角测定方式与叶向值相同。

1.3.4 高粱叶面积指数测定 分别在苗期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期,各小区内随机选取具有代表性的植株 20 株标记,标记后进行测定。叶面积 = 长 × 宽 × 系数(系数根据叶展开度计算,完全展开为 0.75,未完全展开为 0.5)。计算各冠层不同部位叶面积指数,冠层上部:上数第 2 张叶及以上叶片;冠层中部:上数第 3 ~ 5 张叶;冠层下部:上数第 6 张叶及以下叶片。

1.3.5 植株干物质积累量 开花期和成熟期取样,每处理取样 5 株,分茎、叶、鞘、穗 4 个部分,分别于 105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒重,并计算开花后干物质积累量和开花后生物量对籽粒贡献率。花后干物质积累量 = 成熟期地上部干物质积累量 - 开花期地上部干物质积累量;干物质转移量 = 开花期地上部干物质积累量 - 成熟期地上部营养器官干物质积累量;干物质转移对籽粒贡献率 = (干物质转移量/籽粒干重) × 100%。

1.3.6 高粱产量和穗部性状测定 在成熟期收获、测产,风干后进行考种,测定单穗粒数、千粒重等,籽粒产量按籽粒含水量 14% 折算。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 软件进行数据的整理和作图,利用 SPSS 2010 软件进行方差分析和显著性检验(LSP 法, $\alpha = 0.05$),采用三因素试验统计分析。

2 结果与分析

2.1 生育期内气象特征比较

降水量和日均温在不同年际间存在较大差距(图1),2018年表现出降水量较少的特点,2018年在全生育期内累计降水量分别为267.08、268.40 mm,而2019年分别为445.77、451.60 mm,

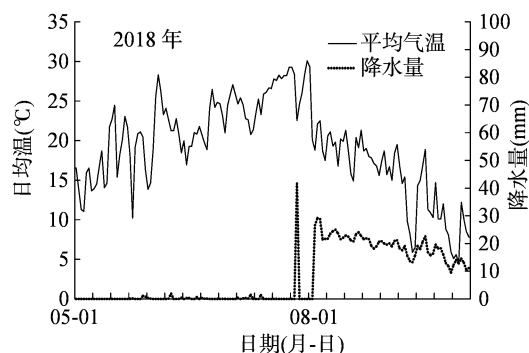


图1 2018年和2019年气候条件对比

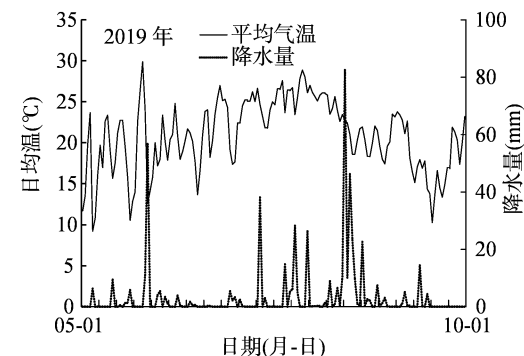
2.2 不同行距配置对高粱产量及其构成因素的影响

由表1可知,年份、密度、行距及年份、密度和行距的交互作用对穗长、千粒重、穗粒数及高粱产量有明显影响,D3较D1和D2密度种植2年产量相比,分别提高了13.8%、5.5%(2018年)和14.2%、2.6%(2019年);在D1密度下,各行距未达到显著差异水平;在D2密度下,B1、B2、B3、B4产量差异不显著,但均显著高于B5和B6处理;在D3密度下,B1、B2产量显著高于其他处理,且其他处理随着行距的增大产量呈现下降的趋势;千粒重和行粒数也呈现相同的变化趋势。由此可知,在低密度(D1)下,行距配置不能进一步优化高粱群体结构,产量变化不明显;在中密度(D2)下,过大的行距配置可能使株距变小,群体内竞争加大,影响产量;在高密度(D3)下,采用缩行扩株的行株距配置方式会优化群体结构,使个体竞争更合理,产量提高。另外,调整行株距增加产量是因为穗粒数和千粒重改变所致,充分说明合理的行株距配置种植方式会通过提高产量构成因素来实现高粱产量的提高。

2.3 密度和行距配置对高粱形态特征的影响

茎叶夹角和叶向值直接影响作物受光状态,是重要的光合作用参数,也是构建高粱高产群体的关键因素。如表2所示,密度和株行距配置对高粱形态特征有显著影响,特别是茎叶夹角、茎秆横截面积和叶向值。2年数据表明,株高随着密度的增大

日照时数平均值分别为1637.01、1662.20 h,2018年属于少雨年份,而2019年雨量正常,降雨主要集中在5月末、7月、8月,日照时数平均值分别为1507.45、1558.60 h,和2018年相比有所减少。不同年份内2个品种在不同生育期平均气温分别为22.34、22.30℃和22.06、22.00℃,有效积温 and 平均气温变化趋势相同。



