

行距、覆反光膜和氮肥对高粱 产量和品质的影响

屈洋¹, 马雯¹, 刘晓婷¹, 薛玉莹¹, 余陇辉²,
王可珍¹, 张永利³, 高小丽⁴, 冯佰利⁴

(1. 宝鸡市农业科学研究院, 陕西 岐山 722499; 2. 陇县农业技术推广服务中心, 陕西 陇县 721200;
3. 陕西西凤酒股份有限公司, 陕西 柳林 716009; 4. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以‘辽杂52’高粱为试验材料,于2021—2022年采用三因素裂区设计进行田间试验,主区为种植行距:50 cm(A₁)、60 cm(A₂);裂区为是否覆反光膜:不覆反光膜(B₁)、覆反光膜(B₂);裂裂区为氮肥施用量:150 kg·hm⁻²(C₁)、300 kg·hm⁻²(C₂)、450 kg·hm⁻²(C₃),探究不同处理对高粱光合参数、产量和籽粒品质的影响。结果表明:行距增加可提高高粱抽穗期、灌浆期和蜡熟期的叶片SPAD值和P_n,覆反光膜和施氮能提高高粱各生育时期的叶片SPAD值和P_n。行距60 cm较行距50 cm处理高粱产量年均增加5.12%,覆反光膜较不覆反光膜处理高粱产量年均增加7.73%,高氮(450 kg·hm⁻²)水平下高粱产量最高(年均6 807.0 kg·hm⁻²),较其他施氮水平增加3.90%~9.48%。行距增加和覆反光膜使高粱籽粒蛋白质含量分别提高6.94%和2.84%,高氮肥水平下籽粒蛋白质含量较其余施氮处理平均提高2.50%;行距增加和覆反光膜处理下高粱籽粒淀粉含量分别提高1.75%和0.70%,高氮肥水平下籽粒淀粉含量较其余施氮处理平均提高3.85%。综上所述,行距60 cm、覆反光膜和拔节期追施氮肥450 kg·hm⁻²处理能更好地利用光热资源、改善叶片光合性能,是提高关中西部地区高粱产量和籽粒品质的有效栽培方式。

关键词:高粱;种植行距;覆反光膜;氮肥;产量;品质

中图分类号:S514; S3 **文献标志码:**A

Effects of row spacing, reflective film mulching and nitrogen fertilizer on sorghum yield and quality

QU Yang¹, MA Wen¹, LIU Xiaoting¹, XUE Yuying¹, YU Longhui²,
WANG Kezhen¹, ZHANG Yongli³, GAO Xiaoli⁴, FENG Baili⁴

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

2. Longxian Agricultural Technology Extension Service Center, Longxian, Shaanxi 721200, China;

3. Shaanxi Xifeng Liquor Co. Ltd., Liulin, Shaanxi 716009, China;

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

Abstract: A field experiment on the sorghum variety ‘Liaozha 52’ was conducted in 2021–2022 to investigate the effects of row spacing, reflective film mulching, and nitrogen fertilizer on its photosynthetic characteristics, yield, and quality. The experiment used a three-factor split-plot design with varying row spacings (50 cm for A₁ and 60 cm for A₂), reflective film treatments (no mulching for B₁ and mulching for B₂), and nitrogen fertilizer levels (150 kg·hm⁻² for C₁, 300 kg·hm⁻² for C₂, and 450 kg·hm⁻² for C₃). The results showed that experimental factors and their interaction effect had the significant effect on sorghum yield ($P<0.05$). The row spacing of 60 cm yield increased by 5.12% than that of row spacing of 50 cm, yield of reflective film mulching increased by 7.73% than that of no reflective film mulching, and C₃ yield was the highest with 6 807.0 kg·hm⁻² and increased by

收稿日期:2024-03-01

修回日期:2024-05-21

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-40;2022QFY02-0);国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06-13.5-A22);陕西省小杂粮产业技术体系(2024)

作者简介:屈洋(1983-),男,辽宁北镇人,农艺师,主要从事作物育种及高效栽培研究。E-mail:man2019@163.com

通信作者:王可珍(1964-),女,陕西眉县人,正高级农艺师,主要从事作物育种及栽培研究。E-mail:kezhen9859@163.com

3.90%~9.48% than that of others. Experimental factors and their interaction had the significant effect on the SPAD value and P_n of sorghum leaf. Enlarge row spacing increased the SPAD value and P_n of the sorghum leaf in the heading stage, postulation stage, and dough stage, and reflective film mulching, and nitrogen fertilizer increased the SPAD value and P_n of the sorghum leaf in the tested stage. Enlarge row spacing and reflective film mulching increased sorghum seed protein content by 6.94% and 2.84%, respectively. Sorghum seed protein content of C_3 was increased by 2.50% than that of others. Enlarge row spacing and reflective film mulching increased sorghum seed starch content by 1.75% and 0.70%, respectively. Sorghum seed starch content of C_3 was increased by 3.85% than that of others. However, increased row spacing, the use of reflective film mulching, and nitrogen fertilizer resulted in a reduction in the fat content of sorghum seeds. A row spacing of 60 cm, reflective film mulching, and the application of nitrogen fertilizer at $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the elongation stage proved to be an effective cultivation combination for enhancing both yield and seed quality. This was achieved through more efficient use of light and temperature, as well as improved photosynthetic performance of sorghum leaves.

