

种植方式和密度对谷子光合性能和产量的影响

屈 洋¹, 马 雯¹, 王可珍¹, 高小丽², 冯佰利², 王宝梅¹

(1. 宝鸡市农业科学研究院, 陕西 岐山 722499; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:2019—2020 年以豫谷 31 为试验材料, 采用二因素裂区试验设计, 主区为种植方式, 分别为种 2 行空 1 行(P1)和种 3 行空 1 行(P2); 裂区为种植密度, 分别为低密度 27 万株·hm⁻²(D1)、中密度 33 万株·hm⁻²(D2)和高密度 39 万株·hm⁻²(D3), 设 3 次重复, 探究不同处理组合对谷子群体光合特性和产量的影响。结果表明: 年份、种植方式、密度以及处理之间的互作效应均对谷子籽粒产量具有极显著影响($P<0.01$); P1 处理的谷子产量(2 971.1 kg·hm⁻²)较 P2 处理高 20.37%($P<0.05$), D2 处理的谷子产量(2 872.1 kg·hm⁻²)较 D1 和 D3 处理分别高 10.34%($P<0.05$)和 6.98%($P<0.05$); 同一种植模式下, 随着密度的增加, 叶片 SPAD 值、净光合速率(P_n)、水分利用效率($IWUE$ 、 WUE)和羧化速率(CE)逐渐下降, P1 处理的生育期平均 SPAD 值、 P_n 、 $IWUE$ 、 WUE 和 CE 较 P2 处理分别高 4.73%、1.95%、3.77%、8.61%、12.54%。同一种植模式下, 随着密度的增加, 穗长和穗粗差异不显著, 株高、穗长、穗粒数和千粒重存在较大的差异。P1 条件下, 处理 D2 两年的平均穗粒数和千粒重较 D1 和 D3 分别高 9.11%、13.53%和 11.76%、7.55%; P2 条件下, D2 处理两年的平均穗粒数和千粒重分别较 D1 和 D3 高 7.98%、6.06%和 5.77%、22.22%。比空带状种植(种 2 行空 1 行)和密度 33 万株·hm⁻²能更好地利用光热资源, 是提高谷子产量的有效栽培方式。

关键词: 谷子; 种植方式; 密度; 产量; 光合性能

中图分类号: S515; S35 **文献标志码:** A

Effects of planting pattern and density on photosynthetic characteristics and yield of foxtail millet

QU Yang¹, MA Wen¹, WANG Kezhen¹, GAO Xiaoli², FENG BaiLi², WANG Baomei¹

(1. Baoji Institute of Agricultural Science, Qishan, Shaanxi 722499, China;

2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The Yugu 31 of foxtail millet variety was used as the experimental material to explore the effect of plant pattern and density on photosynthetic utilization and yield of foxtail millet. Two planting pattern treatments of plant pattern of 2 : 0 (P1) and plant pattern of 3 : 0 (P2) and three plant densities of 2.7×10^5 plants · hm⁻² (D1), 3.3×10^5 plants · hm⁻² (D2), and 3.9×10^5 plants · hm⁻² (D3) were used to form different cultivation patterns by split zone design with 3 duplicates in 2019–2020. The results showed that highly significant effects were found in year, plant pattern, plant density, and interaction effect among treatments ($P<0.01$). P1 yield with 2 971.1 kg · hm⁻² was higher by 20.37% ($P<0.05$) than that of P2, and D2 yield with 2 872.1 kg · hm⁻² were higher by 10.34% ($P<0.05$) and 6.98% ($P<0.05$) than that of D1 and D3, respectively. Under the same plant pattern, plant density increasing led to decrease of SPAD, P_n , $IWUE$, WUE , and CE . Values of SPAD, P_n , $IWUE$, WUE , and CE from P1 in tested seasons increased by 4.73%, 1.95%, 3.77%, 8.61%, and 12.54%, respectively, compared with that of P2. In addition, density increasing had no significant effect on ear length and ear diameter, but density increasing had significant effects on plant height, kernels per ear, and 1000-seed weight. Kernels per ear and 1000-seed weight from D2 in P1 increased by 9.11%, 13.53% respectively compared with that of D1, and 11.76%, 7.55% respectively compared with that of D3. Kernels per ear and 1000-seed weight from D2

in P2 increased by 7.98%, 6.06% respectively compared with that of D1, and 5.77%, 22.22%, respectively, compared with that of D3. The plant pattern of 2 : 0 (P1) with 3.3×10^4 plants $\cdot$ hm⁻² (D2) was the effective cultivation pattern for increasing yield due to better use efficiency of light and temperature.