呈现逐渐增长的趋势,即 $D1 < D2 < D3$,而茎粗变化趋势相反,茎秆横截面积随着密度的增加而呈现减少的趋势,进一步说明高密度群体抗倒伏能力差;而茎叶夹角随着密度的增大而减少,叶向值变化趋势与之相反,表明高粱群体具有一定的调节能力,在高密度时能够通过改变株型,使其变得紧凑上冲,在一定程度上改善个体受光限制。

D1种植密度下,各行距处理株高、茎粗、茎叶夹角和叶向值未达到显著水平,2018年B1、B2、B3处理茎秆横截面积显著高于B4、B5、B6处理,2019年B1、B2、B3、B4处理茎秆横截面积显著高于B5、B6处理;在D2、D3密度下,随着行距的增大,茎叶夹角呈现逐渐降低的变化趋势,叶向值变化趋势相反,茎秆横截面积呈现逐渐减少的趋势。由此可以看出,适宜的缩行扩株能够增加植株的横截面积,从而提高高粱的抗倒伏性,还能够使高粱群体植株叶片伸展更合理,有利于群体受光。

2.4 不同叶层叶面积指数比较

年份、密度和行距配置对不同时期的高粱群体不同冠层叶片分布排列影响显著,由2年数据可知,叶面积指数(LAI)随种植密度的增加呈现单峰曲线变化,各处理均在开花期达到峰值,随后呈现下降趋势(图2)。不同处理各叶层叶面积指数均为下层>中层>上层。在开花期,密度处理D2、D3各叶层LAI值显著大于D1密度处理;灌浆期,密度处理D2、D3上、中、下叶层LAI值显著大于D1密度。从

表 1 不同行距配置下高粱产量及其构成因素

年份	密度	行距 (cm)	穗长 (cm)	千粒重 (g)	穗粒数 (粒/穗)	经济产量 (kg/hm ²)
2018	D1	B1	30.1a	29.4a	2 640.8a	7 716.4h
		B2	29.9a	29.3a	2 679.0a	7 699.9h
		B3	30.0a	29.4a	2 652.7a	7 720.3h
		B4	29.8a	29.5a	2 660.4a	7 771.4h
		B5	29.7a	29.3a	2 635.2a	7 758.4h
		B6	29.8a	29.6a	2 666.7a	7 725.0h
	D2	B1	29.5a	29.3a	2 678.9a	8 472.6d
		B2	29.3a	29.2a	2 630.2a	8 418.7d
		B3	28.9a	29.1a	2 687.7a	8 456.3d
		B4	28.8a	28.8a	2 624.1a	8 384.8d
		B5	28.7ab	27.9b	2 340.3c	8 231.9f
		B6	27.1b	27.8b	2 205.1d	8 108.0g
	D3	B1	29.3a	28.2b	2 590.5a	9 267.2a
		B2	29.2a	28.1b	2 618.7a	9 172.6a
		B3	28.4b	26.8c	2 478.9b	8 746.1b
		B4	28.5b	26.9c	2 408.0b	8 539.9c
		B5	27.2c	26.4c	2 248.3d	8 284.5f
		B6	27.4c	26.3c	2 297.4d	8 114.5g
2019	D1	B1	30.0a	29.1a	2 615.5a	7 415.4j
		B2	29.8a	28.7a	2 611.2a	7 462.6j
		B3	29.7a	28.9a	2 613.6a	7 487.2j
		B4	29.6a	29.2a	2 635.8a	7 446.8j
		B5	29.4a	28.8a	2 674.4a	7 454.8j
		B6	29.2a	29.2a	2 628.5a	7 392.7j
	D2	B1	29.8a	28.5b	2 689.8a	8 370.7e
		B2	29.4a	28.3b	2 632.6a	8 388.7e
		B3	29.2a	28.3b	2 643.6a	8 327.1e
		B4	28.8b	28.2b	2 679.9a	8 394.7e
		B5	27.2c	27.1c	2 432.6b	8 149.2g
		B6	27.3c	27.2c	2 434.7b	8 100.3g
	D3	B1	28.4b	27.7bc	2 498.5b	8 941.5b
		B2	28.3b	27.5c	2 468.6b	8 817.1b
		B3	27.2c	26.7d	2 371.0c	8 549.6c
		B4	26.1d	26.5d	2 206.2d	8 395.2e
		B5	25.4e	25.1e	2 196.9e	8 139.6g
		B6	24.7f	24.8e	2 049.2f	8 172.5g
变异来源		年份	*	*	ns	**
		密度	**	*	**	**
		行距	*	**	**	**
		年份×密度	*	**	**	*
		年份×行距	**	**	**	**
		密度×行距	**	**	**	**
		年份×密度×行距	ns	**	**	**