Keywords: sorghum; row spacing; reflective film mulching; nitrogenous fertilizer; yield; quality

高粱是我国重要的酿酒原料,主要种植于东北、西北和西南地区,在区域特色农业发展中具有重要地位^[1]。近年来,增加种植密度成为提升作物单产的主要措施,但种植密度过大易导致作物群体田间郁闭,太阳总辐射量下降^[2],在高密度群体下实现光能的充分利用成为进一步提高高粱单产的关键。因此,探究高密度种植条件下行距配置、肥料配施和光资源的有效协同对高粱生产具有重要的指导意义。

光照对作物的生长发育至关重要^[3],它是叶片光合作用的主要驱动力,光照时间、光照强度和光合面积均可显著影响叶片光合速率,进而影响高粱产量和品质^[4]。高粱是 C_4 作物,生育期间需要充足的光照满足其生长发育的需求^[5]。覆反光膜是农田增光的有效途径,可显著提高果实的商品性和品质,已被广泛应用于柑橘^[6]、葡萄^[7]和苹果^[8]等果树生产上。种植密度是作物产量形成的基础^[9],高密度条件易使田间通风透光性变差^[10],导致个体发育不良,造成倒伏^[11]。合理的种植密度和行距配置有利于构建良好的作物冠层和群体结构,尤其是在高密度条件下,宽行距可减轻作物群体的田间郁闭,增加农田的通风透光性^[12],提高个体的抗逆能力,使光在作物群体内分布更科学合理,最终形成高产群体。氮肥是促进高粱正常生长的重要物质基础^[13-14],施氮可提高高粱的生物产量、光合效率和干物质积累量,同时能改善其农艺性状和籽粒品质^[15-16],尤其在高密度种植条件下,追施氮肥是高粱促花增粒的重要措施^[17-18]。

前人多对高粱的种植密度^[19]、行距配置^[20]和氮肥^[21]开展了单因素或二因素互作等方面的研究,关于种植密度、行距配置和氮肥的三因素互作对高

粱产量和品质影响的报道尚不多见。因此,本研究通过覆反光膜对高粱群体光资源进行调控,探讨高密度条件下行距配置、覆反光膜和氮肥配施对高粱净光合速率、产量和籽粒品质的影响及调控效应,明确高粱高产栽培的最优配置,以期为关中西部高粱生产提供理论参考和技术实践。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021—2022年在宝鸡市农业科学研究院岐山县刘家塬试验基地($107^{\circ}39' \text{ E}$, $34^{\circ}27' \text{ N}$,海拔669.6 m)进行。该区属大陆性季风半湿润气候,四季冷暖干湿分明,年均日照2 066.6 h,年均气温 11.9°C ,年均降水631.4 mm,年均无霜期209 d。供试土壤为黏壤土,耕层(0~20 cm)土壤有机质 $18.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $75.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $19.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $171.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH值8.55。

1.2 试验材料及试验设计

1.2.1 试验材料 参试高粱品种为‘辽杂52’,属中矮秆品种,由辽宁省农业科学院高粱所提供。银灰色反光地膜(反光率90%)和氮肥(尿素,含氮量46.4%)为市场购买。

1.2.2 试验设计 试验采用裂区设计,随机区组排列,主区为种植行距(A):行距50 cm(A_1)、行距60 cm(A_2);裂区为覆膜方式(B):不覆反光膜(B_1)、覆反光膜(B_2);裂裂区为氮肥施用量(C):追施尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (低氮, C_1)、追施尿素 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (中氮, C_2)、追施尿素 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (高氮, C_3)。试验共12个处理,各处理设3次重复,共计36个小区,小区面积 13.5 m^2 ($3.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$),种植密度为

13.5 万株·hm⁻²,较当地常规种植密度 12.0 万株·hm⁻²增加 12.5%。

2021 年和 2022 年中,高粱分别于 4 月 28 日和 5 月 5 日播种,8 月 25 日和 9 月 1 日收获。播前结合整地,各处理基施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=27:8

:5)750 kg·hm⁻²。高粱 5~7 叶期定植到留苗密度,各处理于拔节期分别按设定量追施尿素,随后在行间覆反光膜。全生育期间无灌溉,其他田间管理方式同当地大田。2021—2022 年高粱生长季(播种期~收获期)有效降水和日均气温见图 1。