Keywords: foxtail millet; plant pattern; plant density; yield; photosynthetic characteristics

作物产量形成依托群体结构和环境之间的相互协调^[1],合理的群体结构通过影响作物个体的生长发育决定作物群体的产量^[2]。当群体中有利的生态因子作用大于不利的生态因子作用时,作物群体表现出边际优势^[3],因此科学合理的群体结构可充分发挥群体边际优势,提高光能和水分的利用效率,进而提高作物产量^[4]。构建谷子合理群体结构,提高水热资源的利用效率,对谷子的高产栽培具有重要意义。

种植密度增加是在现有品种条件下取得作物高产的趋势^[5],但是高密度条件下容易造成光、热、水等资源分配不合理、个体竞争加剧,造成群体倒伏^[6]。在高密度条件下,进一步提高产量要与种植模式相互协调,改善群体内的资源分布^[7-8],从而平衡个体与群体之间的矛盾^[9],促进群体内个体的充分发育^[10],达到最佳临界点^[11]。前人研究表明^[12],缩行宽带种植方式在高密度或者低密度条件下均能降低玉米穗位上两叶的夹角,改善群体的受光能力,且三行一带种植方式能获得较高的产量。密植条件下,玉米冠层的结构受到影响,且不同品种的敏感程度存在差异,双株种植^[13]、沟垄种植^[14]和宽窄行种植^[15]可改善冠层群体结构的质量和功能,产量优势明显。同等种植密度条件下,花生单粒播种方式的产量优于双粒播^[16]。种植方式和合理的密度组合能改善大豆单株粒数、单株荚数和单株粒重,最终获得较高的产量^[17]。在高密度条件下,宽窄行种植方式并不影响棉花和薏苡品质且能获得较高的棉花和薏苡产量^[18-19]。同时,45万株 $\cdot$ hm⁻²条件下,地膜覆盖种植方式的谷子产量优于低密度条件下的谷子产量,且实现了地膜覆盖种植方式与高种植密度协同,最终获得较高的产量^[20]。

前人在种植模式和密度对群体结构、个体结构、产量特性和农艺特性等方面研究较多^[21-23],但这些研究报道主要集中在玉米、大豆、花生、薏苡等作物上,而结合区域的光热资源特点,通过采用比空带状种植(种2行空1行)以协调谷子群体的光能利用和水分利用效率,实现谷子高效栽培的研究鲜见报道。本文在比空带状种植条件下,研究密度对谷子群体产量及农艺特性的影响,明确比空带状种植和密度对谷子产量形成的调控方式,挖掘谷子的产

量潜力,为谷子高产栽培提供理论依据和技术实践。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019—2020年在宝鸡市农业科学研究院岐山县刘家塬试验基地进行(107°39'E、34°27'N,海拔669.6m)。该区属大陆性季风半湿润气候,四季冷暖干湿分明。供试土壤为粘壤土,耕层(0~20cm)土壤养分含量分别为有机质18.93g $\cdot$ kg⁻¹、全氮0.61g $\cdot$ kg⁻¹、碱解氮75.90mg $\cdot$ kg⁻¹、速效磷19.73mg $\cdot$ kg⁻¹、速效钾171.6mg $\cdot$ kg⁻¹,pH值8.55。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计,主区为种植模式,分别为种2行空1行(比空带状种植,P1)和种3行空1行(P2),裂区为种植密度,分别为低密度27万株 $\cdot$ hm⁻²(D1)、中密度33万株 $\cdot$ hm⁻²(D2)和高密度39万株 $\cdot$ hm⁻²(D3)。小区面积16m²(3.2m $\times$ 5m),行距40cm,8行区,每小区种植6行,3次重复,随机区组排列。参试品种为豫谷31,因谷子不宜重茬,2019年和2020年试验在相邻地块进行。结合整地施入三元复合肥375kg $\cdot$ hm⁻²(N:P:K=15:15:15,总养分含量 $\geq$ 45%),生育期间不灌溉、不追肥。2019年4月29日和2020年4月30日播种,5叶期按设计密度进行间定苗,8月中下旬收获。其他田间管理方式等同于大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农艺性状及产量 在谷子籽粒成熟期,每小区随机选取10株进行室内考种,主要测定株高、穗长、穗粗、穗粒数和千粒重,全区收获并以13%含水量计算产量。