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。ns、* 和 ** 分别表示影响不显著及在 0.05 和 0.01 水平上影响显著。下表同。

表 2 不同行距配置下高粱形态特征比较

年份	密度	行距 (cm)	株高 (cm)	茎粗 (mm)	茎秆横截面积 (cm ²)	茎叶夹角 (°)	叶向值 (LOV)
2018	D1	B1	130.80d	24.70a	4.12a	25.81a	32.49g
		B2	131.30d	24.80a	4.10a	25.45a	32.18g
		B3	131.40d	24.90a	4.11a	25.48a	32.54g
		B4	131.80d	25.10a	4.04b	25.28a	32.40g
		B5	131.50d	25.20a	3.96c	25.22a	32.58g
		B6	131.90d	24.90a	4.07b	25.19ab	32.14g
	D2	B1	132.40c	24.30a	3.97c	24.12b	35.73d
		B2	133.30b	24.50a	3.83d	24.01b	35.99d
		B3	132.80c	23.70b	3.83d	24.31b	35.88d
		B4	132.40c	23.50b	3.81d	24.84ab	36.81c
		B5	132.10c	22.30c	3.67e	23.54c	37.280b
		B6	132.60c	22.10c	3.57e	23.31c	38.730a
	D3	B1	133.50b	22.17c	3.25h	22.50d	37.80ab
		B2	133.70b	22.05c	3.18h	22.40d	37.90ab
		B3	133.10b	22.10c	3.19h	22.10d	37.40b
		B4	133.60b	22.77c	3.15h	22.20d	37.50b
		B5	134.50a	20.30e	2.91i	21.80e	38.10ab
		B6	135.10a	20.20e	2.90i	20.90f	38.30ab
2019	D1	B1	128.00e	24.50a	4.10a	24.98a	34.36e
		B2	128.20e	24.60a	4.06a	24.96a	34.12e
		B3	128.40e	24.50a	4.05a	25.10a	34.26e
		B4	128.60e	24.40a	4.07a	24.85a	34.57e
		B5	128.80e	23.60a	4.03b	24.79a	34.16e
		B6	128.90e	24.50a	4.02b	24.96a	34.11e
	D2	B1	131.30d	23.40b	3.98c	22.21d	35.15d
		B2	131.10d	23.80b	3.97c	22.52d	35.76d
		B3	131.20d	23.70b	3.99c	22.41d	35.21d
		B4	131.50d	23.30b	3.87d	23.02c	35.46d
		B5	132.30c	22.30c	3.53f	21.98e	37.61b
		B6	132.40c	21.30d	3.52f	21.85e	37.81b
	D3	B1	132.50c	22.61c	3.62e	21.05f	37.50b
		B2	132.20c	22.43c	3.52f	20.94f	37.60b
		B3	133.10b	22.60c	3.49g	20.71fg	37.40b
		B4	133.70b	22.63c	2.97i	20.13f	37.60b
		B5	133.60b	20.53e	2.56j	20.21f	37.80b
		B6	133.80b	20.19e	2.59j	19.89g	38.50a
变异来源		年份	*	**	*	ns	**
		密度	**	**	**	**	**
		行距	**	**	**	**	**
		年份×密度	*	**	*	ns	**
		年份×行距	**	**	**	ns	**
		密度×行距	**	**	*	**	**
		年份×密度×行距	ns	**	*	ns	**