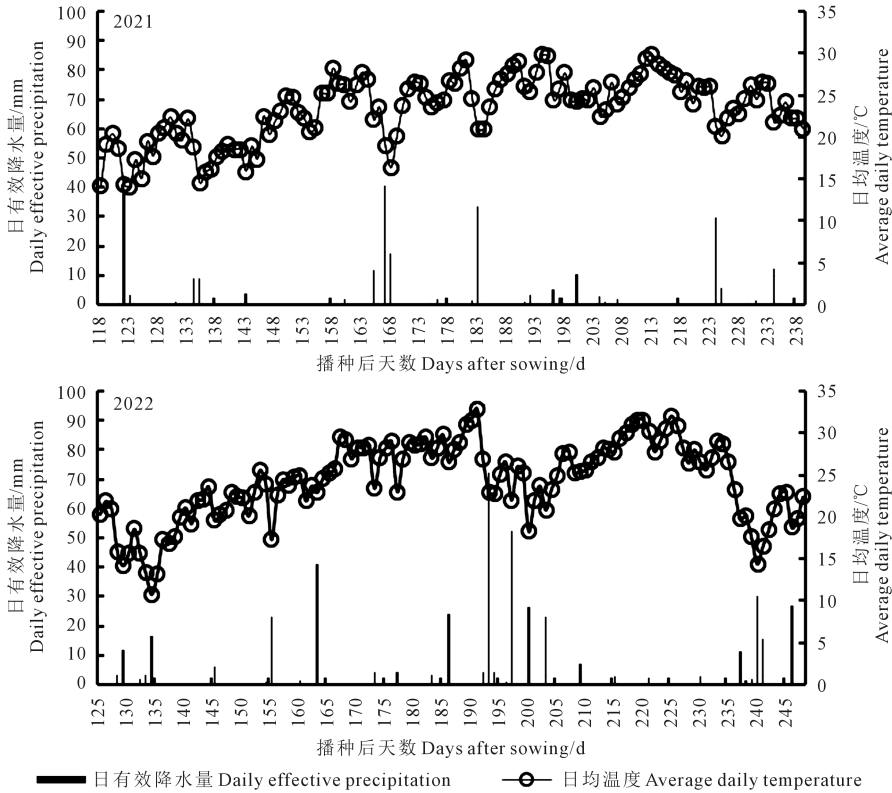


图 1 2021—2022 年高粱生育期日均温度和日有效降水量

Fig.1 Average daily temperature and daily effective precipitation during sorghum growth period in 2021 and 2022

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片叶绿素相对含量(SPAD 值) 分别于高粱喇叭口期、抽穗期、灌浆期和蜡熟期从各小区选取 5 株生长发育一致、叶片无破损的代表性植株,利用日产 SPAD-502plus 叶绿素仪测定高粱冠层上部(上数第 2 片叶)叶片中部的叶绿素相对含量,每个叶片测量 3 次,取平均值。

1.3.2 叶片净光合速率(P_n) 分别于高粱喇叭口期、抽穗期、灌浆期和蜡熟期从各小区选择 3 株生长发育一致、叶片无破损的代表性植株,选择晴朗无云天气,在 9:00—11:00 利用便携式光合测定系统(TARGAS-1,美国,内置光源设定为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)测定高粱冠层上部(上数第 2 片叶)叶片中部净光合速率(P_n),每个叶片测量 3 次,取平均值。

1.3.3 籽粒产量 高粱成熟后,各小区全区收获计产,籽粒产量按含水量 13%计算。

1.3.4 籽粒品质 高粱籽粒的粗蛋白质含量、粗脂肪含量和淀粉含量采用多功能全光谱近红外光谱

分析仪(DA7250,波通瑞华科学仪器有限公司,瑞典)进行测定,随机选取 3 次定量样品(小样品盘 44 cm²),每个样品测量 3 次,取平均值。

1.4 数据处理

采用 Microsoft excel 2016 进行数据处理及图表制作,DPS 7.05 进行差异显著性检验(Duncan 法)、多元线性回归分析和统计标准回归系数。

2 结果与分析

2.1 不同处理对高粱产量的影响

由表 1 可知,行距、覆反光膜和氮肥均可显著影响高粱产量($P<0.05$),除覆反光膜×氮肥对 2021 年产量无显著影响外,其余双因素交互及三因素交互均对两个年份高粱产量有显著影响。2021 年和 2022 年, A₂ 处理较 A₁ 处理的高粱产量分别提高 2.93%和 7.31%,年均增加 5.12%; B₂ 处理较 B₁ 处理产量分别提高 6.89%和 8.56%。高粱产量随氮肥施用量的增加而增加,2021—2022 年中 C₃ 处理高粱产

量均值分别为 $6\ 702.9\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6\ 911.1\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较其余施氮水平显著提高 $3.90\% \sim 9.48\%$ ($P < 0.05$)。不同处理间产量存在较大差异, 其中均以 $A_2B_2C_3$ 处理产量最高, 两年分别达到 $7\ 143.49\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $7\ 281.42\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较其他处理显著提高 $4.07\% \sim 40.41\%$ ($P < 0.05$)。由图 2 可知, 行距、覆反光膜、氮肥与产量的标准回归系数均为正值, 两年均值分别为 0.38、0.61、0.59。

表 1 不同处理对高粱产量的影响/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 Sorghum yield of different treatments

行距 Row ledge	覆膜方式 Mulching pattern	氮肥 N fertilizer	2021	2022
A ₁	B ₁	C ₁	6027.70±301.39h	5185.93±259.30h
		C ₂	6151.22±307.56fg	6061.36±303.07g
		C ₃	6472.37±323.62d	6686.68±334.33cd
	B ₂	C ₁	6348.85±317.44e	6419.88±320.99ef
		C ₂	6571.19±328.56cd	6820.08±341.00bcd
		C ₃	6670.00±333.50bc	6936.80±346.84bc
A ₂	B ₁	C ₁	6093.58±304.68gh	6405.98±320.30f
		C ₂	6237.69±311.88ef	6802.01±340.10bcd
		C ₃	6525.90±326.30d	6739.48±336.97cd
	B ₂	C ₁	6587.65±329.38cd	6670.00±333.50de
		C ₂	6772.93±338.56b	6996.55±349.83b
		C ₃	7143.49±357.17a	7281.42±364.07a
方差 分析 Variance analysis	A		*	*
	B		**	**
	C		**	**
	A×B		**	**
	A×C		*	**
	B×C		ns	**
A×B×C		*	**	

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); ns 表示不显著, * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns indicate non-significant differences, * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same below.