1.3.2 叶绿素相对含量(SPAD值) 利用日本产SPAD-502plus叶绿素仪在拔节期、孕穗期、灌浆期和乳熟期选择生长发育一致、叶片无破损的植株测定谷子冠层上部(上数第2片叶)、冠层中部(上数第5片叶)、冠层下部(上数第8片叶)叶片的叶绿素相对含量。每小区取10株代表性植株,测定叶片上、中、下3个不同点的SPAD值,每片叶测量5次,取平均值。

1.3.3 叶片光合性能 选择晴朗无云天气,在上午9:00—11:00利用美国产便携式光合测定系统

TARGAS-1, 内置光源设定为 $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 于拔节期、孕穗期、灌浆期和乳熟期选择生长发育一致、叶片无破损的植株, 测定谷子冠层上部(上数第 2 片叶)、冠层中部(上数第 5 片叶)、冠层下部(上数第 8 片叶)叶片的光合性能(净光合速率 P_n , 气孔导度 G_s , 胞间 CO_2 浓度 C_i , 蒸腾速率 E), 每小区取 10 株代表性植株, 测量位置为叶片中部, 每片叶重复测量 3 次, 取平均值。其中, 内在水分利用效率(Intrinsic water use efficiency, $IWUE$)、瞬时水分利用效率(Instantaneous water use efficiency, WUE)、羧化速率(Carboxylation efficiency, CE)采用以下公式进行计算^[24-25]:

$IWUE = P_n / G_s$ (1)

$WUE = P_n / E$ (2)

$CE = P_n / C_i$ (3)

式中, P_n 为叶片的净光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), G_s 为叶片的气孔导度($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), E 为叶片的蒸腾速率($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), C_i 为叶片的胞间 CO_2 浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理及图表制作, DPS 7.05 软件进行差异显著性检验(Duncan 法), 显著水平为 $P < 0.05$ 或者 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 种植方式和密度对谷子籽粒产量的影响

年份、种植方式、密度以及处理之间的交互作用对谷子的籽粒产量具有显著影响(表 1)。年份、种植方式、密度、年份×种植方式、年份×密度、种植方式×密度、年份×种植方式×密度均对谷子籽粒产量具有显著影响($P < 0.01$)。种植方式 P1 较 P2 籽粒产量分别增加 19.19% (2019 年) 和 21.93% (2020 年)。在 P1 种植方式下, 各处理产量差异显著, 其中 D2 处理产量高于 D1 和 D3 处理, 两年平均产量 $3\ 127.0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在 P2 种植方式下, 各处理产量差异显著, 其中 D2 处理产量高于 D1 和 D3 处理, 两年平均产量 $2\ 617.20\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。多重比较表明, P1 处理的谷子籽粒产量较 P2 处理高 20.37% ($P < 0.05$), D2 处理的谷子产量较 D1 和 D3 处理高 10.34% ($P < 0.05$) 和 6.98% ($P < 0.05$)。可以看出, 种植方式 P1 下的 D2 密度处理产量最高。

2.2 种植方式和密度对谷子叶片光合性能的影响

2.2.1 对 SPAD 值的影响 不同处理对谷子叶片相对叶绿素含量 SPAD 值的影响见表 2。P1 处理的生育期平均 SPAD 值较 P2 处理分别高 6.68% (2019

年) 和 2.77% (2020 年)。各处理 SPAD 值随着生育进程呈先升高后降低的趋势。拔节期, 各处理 SPAD 值没有显著差异; 抽穗期、灌浆期、乳熟期各处理的 SPAD 值呈现差异。相同种植模式下, 随着密度的增加 SPAD 值下降。在 P1 条件下, D2 和 D3 处理生育期平均 SPAD 值较 D1 处理分别下降 1.02% 和 8.04% (2019 年)、3.54% 和 8.04% (2020 年)。在 P2 条件下, D2 和 D3 处理生育期平均 SPAD 值较 D1 处理分别下降 0.64% 和 5.80% (2019 年)、4.46% 和 7.26% (2020 年)。

2.2.2 对净光合速率的影响 不同处理对谷子叶片净光合速率的影响见表 3。P1 处理的生育期平均净光合速率值较 P2 处理分别高 2.23% (2019 年) 和 1.66% (2020 年)。拔节期各处理的净光合速率差异不显著, 孕穗期、灌浆期、乳熟期各处理的净光合速率在同一种植模式下随着密度的增加逐渐降低。在 P1 条件下, D2 和 D3 处理生育期平均净光合速率较 D1 处理分别下降 7.64% 和 26.44% (2019 年)、3.99% 和 24.79% (2020 年)。在 P2 条件下, D2 和 D3 处理生育期平均净光合速率较 D1 处理分别下降 4.00% 和 26.30% (2019 年)、2.30% 和 28.60% (2020 年)。