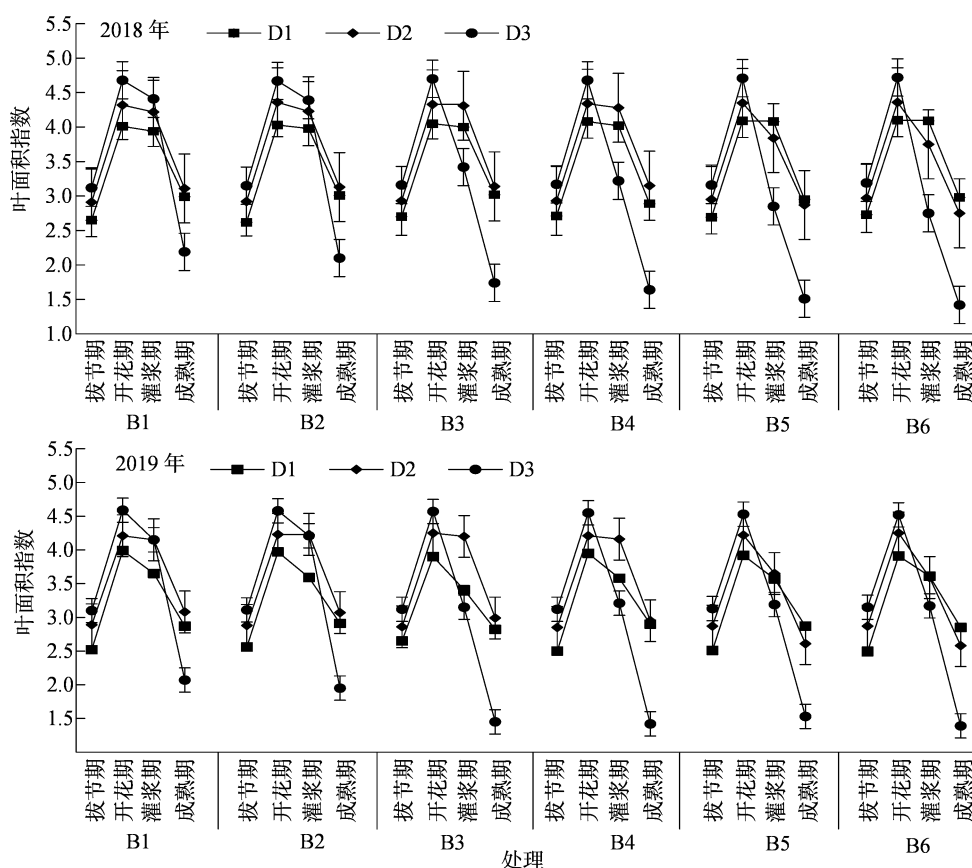


图2 不同密度和株行距配置下群体叶面积指数比较

开花期到灌浆期,高密度处理(D3)下层叶片 LAI 值下降幅度大,且叶面积指数随着密度越大下降幅度越明显,说明密度对高粱群体叶层,特别是下层 LAI 值影响较大。

如表 3 所示,2018 年,在 D1 密度下,各行距处理对不同叶层 LAI 值的影响差异不显著,说明低密度下,利用扩行距增株数方法来优化高粱群体冠层结构没达到预期理想;D2 密度下,开花期和灌浆期,冠层上部各行距处理的叶片 LAI 值没有显著差异,冠层中、下部 B5、B6 处理 LAI 值均低于 B1、B2、B3、B4 处理;D3 密度下,在开花期的灌浆期,B1、B2 处理的冠层下部 LAI 值均显著高于其他处理。2019 年试验结果与 2018 年大致相同。由此可知,在高密度种植下,B1、B2 处理可以通过株行距合理配置来调节高粱冠层叶片叶面积,特别是冠层的中下部,以此来增加高粱群体的光合作用来增加产量。

2.5 群体透光率的比较

由表 4 可知,在灌浆期,种植密度、不同行距配置及两者互作对群体透光率影响显著。高粱群体的透光率随着冠层部位增高而增大。下层透光率随着密度的增加而降低。可见,增密后,群体冠层

上、中部光能截获增加,导致下层光照降低。

2 年中在 D1 密度下,随着行距的增加,高粱群体各叶层透光率没有明显差异;在 D2(中密度)、D3(高密度)密度下,随着种植行距的增加,透光率呈现逐渐降低的变化趋势。特别是 B5、B6 处理,群体中小部透光性差。可以看出,在高密度种植处理中,行距过大,株距太小,群体内部拥挤,采光能力下降,而采用缩行扩株的方法,可以提高高粱群体的透光性。所以,采用适当且合理的行株距配置方式才能使高粱群体处在良好的受光环境。

由表 5 可知,密度、行距、年份密度互作、密度行距互作对高粱干物质积累与分配有显著影响。由 2 年数据综合分析得出:DMAF、DMAM、CADMTK 和 DMAFA 均表现为高密度处理显著大于中密度、低密度处理。在低密度(D1 密度)各行距处理间 DMAF 和 DMAM 未达到显著差异水平;在中密度(D2 密度)下,B1、B2、B3 和 B4 处理 DMAM 和 PFDMT 均显著大于 B5 和 B6 处理;在高密度(D3 密度)下,B1、B2 处理的 DMAM、PFDMT 显著大于其他处理,CADMTK、DMAFA 显著低于其他处理。可以看出,B1、B2 行距处理产量提高是通过增加开花后