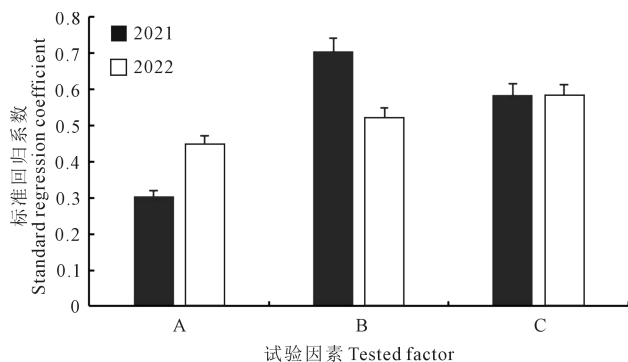


图 2 试验因素与产量的标准回归系数

Fig.2 Standard regression coefficient between yield and tested factors

2.2 不同处理对高粱叶片 SPAD 和 P_n 的影响

2.2.1 不同处理对高粱叶片 SPAD 的影响 由表 2 可知, 行距、覆反光膜、氮肥及其互作对高粱大喇叭口期和抽穗期叶片的 SPAD 值有显著影响, 随生育期推进, 各因素对 SPAD 值的影响逐渐减弱。2021 年, 增加行距可提高抽穗期、灌浆期和蜡熟期的叶片 SPAD 值, A_2 处理较 A_1 处理分别增加 3.26% 、 2.16% 和 1.37% , 抽穗期与蜡熟期差异达显著水平 ($P < 0.05$); 2022 年, 行距增加提高了四个时期叶片的 SPAD 值, 增幅分别为 0.89% 、 3.16% 、 1.14% 和 4.12% , 抽穗期和蜡熟期差异达显著水平 ($P < 0.05$)。2021—2022 年, 覆反光膜较不覆反光膜可提高高粱各生育时期的叶片 SPAD 值, 其中处理间在 2021 年大喇叭口期、抽穗期、蜡熟期以及 2022 年大喇叭口期、灌浆期差异显著 ($P < 0.05$)。随氮肥施用量的增加, 高粱叶片 SPAD 值逐渐增加, 2021 年 4 个时期高氮水平的叶片 SPAD 均值分别为 51.53 、 59.38 、 62.14 和 54.86 , 2022 年 SPAD 均值分别为 47.93 、 55.73 、 60.84 和 53.88 , 均显著高于其他施氮处理 ($P < 0.05$)。不同处理间各时期叶片 SPAD 值存在较大差异, 其中 $A_2B_2C_3$ 处理两个年份各时期 SPAD 均值最高, 均值分别为 58.72 和 55.91 , 较其他处理显著提高 $1.71\% \sim 13.93\%$ ($P < 0.05$)。此外, 行距、覆反光膜和氮肥与生育期叶片平均 SPAD 值的标准回归系数均为正值, 两年均值分别为 0.26 、 0.49 和 0.78 (图 3)。

2.2.2 不同处理对高粱叶片 P_n 的影响 由表 3 可知, 行距、覆反光膜、氮肥及其互作对高粱各生育时期叶片的 P_n 存在显著影响 (除 2022 年 $A \times B$ 互作外)。增加行距可提高两年 4 个时期高粱叶片 P_n 值, 2021 年 A_2 处理较 A_1 处理分别显著提高 19.97% 、 4.79% 、 10.65% 和 3.97% ($P < 0.05$), 2022 年分别显著提高 25.20% 、 5.80% 、 6.49% 和 4.59% ($P < 0.05$)。2021 年和 2022 年, 覆反光膜均能提高各时期的叶片 P_n 值, 较不覆膜处理增加 $10.13\% \sim 11.12\%$ 。随氮肥施用量的增加, 高粱叶片 P_n 值逐渐增加, 2021 年 C_3 处理下 4 个时期的叶片 P_n 值分别为 28.95 、 31.18 、 24.70 、 $15.61\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 与其他处理差异显著 ($P < 0.05$); 2022 年 C_3 处理下各时期高粱叶片的 P_n 均值为 $27.88\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 与其他处理差异显著 ($P < 0.05$)。不同处理间各时期叶片 P_n 值存在较大差异, 其中 $A_2B_2C_3$ 处理两年各时期平均 P_n 值最高, 分别为 $27.09\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $29.48\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 较其他处理显著提高 $2.83\% \sim 36.68\%$ ($P < 0.05$)。此外, 行距、覆反光膜和氮肥与生育期叶片平均 P_n 值的标准回归系数均为正值, 两年均值分别为 0.65 、 0.39 和 0.62 (图 4)。