表 1 不同处理谷子的籽粒产量分析/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 1 Effects of different treatments on yield of foxtail millet

项目 Item	种植密度 Plant density	2019	2020
P1	D1	3418.38a	2366.63c
	D2	3453.11a	2800.88a
	D3	3182.15b	2605.47b
	平均 Mean	3351.21	2590.99
P2	D1	2633.26c	1993.18c
	D2	2980.66a	2253.73a
	D3	2820.85b	2127.80b
	平均 Mean	2811.59	2124.90
变异来源 Sources of variation	P 值 P value	多重比较 Multiple comparisons	产量均值 Yield mean value
年份 Year/(Y)	0.0005 **	P1	2971.10a
种植方式 Plant pattern/(P)	0.0001 **	P2	2468.25b
密度 Density/(D)	0.0001 **	D1	2602.86c
Y×P	0.0107 **	D2	2872.10a
Y×D	0.0001 **	D3	2684.07b
P×D	0.0006 **		
Y×D×P	0.0001 **		

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), 下同。

Note: Values followed by different letters in the same column indicate significantly different ($P < 0.05$). ** means significantly different at $P < 0.01$. The same as below.

表 2 不同处理对谷子叶片 SPAD 值的影响

Table 2 Effects of different treatments on the leaf SPAD value of foxtail millet

年份 Year	种植方式 Plant pattern	密度 Plant density	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk stage	平均值 Mean value
2019	P1	D1	51.70a	58.40a	63.70a	60.00a	58.45
		D2	52.90a	57.90a	61.20b	59.40a	57.85
		D3	52.10a	55.70b	55.20c	52.00b	53.75
	P2	D1	44.70a	56.40a	62.20a	53.90a	54.30
		D2	46.20a	55.70a	61.00a	52.90a	53.95
		D3	45.70a	49.20b	58.60b	51.1b	51.15
2020	P1	D1	51.90a	56.60a	66.97a	61.93a	59.35
		D2	50.73a	53.23b	64.27b	60.77a	57.25
		D3	51.33a	51.47c	61.87c	54.63b	54.83
	P2	D1	49.67a	56.23a	64.93a	60.60a	57.86
		D2	48.43a	54.97b	62.57b	55.13b	55.28
		D3	50.37a	51.77c	61.33b	51.17c	53.66

表 3 不同处理对谷子叶片净光合速率的影响/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 3 Effects of different treatments on P_n of foxtail millet

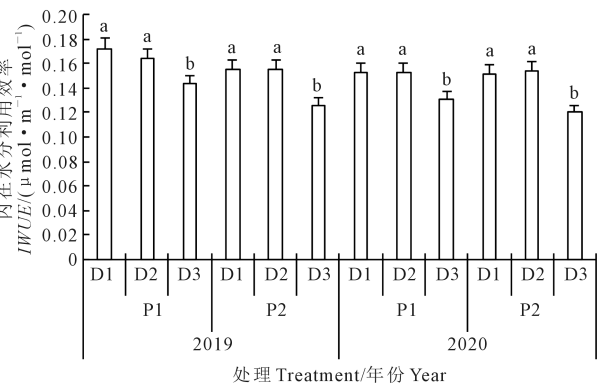
年份 Year	种植方式 Plant pattern	密度 Plant density	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk stage	平均值 Mean value
2019	P1	D1	15.51a	22.30a	25.93a	16.91a	20.16
		D2	15.50a	20.79b	24.46a	13.74b	18.62
		D3	14.87a	15.82c	17.65b	10.96c	14.83
	P2	D1	14.15a	22.69a	25.11a	15.60a	19.39
		D2	14.85a	20.92b	25.89a	13.44b	18.78
		D3	14.09a	16.18c	18.47b	8.40c	14.29
2020	P1	D1	12.31a	24.12a	25.33a	15.52a	19.32
		D2	12.87a	21.99b	24.65a	14.68a	18.55
		D3	12.89a	16.76c	19.71b	8.75b	14.53
	P2	D1	12.23a	22.46a	24.87a	17.07a	19.16
		D2	12.65a	21.63a	23.88a	16.70a	18.72
		D3	11.59a	15.77b	18.32b	9.03b	13.68