表 3 不同密度和行距配置下高粱叶面积指数比较

年份	密度	行距	叶面积指数					
			冠层上部		冠层中部		冠层下部	
			开花期	灌浆期	开花期	灌浆期	开花期	灌浆期
2018	D1	B1	0.89d	0.82c	1.09e	1.03c	2.22e	2.02c
		B2	0.85d	0.82c	1.07e	1.02c	2.12e	2.03c
		B3	0.84d	0.81c	1.08e	1.03c	2.15e	2.00c
		B4	0.86d	0.79c	1.07e	1.00c	2.11e	2.02c
		B5	0.85d	0.80c	1.06e	1.02c	2.14e	2.05c
		B6	0.83d	0.79c	1.07e	1.03c	2.13e	2.02c
	D2	B1	1.03a	0.91b	1.23c	1.11b	2.35b	2.19b
		B2	1.02a	0.90b	1.21c	1.09b	2.36b	2.18b
		B3	1.01a	0.89b	1.19c	1.08b	2.39b	2.20a
		B4	1.02a	0.91b	1.20c	1.10b	2.38b	2.19b
		B5	1.03a	0.91b	1.16d	1.06c	2.16e	1.96d
		B6	1.01a	0.90b	1.15d	1.05c	2.18e	1.93d
	D3	B1	1.01a	0.93a	1.38a	1.28a	2.45a	2.01c
		B2	1.03a	0.95a	1.39a	1.29a	2.43a	2.03c
		B3	1.02a	0.94a	1.38a	1.27a	2.28d	1.18e
		B4	1.01a	0.93a	1.36a	1.29a	2.25d	1.17e
		B5	1.00a	0.95a	1.32b	1.27a	2.21e	1.16e
		B6	1.04a	0.96a	1.30b	1.29a	2.19e	1.15e
2019	D1	B1	0.86d	0.84c	1.10e	1.05c	2.18e	2.21a
		B2	0.87d	0.85c	1.11e	1.06c	2.17e	2.22a
		B3	0.85d	0.83c	1.09e	1.04c	2.16e	2.23a
		B4	0.85d	0.82c	1.10e	1.07c	2.17e	2.21a
		B5	0.83d	0.81c	1.02f	0.95e	2.15e	1.93d
		B6	0.82d	0.78d	1.01f	0.94e	2.16e	1.94d
	D2	B1	0.91c	0.90b	1.19c	0.94e	2.36b	2.21a
		B2	0.94c	0.91b	1.18c	0.98d	2.40a	2.20a
		B3	0.95c	0.90b	1.21c	1.04c	2.32c	2.12b
		B4	0.93c	0.89b	1.20c	1.05c	2.38b	2.20a
		B5	0.92c	0.89b	1.19c	1.05c	2.32c	1.94d
		B6	0.93c	0.90b	1.17c	1.10b	2.33c	1.95d
	D3	B1	0.98b	0.95a	1.29b	1.26a	2.34b	2.06c
		B2	1.02a	0.96a	1.32b	1.25a	2.35b	2.04c
		B3	1.01a	0.94a	1.33a	1.27a	2.33c	1.15e
		B4	1.00a	0.93a	1.30b	1.26a	2.27d	1.13e
		B5	0.98b	0.91ab	1.31b	1.25a	2.19e	1.12e
		B6	1.03a	0.93a	1.34a	1.25a	2.17e	1.11f
变异来源		年份	*	**	ns	ns	ns	*
		密度	**	**	ns	ns	*	ns
		行距	**	**	ns	**	**	**
		年份×密度	**	**	ns	ns	ns	**
		年份×行距	**	**	ns	**	*	**
		密度×行距	**	**	ns	**	*	**
		年份×密度×行距	**	**	ns	**	*	**

表 4 不同行距配置对高粱灌浆期冠层光能分布的影响

年份	密度	行距	光能辐射量(klx)			中上部透光率(%)	中下部透光率(%)
			上部	中部	下部		
2018	D1	B1	866a	437a	247a	50.5a	28.5a
		B2	856a	439a	243a	51.3a	28.4a
		B3	861a	438a	245a	50.9a	28.5a
		B4	863a	435a	248a	50.4a	28.7a
		B5	864a	438a	249a	50.7a	28.8a
		B6	862a	441a	251a	51.2a	29.1a
	D2	B1	854a	405c	231b	47.4b	27.0ab
		B2	857a	403c	232b	47.0b	27.1ab
		B3	859a	405c	231b	47.1b	26.9ab
		B4	860a	404c	225c	47.0b	26.2ab
		B5	861a	381d	204d	44.3c	23.7c
		B6	862a	375d	206d	43.5c	23.9c
	D3	B1	851a	410c	228c	48.2b	26.8ab
		B2	849b	409c	227c	48.2b	26.7ab
		B3	847b	369d	201d	43.6c	23.7c
		B4	845b	358d	198d	42.4c	23.4c
		B5	842b	355d	174d	42.2c	21.8d
		B6	840b	345d	171e	41.1d	20.3d
2019	D1	B1	864a	428ab	241a	49.0a	27.9a
		B2	853a	427ab	244a	50.1a	28.6a
		B3	859a	432a	246a	50.3a	28.6a
		B4	854a	435a	247a	50.9a	28.9a
		B5	853a	436a	251a	51.1a	29.4a
		B6	860a	438a	253a	50.9a	29.4a
	D2	B1	850a	421b	235b	49.5a	27.6a
		B2	853a	423ab	238b	49.6a	27.9a
		B3	849a	425ab	241a	50.1a	28.4a
		B4	854a	426ab	243a	49.9a	28.5a
		B5	853a	428ab	226c	50.2a	26.5ab
		B6	849a	431a	218cd	50.8a	25.7b
	D3	B1	848a	419b	230b	49.4a	27.1ab
		B2	847a	421b	231b	49.7a	27.3ab
		B3	838b	423b	196d	50.5a	23.4c
		B4	839b	426ab	181d	50.8a	21.6d
		B5	834b	429a	178d	51.4a	21.3d
		B6	832b	432a	175d	51.9a	21.0d
变异来源		年份	ns	ns	ns	ns	ns
		密度	ns	**	*	**	**
		行距	ns	*	*	**	**
		年份×密度	ns	**	**	*	*
		年份×行距	ns	*	*	*	*
		密度×行距	ns	**	**	**	**
		年份×密度×行距	ns	**	*	ns	ns