2.3 不同处理对高粱籽粒品质的影响

由表4可知,行距、覆反光膜、氮肥及其互作对高粱籽粒蛋白质含量和脂肪含量均有显著影响,各因素对淀粉含量的影响存在差异,除覆反光膜对2022年淀粉含量、行距×覆反光膜对两年淀粉含量影响不显著外,其余因素及其互作效应显著($P<0.05$)。行距增加条件下,2021年和2022年高粱籽粒蛋白质含量分别显著提高4.48%和9.41% ($P<0.05$); B_2 处理较 B_1 处理两年籽粒蛋白质含量分别显著增加2.23%和3.44% ($P<0.05$)。随氮肥施用量的增加,籽粒蛋白质含量逐渐增加,2021年和2022年 C_3 处理籽粒蛋白质含量分别为12.23%和12.99%,较其他处理显著提高1.75%~3.24% ($P<0.05$)。不同处理间籽粒蛋白质含量存在差异,两年均以 $A_2B_2C_3$ 处理最高,分别为12.84%和13.71%,较其他处理显著提高0.22%~14.25% ($P<0.05$)。同时,行距、覆反光膜和氮肥与籽粒蛋白质含量的标准回归系数均为正值且年际间存在差异,两年均值分别为0.81、0.35和0.34(图5)。

由表4可知,2021年和2022年,行距增加条件下高粱籽粒淀粉含量分别提高1.88%和2.32% ($P<0.05$), B_2 处理籽粒淀粉含量较 B_1 处理分别增加1.10%和0.30% ($P<0.05$)。随氮肥施用量的提高,籽粒淀粉含量呈增加趋势,2021年和2022年 C_3 处理高粱籽粒淀粉含量分别为68.75%和58.79%,较其他处理显著提高1.95%~3.72% ($P<0.05$)。不同

处理间高粱籽粒淀粉含量存在差异,两年均为 $A_2B_2C_3$ 处理淀粉含量最高,分别为70.10%和59.86%,较其他处理显著提高0.64%~11.80% ($P<0.05$)。同时,行距、覆反光膜和氮肥与籽粒淀粉含量的标准回归系数均为正值且年际间存在差异,两年均值分别为0.47、0.12和0.81(图6)。

由表4可知,2021年和2022年,行距增加条件下高粱籽粒脂肪含量分别显著降低7.92%和0.79% ($P<0.05$), B_2 处理籽粒脂肪含量较 B_1 处理分别降低8.15%和7.51% ($P<0.05$)。随氮肥施用量的增加,高粱籽粒脂肪含量有所降低,2021年和2022年高氮肥水平下脂肪含量分别为3.51%和4.50%,较其他处理显著提高2.67%~3.84% ($P<0.05$)。不同处理间籽粒脂肪含量存在差异,两年均为 $A_1B_1C_3$ 处理最高,分别为3.98%和4.86%,较其他处理显著提高0.21%~31.35% ($P<0.05$)。同时,行距、覆反光膜和氮肥与籽粒脂肪含量的标准回归系数均为负值且年际间存在差异,两年均值分别为-0.30、-0.63和-0.24(图7)。

3 讨论

3.1 行距、覆反光膜和施用氮肥对高粱产量的影响

增加种植密度是提高作物单产最有效的措施,但高密度条件下株行距配置不合理会导致田间通风透光差,作物群体光照不足,最终影响产量形成^[22]。本试验中,在种植密度13.5万株· hm^{-2} 条件下,产

表4 不同处理高粱籽粒的品质特性/%
Table 4 Sorghum quality traits of different treatments

行距 Row ledge	覆膜方式 Mulching pattern	氮肥 N fertilizer	2021			2022		
			蛋白质 Protein	淀粉 Starch	脂肪 Fat	蛋白质 Protein	淀粉 Starch	脂肪 Fat
A_1	B_1	C_1	11.49±0.57h	62.70±3.13j	3.88±0.19c	12.00±0.60j	56.85±2.84e	4.74±0.24c
		C_2	11.76±0.59g	66.04±3.30f	3.95±0.20b	12.12±0.61h	56.93±2.85e	4.85±0.24a
		C_3	11.75±0.59g	67.77±3.39d	3.98±0.20a	12.15±0.61g	57.77±2.89cd	4.86±0.24a
	B_2	C_1	11.86±0.59f	63.30±3.16i	3.74±0.19d	12.05±0.60i	56.44±2.82f	4.46±0.22e
		C_2	11.81±0.59g	66.75±3.34e	3.62±0.18e	12.17±0.61g	57.81±2.89cd	4.27±0.21f
		C_3	11.92±0.60f	68.42±3.42c	3.29±0.16h	12.75±0.64e	58.05±2.90c	4.20±0.21g
A_2	B_1	C_1	11.92±0.60f	63.59±3.18h	3.55±0.18f	12.54±0.63f	57.74±2.89cd	4.48±0.22e
		C_2	12.05±0.60e	67.71±3.39d	3.38±0.17g	13.24±0.66d	58.55±2.93b	4.70±0.24d
		C_3	12.41±0.62b	68.71±3.44b	3.75±0.19d	13.34±0.67c	59.48±2.97a	4.71±0.24cd
	B_2	C_1	12.22±0.61d	64.44±3.22g	3.61±0.18e	13.62±0.68b	57.42±2.87d	4.82±0.24b
		C_2	12.31±0.62c	67.85±3.39d	3.37±0.17g	13.68±0.68a	58.77±2.94b	4.25±0.21f
		C_3	12.84±0.64a	70.10±3.51a	3.03±0.15i	13.71±0.69a	59.86±2.99a	4.22±0.21g
方差分析 Variance analysis	A		**	**	**	**	**	*
	B		**	**	**	**	ns	**
	C		**	**	**	**	**	**
	A×B		**	ns	**	**	ns	**
	A×C		**	**	**	**	**	**
	B×C		**	**	**	**	**	**
	A×B×C		**	**	**	**	*	**