2.2.3 对水分利用效率的影响 如图 1 所示,处理 P1 条件下,随着密度的增加,谷子生育期内平均内在水分利用效率($IWUE$)降低。其中,处理 D1 和 D2 之间差异不显著,与 D3 差异显著($P<0.05$)。处理 P2 条件下,随着密度的增加,谷子生育期平均 $IWUE$ 变化趋势与处理 P1 相同(图 1)。处理 P1 生育期 $IWUE$ 较 P2 分别高 3.63%(2019 年)和 3.90%(2020 年)。P1 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 $IWUE$ 较 D1 分别降低 4.99%和 16.89%(2019 年)、0.46%和 14.68%(2020 年);P2 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 $IWUE$ 较 D1 分别降低 0.19%和 19.02%(2019 年)、1.69%和 20.58%(2020 年)。

如图 2 所示,P1 条件下,随着密度的增加,谷子生育期内平均瞬时水分利用效率(WUE)降低。其中 D1 和 D2 处理间差异不显著,二者均与 D3 处理间差异显著($P<0.05$)。P2 条件下,随着密度的增加,谷子生育期平均 WUE 变化趋势与处理 P1 相同(图 2)。处理 P1 的生育期 WUE 较 P2 分别高

8.73%(2019 年)和 8.49%(2020 年)。P1 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 WUE 较 D1 分别降低 6.87%和 10.30%(2019 年)、9.73%和 11.29%(2020 年);P2 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 WUE 分别较 D1 降低 4.4%和 9.0%(2019 年)、0.26%和 16.71%(2020 年)。

2.2.4 对羧化速率的影响 不同处理对谷子叶片的羧化速率(CE)见图 3。P1 条件下,随着种植密度的增加,谷子叶片的羧化速率逐渐降低,其中 D1 和 D2 处理的 CE 差异不显著,二者均与处理 D3 差异显著($P<0.05$),且 P2 种植模式下不同密度处理的变化趋势与 P1 相同。处理 P1 生育期羧化速率较 P2 分别高 11.57%(2019 年)和 13.51%(2020 年)。P1 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 CE 较 D1 分别降低 10.62%和 33.52%(2019 年)、32.24%和 6.79%(2020 年);P2 条件下,D2 和 D3 处理的生育期 CE 较 D1 分别降低 5.04%和 33.84%(2019 年)、7.08%和 33.64%(2020 年)。



注:不同小写字母表示各年度同一主处理(P)中的不同副处理(D)之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different sub-treatments (D) in the same main treatment (P) in each year ($P<0.05$). The same as below.

图 1 不同处理对谷子叶片生育期平均内在水分利用效率的影响

Fig.1 Effects of different treatments on the mean IWUE of growth stage in foxtail millet leaves

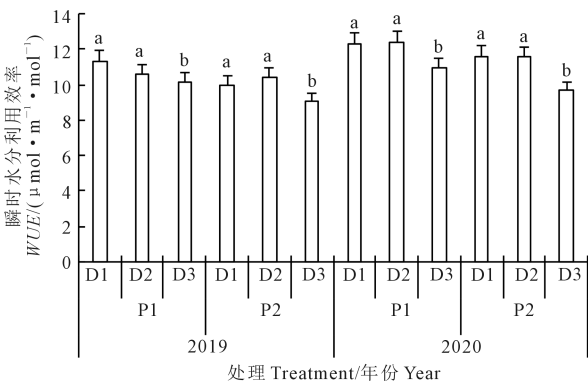


图 2 不同处理对谷子叶片生育期平均瞬时水分利用效率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the mean WUE of growth stage in foxtail millet leaves

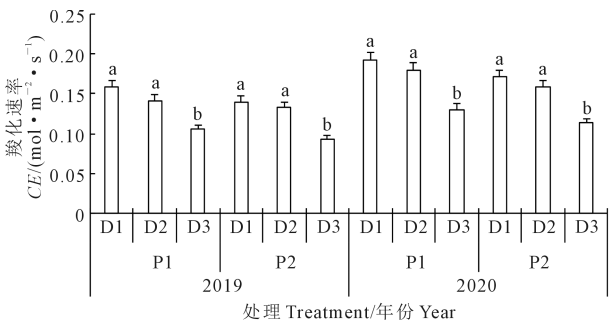


图 3 不同处理对谷子叶片生育期平均羧化效率的影响
Fig.3 Effects of different treatments on the mean CE of growth stage in foxtail millet leaves