注:2018 年自然光照辐射度为 871 klx;2019 年自然光照辐射度为 889 klx。

表 5 不同行距配置对高粱干物质积累与转运的影响

年份	密度	行距 (cm)	开花期干物质 积累量(DMAF) (t/hm ²)	成熟期干物质 积累量(DMAM) (t/hm ²)	花后干物质 积累量(PFMT) (t/hm ²)	花后干物质 转运量(CADMTK) (t/hm ²)	花后干物质转运量 对籽粒的贡献率 (DMAFA)(%)
2018	D1	B1	14.54f	25.71f	11.17e	2.01e	25.99e
		B2	14.60f	25.68f	11.08e	2.05e	26.58e
		B3	14.73f	25.70f	10.98e	2.04e	26.48e
		B4	14.68f	25.62f	10.94e	2.07e	26.64e
		B5	14.54f	25.76f	11.22e	2.12e	27.93d
		B6	14.67f	25.66f	10.99e	2.03e	27.40d
	D2	B1	17.97ed	32.26c	14.29b	2.21d	26.08e
		B2	18.19c	32.39c	14.20b	2.12e	25.17ef
		B3	18.31c	32.43c	14.12b	2.26d	26.70e
		B4	18.15c	32.34c	14.19b	2.25d	26.79e
		B5	17.77d	31.44d	13.67b	2.75a	33.43a
		B6	17.64d	31.12d	13.48b	2.79a	34.43a
	D3	B1	21.48a	37.50a	16.02a	2.26d	24.39f
		B2	21.46a	37.21a	15.76a	2.19d	23.85f
		B3	21.49a	35.43b	13.93b	2.59ab	29.56c
		B4	21.51a	35.18b	13.68c	2.39b	28.00d
		B5	21.17a	34.98b	13.81c	2.50b	30.17c
		B6	21.08a	34.38b	13.29c	2.43b	29.90c
2019	D1	B1	14.12f	24.70g	10.87e	2.00e	26.97e
		B2	14.12f	24.61g	10.73e	2.05e	27.46d
		B3	14.18f	24.87g	10.40f	2.01e	26.90e
		B4	14.09f	24.51g	10.42f	2.01e	26.99e
		B5	14.01f	24.55g	10.54f	2.03e	27.25d
		B6	13.99f	24.52g	10.53f	1.95f	26.34e
	D2	B1	17.75d	31.83d	14.09b	2.26d	26.97e
		B2	17.62d	31.63d	14.01b	2.10d	25.06e
		B3	17.66d	31.39d	13.74c	2.15d	25.79e
		B4	17.51d	31.31d	13.79c	2.15d	25.65e
		B5	17.21d	29.93e	12.71d	2.32c	28.43d
		B6	17.01de	29.76e	12.75d	2.45b	30.19c
	D3	B1	21.15a	37.86a	16.71a	2.34c	26.19e
		B2	21.21a	37.59a	16.38a	2.34c	26.50e
		B3	20.94b	35.05b	14.11c	2.65a	30.98c
		B4	20.76b	35.03b	14.27c	2.57a	30.61c
		B5	20.49b	35.02b	14.53c	2.67a	32.81b
		B6	20.39b	34.95b	14.56c	2.64a	32.36b
变异来源	年份	*	ns	*	ns	ns	
	密度	**	**	**	**	**	
	行距	**	**	**	**	**	
	年份×密度	**	**	**	**	**	
	年份×行距	*	ns	**	**	**	
	密度×行距	**	*	**	**	*	
	年份×密度×行距	ns	**	**	*	*	