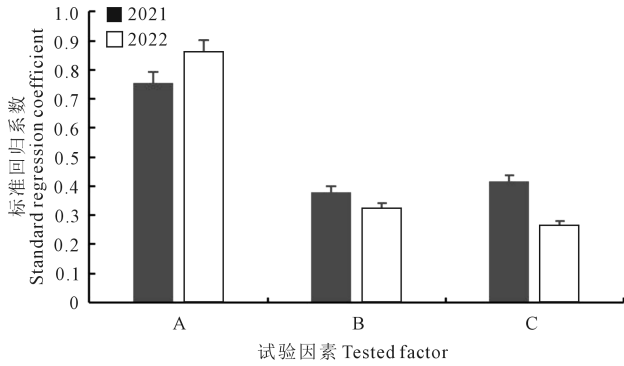


图 5 试验因素与籽粒蛋白质含量的标准回归系数

Fig.5 Standard regression coefficient between the protein content and tested factors

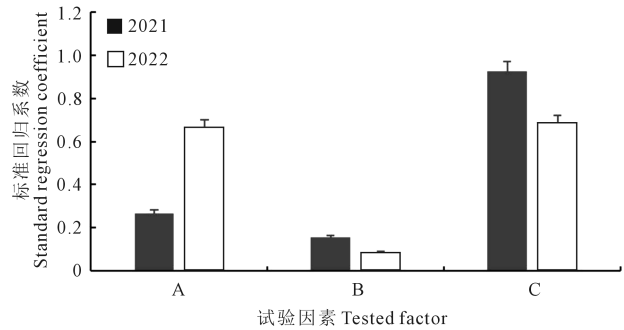


图 6 试验因素与籽粒淀粉含量的标准回归系数

Fig.6 Standard regression coefficient between the starch content and tested factors

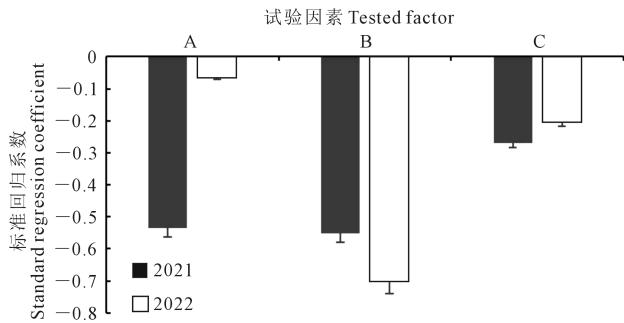


图 7 试验因素与籽粒脂肪含量的标准回归系数

Fig.7 Standard regression coefficient between the fat content and tested factors

量随行距的增加而显著增加,行距 60 cm 较行距 50 cm 处理产量平均提高 5.12%,这一结果与李树锋等^[23]在贵州正安县开展的宽窄行(70 cm+40 cm)较等行距种植(60 cm)处理高粱增产 6.03%的研究结果基本一致。地膜覆盖具有增温保墒、提高产量的作用,在旱地作物生产中较为普遍^[24]。研究表明,覆反光膜可通过提高玉米的干物质积累量从而提高其产量^[25]。本研究将反光膜应用于高粱栽培,结果表明覆反光膜较不覆反光膜处理高粱产量平均提高 7.73%,这一结果与白晶等^[25]在黄淮海区域的研究结果基本一致。氮肥对高粱生长具有重要

影响,合理施用氮肥可增加生育期干物质量,促进穗粒数和千粒重提高,最终提升高粱产量^[26]。本试验中,随着氮肥施用量的增加,高粱产量逐渐提高,450 kg·hm⁻²施用量处理产量最高。苏富源等^[27]在宁夏中卫的研究也表明,甜高粱产量随氮肥施用量的增加而增加,施氮 300 kg·hm⁻²时较不施氮增产 61.4%。本研究中,行距、覆反光膜和氮肥 3 个因素与产量的标准回归系数均为正值且年际间存在差异,说明行距增加、覆反光膜和施用氮肥对高粱产量的影响均是正向的,且受年际间气候因素的作用,产量对这些因素的响应存在差异。行距 60 cm、覆反光膜和拔节期追施 450 kg·hm⁻²尿素处理更有利于高粱产量形成。

3.2 行距、覆反光膜和施用氮肥对高粱光合性能的影响

行距配置会影响作物的冠层结构和群体的光环境,从而影响作物叶片的光合性能,合理的行距配置可提高叶片的净光合速率、叶面积指数、光合有效辐射截获率^[28]。本试验发现,行距增加提高了高粱叶片抽穗期、灌浆期和蜡熟期的 SPAD 值和 P_n ,说明在 13.5 万株·hm⁻²种植条件下扩大行距有利于改善高粱群体的光合性能,这与丁相鹏等^[28]玉米高密度(82 500 株·hm⁻²)种植条件下行距 80 cm 可构建高效光合群体结构的研究结果基本一致。研究表明,覆反光膜可通过调整作物群体内部的光照环境,提高叶片的蒸腾速率和气孔导度,从而改善作物的光合性能^[26,29]。本试验中,覆反光膜能提高高粱各生育时期的叶片 SPAD 值和 P_n ,说明覆反光膜有效改善了高粱群体的光合环境,提高了群体光合能力。氮肥可改善高粱叶片的光合特性,从而影响高粱的生长发育^[30]。本研究发现,随施氮量的增加,不同生育时期高粱叶片的 SPAD 值和 P_n 均呈增加趋势,说明生育期追施氮肥可有效改善高粱叶片的光合参数,提高高粱叶片的光合能力。行距、覆反光膜和氮肥与高粱叶片的 SPAD 值和 P_n 的标准回归系数均为正值且年际间存在差异,说明行距增加、覆反光膜和施用氮肥对高粱叶片的光合性能具有积极的影响且受环境因素的制约,其中行距 60 cm、覆反光膜和拔节期追施 450 kg·hm⁻²尿素处理对高粱叶片光合性能的改善效果最佳。