2.3 种植方式和密度对谷子农艺性状的影响

不同处理条件下的农艺特性存在较大差异(表 4)。同一种植模式条件下,随着种植密度的增加,穗长和穗粗差异不显著,株高、穗长、穗粒数和千粒重存在较大的差异。处理 P1 条件下不同处理的两年平均株高、千粒重分别较 P2 处理的高 11.11%和 5.60%。P1 条件下,随着种植密度增加,株高不断增加、穗长降低,穗粒数和千粒重先增加后降低,且处理 D2 两年的平均穗粒数和千粒重较 D1 和 D3 分别高 9.11%、13.53%和 11.76%、7.55%;P2 条件下,随着种植密度增加,株高、穗长、穗粒数和千粒重具有与 P1 相同的变化趋势,且 D2 处理两年的平均穗粒数和千粒重分别较 D1 和 D3 高 7.98%、6.06%和 5.77%、22.22%。

3 讨 论

3.1 种植方式与密度对谷子产量的影响

提高种植密度是除肥水管理外增加作物产量最有效的措施^[26],合理的种植方式可以实现在高密

表 4 不同处理对谷子群体农艺性状的影响

Table 4 Effects of different treatments on agronomic traits of millet population

年份 Year	种植方式 Plant pattern	种植密度 Plant density	株高/cm Plant height	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗粒数 Kernels per ear	千粒重/g 1000-seed weight
2019	P1	D1	155.67b	29.00a	3.67a	6698.77b	2.80b
		D2	159.00b	26.33b	3.00a	6819.05a	3.00a
		D3	164.67a	24.00c	3.00a	6518.06c	2.40c
	P2	D1	123.25b	30.50a	3.00a	6327.38b	2.80a
		D2	126.33b	29.00a	3.17a	6590.80a	2.90a
		D3	133.67a	27.00b	3.33a	6339.68b	2.10b
2020	P1	D1	101.33c	30.00a	3.83a	5780.95b	2.10b
		D2	107.67b	29.00a	3.17a	6797.92a	2.90a
		D3	113.33a	30.00a	3.50a	5475.86c	2.90a
	P2	D1	107.00b	27.67a	3.50a	6729.03c	2.40b
		D2	109.67b	27.33a	3.50a	7507.14a	2.60a
		D3	112.67a	27.00a	3.50a	6904.17b	2.40b

度条件下构建合理的作物群体结构,使作物产量增加^[27]。本研究表明,处理 P1 较 P2 籽粒产量具有一定的优势,且差异显著($P<0.05$)。前人研究表明,宽窄行种植能增加谷子的绿叶面积、穗长和穗粒重,使其抗倒性增强、小区产量增加^[28-29],本研究考虑关中地区谷子生育后期连阴雨较多、易发霉粒,设置比空带状种植,充分利用行间的通风透光效果来提升边际效应^[30],并且在 2 a 试验期间未发生倒伏和霉变情况,且处理 P1 具有一定的产量优势,因此认为处理 P1 是该地区合适的谷子种植方式。合适的种植密度是充分发挥种植方式生产潜力的有效途径^[31],密度达到 180 000 株 hm^{-2} 时,晋谷 29 在神木山地产量可达到 5 050.25 kg $\cdot \text{hm}^{-2}$ ^[32]。本研究表明,D2 处理的谷子产量较 D1 和 D3 处理具有一定的优势,且差异显著($P<0.05$)。P1 处理下 D2 种植密度较其他密度穗粒数和千粒重具有优势,且该密度条件下未发生倒伏,表明在 D2 密度下 P1 主要通过改进穗粒数和千粒重实现产量的提高,这与宽窄行种植、宽窄行全膜种植方式提高谷子产量的结果不一致^[33-34],这可能与谷子种植地区的无霜期长短和不同的种植方式对谷子农艺性状的改善有关。因此,要根据种植区的生态条件合理选择种植方式。

3.2 种植方式与密度对谷子叶片光合性能的影响

叶片的光合生产能力是作物产量形成的基础^[35],通过合理的栽培措施,可构建合理的作物群体高光效结构^[36]。通过比空带状种植可改善叶面积指数、叶绿素含量、叶向值和透光率^[37],并可改善叶片的光合性能^[38],增强群体的光合能力。本研究表明,处理 P1 较 P2 可有效提高叶片的 SPAD 值、净光合速率、水分利用效率和羧化速率,可实现群体光能和水分的利用,最终使谷子群体产量提升。