群体干物质积累量来实现。

3 结论与讨论

3.1 密度和株行距对高粱群体冠层结构的影响

种植密度在一定程度上决定作物群体大小,而合理的行距配置决定群体与个体之间是否协调^[14]。研究表明,适宜的等行距种植方式,能够优化植株叶片分布形态,提高群体叶面积指数,增加冠层透光率,同时增加叶片的叶绿素含量,在一定程度上实现光能优势利用,是在高密种植方式下获得高产的有效途径^[15]。前人研究表明,玉米在增加密度后,在灌浆期,下部叶片加速衰败,光合能力下降,而采取调整种植行距的种植方式,能够提升冠层下部叶片光能利用能力,群体光合能力进一步改善,进而产量提高^[16]。本研究结果与之一致,在 D3 密度(165 000 株/hm²)下,B1、B2 处理的叶面积指数从开花期到灌浆期显著高于其他行距处理,并且下部叶起关键作用,且从开花期到灌浆期,相比于其他行距处理,B1 和 B2 处理的中下层叶片衰老速度下降,使得高粱群体能够保持更久的光合作用,进一步解决增密后群体冠层源不足制约产量增加的弊端,有效提升高粱群体产量潜力。

吉杂 159 推荐密度为 135 000 ~ 150 000 株/hm²,本试验采取的 D1 密度(105 000 株/hm²)低于这个推荐密度,种植密度过小,未能发挥调整株行距来协调群体内部光能的优势,株行距间产量差异不显著;D3 密度(165 000 株/hm²)大于吉杂 159 的推荐密度,在此密度下,与 B1、B2 行距处理相比,其他行距处理呈现减产效果,这可能是因为高密度种植条件下,个体之间对光能和养分等竞争激烈所致,此时加大行距,株距会进一步缩小,也会进一步加剧植株间对光能和养分等环境资源的竞争,不利于提高产量,这与茆建峰等的研究结果^[17]一致。在高密度(165 000 株/hm²)下,缩行扩株种植使群体冠层中下部叶片茎叶夹角增大,叶向值变小,冠层的中上部透光率增加,群体中下部叶片生长空间相对的扩大,提高了冠层的光能截获能力,在一定程度上缓解了因增密可能造成的光能损失。D3 密度下,B1、B2 处理的茎秆横截面积较其他处理显著增加,植株抗倒伏能力提升,在一定程度上缓解了密植下植株易倒伏的问题。

由于试验条件有限,本研究并未对不同株行距配置高粱群体的光合能力差异进行研究,只对单株

叶面积、透光率等进行分析,不能完全阐明该试验条件下高粱产量与光合特性更深入的关系。

3.2 密度和株行距对高粱干物质积累的影响

干物质积累与合理的分配是影响高粱生长发育关键指标之一,直接决定产量高低^[18-19]。前人研究表明^[20],密度增加的同时,高粱群体产量和干物质积累量呈现先增后减少的趋势;何冬冬等在研究玉米株行距与产量的关系时发现,在 7.5 万株/hm²种植密度下,适宜的株行距有利于提高玉米生育后期干物质积累及积累速率^[21];还有研究表明,群体结构的变化直接影响干物质积累,高密度种植时,适当的调节株行距配置,可以良性协调植株个体与群体的关系,提高干物质积累量^[22]。本研究结果与之一致,在高密度(165 000 株/hm²)处理下,调整株距,花后群体干物质积累量增加,而花后干物质转运量减少,可知在高种植密度下,B1、B2 行距处理花后维持高的干物质积累量,延长营养器官功能,利于产量提高。

3.3 密度和株行距对高粱产量的影响

已有研究表明,合理的群体结构通过影响高粱群体内部的光分布以及叶片对光能的截获能力,从而影响群体光合能力和地上部的生物产量^[11],高粱高产需要合理的群体结构来实现。本试验结果表明,同低密度(105 000 株/hm²)和中密度(135 000 株/hm²)种植方式相比,高密度(165 000 株/hm²)种植田间表现为,群体叶面积指数增加,中下部叶层光能截获能力加强,透光率降低,花后干物质积累量增加,高粱群体产量显著增加。可以看出,增密提升高粱群体产量,但过密会导致群体光能利用能力降低。因此在高密度种植下,合理的株行距配置能发挥高粱个体发育潜力,能够调节群体与个体之间的关系,是确保高粱群体高产稳产的重点。有研究表明,合适的密度和株行距配置能够促进高粱的单穗粒数和穗粒重相互协同关系^[12],本试验条件下,在高密度(165 000 株/hm²)种植下,B1 和 B2 处理(行距 50 ~ 55 cm)产量和穗粒数、千粒重显著高于其他处理,表明在高密度处理下,适当的缩小行距、扩大株距使产量提高的原因主要是增加了高粱植株个体穗粒数和千粒重,这与朱凯等的研究结果^[12]一致。王劲松等在研究不同行距和密度对饲用高粱产量影响因素时发现,不同行距和密度严重影响高粱生长,适宜的株行距配置能够增加穗后生物量积累、提高饲用高粱产量^[9]。本试验研究结果与之一致,