密度是决定种植方式高产潜力的重要因素,决定了种植方式条件下的群体大小和群体产量提升^[39]。本研究中,相同种植方式下,随着种植密度的增加其光合性能下降,但是处理 D2 的生育期平均 SPAD 值、净光合速率、水分利用效率和羧化速率与低密度处理 D1 的差异不显著,且 P1 处理改善了 D2 处理下的群体密度效应,通过光热资源的高效利用,改善了谷子在高密度条件下的耐密性,一定程度上提高了 D2 处理条件下的群体抗倒性、群体的光合性能和群体的生产力,可能的原因是 P1 处理使高密度条件下谷子叶片的生长空间加大^[5,40]、田间郁闭环境得到改善^[41],提高了谷子冠层的光能截获^[42]和边行的边际效应^[43],从而提高产量。

4 结 论

比空带状种植和密度协同增加了谷子群体的通风透光性,提高了谷子群体的光合速率、水分利用效率和羧化速率,有效改进了株高、穗长、穗粒数和千粒重,促进了谷子群体产量的提高。因此,比空带状种植(种 2 行空 1 行)和密度 33 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 能更好地利用光热资源,是提高谷子产量的有效栽培方式。

参 考 文 献:

- [1] 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.
YANG J S, GAO H Y, LIU P, et al. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1226-1233.
- [2] 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.
QI H, LIANG Y, ZHAO M, et al. The effects of cultivation ways on population structure of maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(3): 134-139.
- [3] 杜心田,王同朝.作物群体边际效应规律及其应用[J].应用生态学报,1998,(5):28-33.
DU X T, WANG T C. Edge effect law in crop population and its application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, (5): 28-33.
- [4] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等.不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J].作物学报,2008,34(3):447-455.
LV L H, TAO H B, XIA L K, et al. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(3): 447-455.
- [5] 丁相鹏,白晶,张春雨,等.扩行缩株对夏玉米群体冠层结构及产量的影响[J].中国农业科学,2020,53(19):3915-3927.
DING X P, BAI J, ZHANG C Y, et al. Effects of line-spacing expansion and row-spacing shrinkage on population structure and yield of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 3915-3927.
- [6] QU Y, WANG K Z, LUO Y, et al. Plant-type characteristics and seed yield of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) response to plant density[J]. Russian Journal of Agricultural and Socio-economic Sciences, 2020, 98(2): 152-160.
- [7] SONG Q F, ZHANG G L, ZHU X G. Optimal crop canopy architecture to maximise canopy photosynthetic CO_2 uptake under elevated CO_2 —a theoretical study using a mechanistic model of canopy photosynthesis[J]. Functional Plant Biology, 2013, 40(2): 108-124.
- [8] 沈秀瑛,戴俊英,胡安畅,等.玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究[J].作物学报,1993,(3):246-252.
SHEN X Y, DAI J Y, HU A C, et al. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 1993, (3): 246-252.
- [9] 杨利华,张丽华,张全国,等.种植样式对高密度夏玉米产量和株高整齐度的影响[J].Journal of Maize Sciences,2006,14(6):122-124.
YANG L H, ZHANG L H, ZHANG Q G, et al. Effect of row spacing pattern on yield and plant height uniformity in highly-densed summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 122-124.
- [10] LIU T, SONG F, LIU S, et al. Canopy structure, light interception,

- and photosynthetic characteristics under different narrow-wide planting patterns in maize at silking stage[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2011, 9(4): 1249-1261.
- [11] 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.
- XIAO J B, LIU Z, KONG F X, et al. Effects of planting pattern and density on population structure and yield of sorghum[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(22): 4264-4276.
- [12] 张倩,张洪生,宋希云,等.种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响[J].生态学报,2015,35(4):1235-1241.
- ZHANG Q, ZHANG H S, SONG X Y, et al. The effects of planting patterns and densities on photosynthetic characteristics and yield in summer maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1235-1241.
- [13] 李宗新,陈源泉,王庆成,等.密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响[J].生态学报,2012,32(23):7391-7401.
- LI Z X, CHEN Y Q, WANG Q C, et al. Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7391-7401.
- [14] LIU T N, CHEN J Z, WANG Z Y, et al. Ridge and furrow planting pattern optimizes canopy structure of summer maize and obtains higher grain yield[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 242-249.
- [15] FENG L Y, RAZA M A, CHEN Y K, et al. Narrow-wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system[J]. Plos One, 2019, 14(2): e0212885.
- [16] 陈雷,吴继华,范小玉,等.种植方式与密度对高产田夏播花生性状及产量的影响[J].山西农业科学,2017,45(7):1110-1113,1180.
- CHEN L, WU J H, FAN X Y, et al. Effects of sowing method and density on characters and yield of summer peanuts with high yield condition[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(7): 1110-1113, 1180.
- [17] 谭娟,吕晓丽,蔡鑫鑫,等.不同密度和栽培方式对大豆品种黑河50产量及相关农艺性状的影响[J].黑龙江农业科学,2013,(10):20-23.
- TAN J, LV X L, CAI X X, et al. Effect of density and cultivation method on yield and agronomic traits of soybean variety Heihe 50[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013,(10): 20-23.
- [18] WANG F Y, HAN H Y, LIN H, et al. Effects of planting patterns on yield, quality, and defoliation in machine-harvested cotton[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2019-2028.
- [19] 李祥栋,潘虹,陆秀娟,等.不同种植方式与栽培密度对薏苡生长及产量的影响[J].贵州农业科学,2016,44(8):32-35.
- LI X D, PAN H, LU X J, et al. Effects of planting pattern and density on growth and yield of coix[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 32-35.
- [20] 冯小磊,史高雷,张晓磊,等.河套地区种植方式与密度对‘张杂谷19号’产量的影响[J].农学报,2020,10(5):26-30.
- FENG X L, SHI G L, ZHANG X L, et al. Effect of plant pattern and density on yield of hybrid millet ‘ZZG 19’ in Ordos region[J]. Journal of Agriculture, 2020, 10(5): 26-30.
- [21] ANDRADE F H, CALVIÑO P, CIRILO A, et al. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(5): 975-980.
- [22] 刘伟,吕鹏,苏凯,等.种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J].应用生态学报,2010,21(7):1737-1743.
- LIU W, LV P, SU K, et al. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737-1743.
- [23] 张倩,张洪生,赵美爱,等.种植方式对夏玉米光合特性与产量的影响[J].玉米科学,2012,20(5):102-105.
- ZHANG Q, ZHANG H S, ZHAO M A, et al. Effects of cropping patterns on photosynthesis characteristics and yield of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 102-105.
- [24] MEDRANO H, TOMÁS M, MARTORELL S, et al. From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: limitations of leaf WUE as a selection target[J]. The Crop Journal, 2015, 3(3): 220-228.
- [25] PFANZ H, VODNIK D, WITTMANN C, et al. Photosynthetic performance (CO_2 -compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(1): 41-48.
- [26] XUE J, XIE R Z, ZHANG W F, et al. Research progress on reduced lodging of high-yield and -density maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2717-2725.
- [27] 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].农学报,2013,3(8):11-13.
- ZHAO G L, DING G X, LIU T P, et al. Studied on relationship on the sorghum density and yield under different width row space with narrow row space and same row space culture[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(8): 11-13.
- [28] 李会霞,王颖,王玉文,等.不同种植方式对谷子农艺性状和产量的影响[J].陕西农业科学,2018,64(6):50-52.
- LI H X, WANG Y, WANG Y W, et al. Effects of different planting patterns on agronomic characters and yield of millet[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2018, 64(6): 50-52.
- [29] 王根全,王节之,郝晓芬,等.谷子宽窄行种植效果研究[J].陕西农业科学,2015,61(12):8-10,21.
- WANG G Q, WANG J Z, HAO X F, et al. Effect of different width row space with narrow row space on foxtail millet[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(12): 8-10, 21.
- [30] 马宏亮,王秀芳,樊高琼,等.密度对四川丘陵旱地带状种植小麦群体质量、产量及边际效应的影响[J].麦类作物学报,2015,35(11):1551-1557.
- MA H L, WANG X F, FAN G Q, et al. Effect of density on population quality, yield and border effect of stripplanting wheat in Sichuan hilly areas[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(11): 1551-1557.
- [31] 刘启,贾志宽,连延浩,等.沟垄集雨种植模式下谷子种植密度对土壤水分及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):81-87.
- LIU Q, JIA Z K, LIAN Y H, et al. Effects of planting density on water consumption and yield of foxtail millet under ridge-furrow rainfall harvesting planting mode[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 81-87.
- [32] 杭丽,张霞,张瑞,等.留苗密度对谷子晋谷29产量性状的影响[J].湖北农业科学,2018,57(18):14-17,22.
- HANG L, ZHANG X, ZHANG R, et al. Effect of density and plants per hill on yield characters of millet variety Jingu 29[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(18): 14-17, 22.
- [33] 张霞,杭丽.不同种植方式对旱地谷子产量性状影响的分析研究[J].陕西农业科学,2018,64(12):44-46.
- ZHANG X, HANG L. Analysis of effects of different planting patterns on yield traits of dryland millet[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2018, 64(12): 44-46.