高密度种植处理下,加大行距,株距减少,植株间距离小,个体间对光能、水肥等资源竞争加大,植株叶片间相互遮蔽,互相遮挡严重,遮阴挡风,个体发育不良,茎秆变细,植株生长又细又高,易倒伏,群体产量的提升由于个体间的竞争加剧而受到很大的限制,最终导致产量降低。因此,在高密度下,需采取适宜的种植行距。

虽然 2 年的降水量有明显不同,但 2 年的产量变化趋势大致相同,在高密度下(165 000 株/hm²),B1、B2 行距处理的产量均显著大于其他处理,这与降水量分布有关,还和高粱本身抗性有关系,在极端气候下仍然能正常生长。

综上所述,在本试验条件下,高粱品种吉杂 159 种植密度 165 000 株/hm² 搭配 50 ~ 55 cm 的等行距种植方式,产量最高,达到 8 817.1 ~ 9 267.2 kg/hm²,在此株行距搭配下,高粱个体与群体之间的生长发育得到更好的协调,群体结构更合理,在增密条件下可以更好地发挥高粱群体的产量潜力。采用增密缩行距扩大株距的种植方法,显著提高高粱群体的透光性,增加了群体中下层叶片的叶面积指数,优化了群体结构和冠层光合性能,群体内植株能够充分利用光温资源,协调个体与群体之间的关系,实现群体结构优化,促进高粱群体产量的提高。因此,在增密(165 000 株/hm²)条件下,采用缩小行距增加株距的种植方式能更好地与春播早熟区的温光资源匹配,可以进一步有效提高产量。

参考文献:

- [1] 邹剑秋. 高粱育种与栽培技术研究新进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(14): 2769 - 2773.
- [2] 卫 丽,熊友才,马 超,等. 不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2524 - 2531.
- [3] 周 瑜,李泽碧,张亚勤,等. 主季种植密度和施氮量对高粱再生产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 43 - 53.
- [4] 段有厚,卢 峰,张 飞,等. 矮秆高粱光合物质生产及产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(9): 131 - 133.
- [5] 王晓波,齐 华,赵 明,等. 东北春玉米密植群体种植方式产量性能效应研究[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 84 - 89, 94.
- [6] 赵甘霖,丁国祥,刘天朋,等. 宽窄行和等行距栽培条件下高粱种植密度与产量的关系研究[J]. 农学学报, 2013, 3(8): 11 - 13.
- [7] 杨吉顺,高辉远,刘 鹏,等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1226 - 1233.
- [8] 周汉章,刘 环,贾海燕,等. 种植密度与行距对秋闲田饲用甜高粱单株生产力的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(3): 41 - 47.
- [9] 王劲松,董二伟,刘秋霞,等. 行距和密度对籽粒饲用高粱产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(16): 3123 - 3133.
- [10] 关 心,陈皆辉,周立权,等. 春玉米密度、株行距配置的产量效应[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2016, 31(3): 225 - 231.
- [11] 刘永忠,李万星,曹晋军,等. 高密度条件下行距配置对春玉米光合特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 111 - 117.
- [12] 朱 凯,张 飞,柯福来,等. 种植密度对适宜机械化栽培高粱品种产量及生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2018(1): 83 - 87.
- [13] 董二伟,王劲松,武爱莲,等. 行距和密度对高粱籽粒灌浆、淀粉及氮磷钾累积特征的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(12): 2459 - 2470.
- [14] 高英波,陶洪斌,黄收兵,等. 密植和行距配置对夏玉米群体光分布及光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 9 - 15.
- [15] 齐 华,梁 熠,赵 明,等. 栽培方式对玉米群体结构的调控效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 134 - 139.
- [16] 明 博,谢瑞芝,侯 鹏,等. 2005—2016 年中国玉米种植密度变化分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1960 - 1972.
- [17] 裴建峰,张海红,李鸿萍,等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 104 - 112.
- [18] 景立权,肖 尧,袁建华,等. 玉米超高产栽培生理研究进展[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 84 - 90.
- [19] 陈路路,孙 哲,田昌庚,等. 氮钾互作对甘薯生长发育、干物质积累分配及产量形成的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 68 - 75.
- [20] 肖继兵,刘 志,孔凡信,等. 种植方式和密度对高粱群体结构和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4264 - 4276.
- [21] 何冬冬,杨恒山,张玉芹. 扩行距、缩株距对春玉米冠层结构及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 397 - 408.
- [22] 杨克军,萧常亮,李 明,等. 栽培方式与群体结构对玉米生长发育及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2005, 17(4): 9 - 12.