3.3 行距、覆反光膜和施用氮肥对高粱籽粒品质的影响

适当扩大行距有利于作物光合作用,从而提高作物籽粒的产量和品质^[31]。张国兵等^[20]研究发现,合理增加行距可使酒用糯高粱籽粒淀粉含量和

蛋白质含量增加。本研究表明,增加行距后,高粱籽粒的淀粉含量和蛋白质含量增加,但脂肪含量降低,说明合理增加行距可有效改善高粱籽粒品质,但是不同品质指标对行距增加的响应存在差异,其中,淀粉和蛋白质含量对行距增加的响应是积极的,但是脂肪含量对行距增加的响应是消极的,相关机制有待进一步研究。覆反光膜可改善作物的光合能力,优化作物籽粒品质^[26]。本研究中,覆反光膜提高了高粱籽粒的淀粉含量和蛋白质含量,降低了籽粒脂肪含量,说明覆反光膜对高粱籽粒品质具有一定的改善作用,尤其是对蛋白质含量改善效果更佳。研究表明,氮肥是影响高粱籽粒品质形成的关键因子,合理施用氮肥可提高高粱的生物量和籽粒粗蛋白含量^[32-33]。本研究也表明,随氮肥施用量增加,高粱籽粒蛋白质含量和淀粉含量增加,这与曹晓燕等^[34]在盆栽条件下的研究结果一致,但与王劲松等^[35]高肥力土壤条件下施用氮肥降低高粱籽粒淀粉含量的研究结果存在差异,可能是单一施肥和氮磷钾配施对高粱籽粒品质的作用方式不同所致。行距、覆反光膜和氮肥与高粱籽粒蛋白质含量和淀粉含量的标准回归系数均为正值,但3个因素与高粱籽粒脂肪含量的标准回归系数为负值,说明行距增加、覆反光膜和施氮对高粱籽粒品质具有重要影响,但不同品质指标对试验因素互作的反应以及年际间的响应存在差异,可能是高粱籽粒品质受到试验因素和环境要素的双重影响导致的,其内在机制还有待进一步探究。

4 结 论

高粱的叶片净光合速率、叶绿素相对含量及籽粒产量、品质受种植行距、是否覆反光膜和氮肥施用量的共同作用,宽行距(60 cm)、覆反光膜和追施高量氮肥(450 kg·hm⁻²)可显著增加高粱生育期叶片的叶绿素相对含量和净光合速率,同时提高籽粒产量和改善籽粒品质。其中,行距60 cm较行距50 cm处理籽粒产量年均提高5.12%,蛋白质含量和淀粉含量分别提高6.95%和2.10%;覆反光膜较不覆反光膜处理产量年均提高7.73%,蛋白质含量和淀粉含量分别提高2.84%和0.70%;拔节期追施氮肥450 kg·hm⁻²年均产量达6 807.00 kg·hm⁻²,较低量施氮处理提高9.48%,蛋白质含量和淀粉含量分别提高3.24%和3.71%。在13.5万株·hm⁻²种植密度条件下,行距60 cm、覆反光膜和拔节期追施尿素450 kg·hm⁻²的栽培措施可有效提升关中西部地区高粱的产量和品质。

参 考 文 献:

- [1] 屈洋, 张飞, 王可珍, 等. 黄淮西部高粱籽粒产量与品质对气候生态条件的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3242-3257.
QU Y, ZHANG F, WANG K Z, et al. Response of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) moench) yield and quality to climatic and ecological conditions on the west Yellow-Huaihe-Haihe rivers plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(18): 3242-3257.
- [2] 陶苏林, 戚易明, 申双和, 等. 中国1981-2014年太阳总辐射的时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 143-147.
TAO S L, QI Y M, SHEN S H, et al. The spatial and temporal variation of solar radiation over China from 1981 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 143-147.
- [3] 刘仲发, 勾玲, 赵明, 等. 遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(4): 91-96.
LIU Z F, GOU L, ZHAO M, et al. Effects of shading on stalk morphological characteristics, rind penetration strength and lodging-resistance of maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(4): 91-96.
- [4] 屈洋, 马雯, 王可珍, 等. 种植密度、微肥和复合肥对高粱产量、品质及光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(21): 12-18.
QU Y, MA W, WANG K Z, et al. Effects on photosynthetic capacity, yield, and quality of sorghum: planting density, micro-fertilizer and compound fertilizer[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(21): 12-18.
- [5] 王东欣, 宋佳明, 王令强, 等. 甜高粱与高粱的多组学比较分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2022, 41(9): 1938-1951.
WANG D X, SONG J M, WANG L Q, et al. Multi-omics analysis of sweet sorghum and sorghum (*Sorghum bicolor*) [J]. Genomics and Applied Biology, 2022, 41(9): 1938-1951.
- [6] 余伟. 光环境对柑桔果实品质及成熟期的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(20): 5248-5248.
YU W. Research on the influence of light on orange quality and maturity period[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(20): 5248-5248.
- [7] 刘林, 许雪峰, 王忆, 等. 不同反光膜对设施葡萄果实糖分代谢与品质的影响[J]. 果树学报, 2008, 25(2): 178-181.
LIU L, XU X F, WANG Y, et al. Effect of different reflecting films on berry quality and sucrose metabolism of grape in greenhouse [J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(2): 178-181.
- [8] 闵艳娥, 李都鸽, 李洁. 苹果着色期管理技术要点[J]. 西北园艺(综合), 2020, (9): 34-35.
MIN Y E, LI D G, LI J. Technical essential in colour stage of apple [J]. Northwest Horticulture, 2020, (9): 34-35.
- [9] 薛吉全, 张仁和, 马国胜, 等. 种植密度、氮肥和水分胁迫对玉米产量形成的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 1022-1029.
XUE J Q, ZHANG R H, MA G S, et al. Effects of plant density, nitrogen application, and water stress on yield formation of maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(6): 1022-1029.
- [10] 莫绵江. 不同栽培密度对高粱产量影响[J]. 耕作与栽培, 2014, (6): 36, 41.
MO M J. Effect of different planting density on yield of sorghum [J]. Tillage and Cultivation, 2014, (6): 36, 41.
- [11] 李文龙, 李喜焕, 王瑞霞, 等. 河北省夏播早熟区不同施肥水平

- 和种植密度对大豆产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2015, (3): 40-44.
- LI W L, LI X H, WANG R X, et al. Effects of different fertilizer levels and planting densities on yield and quality of soybean in early mature soybean region of Hebei[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, (3): 40-44.
- [12] MATTERA J, ROMERO L A, CUATRÍN A L, et al. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing [J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 87-95.
- [13] 周开芳, 范贵国. 氮磷钾不同配比对高粱产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2003, 31(增刊1): 65-67.
- ZHOU K F, FAN G G. Effects of different applying combination of N, P and K fertilizers on Chinese sorghum yield[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2003, 31(S1): 65-67.
- [14] 郭立君, 彭志红, 郑建军, 等. “种, 肥一体”模式下氮肥运筹对高粱种植效益的影响[J]. 湖南农业科学, 2022, (7): 18-21.
- GUO L J, PENG Z H, ZHENG J J, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on sorghum planting benefit in the mode of “integration of seed and fertilizer”[J]. Human Agricultural Sciences, 2022, (7): 18-21.
- [15] 王媛, 王劲松, 董二伟, 等. 长期施用不同剂量氮肥对高粱产量、氮素利用特性和土壤硝态氮含量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 342-350.
- WANG Y, WANG J S, DONG E W, et al. Effects of long-term nitrogen fertilization with different levels on sorghum grain yield, nitrogen use characteristics and soil nitrate distribution[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(2): 342-350.
- [16] 王洪预, 崔正果, 伍舒悦, 等. 氮磷钾肥料配施对粒用高粱籽粒产量的影响[J]. 东北农业科学, 2018, 43(3): 1-4.
- WANG H Y, CUI Z G, WU S Y, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on yield of sorghum[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(3): 1-4.
- [17] 杨漪璇, 屈忠义, 杨威, 等. 氮肥和有机肥配施对盐碱地酿酒高粱生长、氮素利用效率及土壤 N₂O 排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 116-127.
- YANG Y X, QU Z Y, YANG W, et al. Effects of combined application of nitrogen fertilizer and organic fertilizer on the growth, nitrogen use efficiency of brewing sorghum and soil N₂O emission in saline-alkali land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 116-127.
- [18] 肖继兵, 刘志, 崔丽华, 等. 辽西土壤养分供应能力与高粱施肥推荐[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (6): 81-85, 92.
- XIAO J B, LIU Z, CUI L H, et al. Soil nutrients supply capacity and recommended fertilization for sorghum in Liaoxi area [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2016, (6): 81-85, 92.
- [19] 魏忠丽. 黔西县雨朵镇高粱不同栽植密度对比试验[J]. 农业装备技术, 2021, 47(3): 27-28.
- WEI Z L. Comparative experiment of different planting densities of sorghum in Yuduo Town, Qianxi county[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2021, 47(3): 27-28.
- [20] 张国兵, 汪灿, 周棱波, 等. 不同株行距配置对酒用糯高粱红梁丰1号农艺性状、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 76-79.
- ZHANG G B, WANG C, ZHOU L B, et al. Effects of different row spacing on agronomic characters, yield and quality of Hongliangfeng No.1 glutinous sorghum used for wine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 76-79.
- [21] 梁晓红, 刘静, 曹雄. 施氮量对酿造高粱产量和氮素利用率的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(2): 179-184.
- LIANG X H, LIU J, CAO X. Effects of nitrogen application rate on yield of brewing sorghum and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agronomica Boreali-Sinica, 2017, 32(2): 179-184.
- [22] 何爱萍, 贺玉梅, 周龙祥, 等. 行距配置与密度对小麦产量及产量结构的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(2): 29, 84.
- HE A P, HE Y M, ZHOU L X, et al. Effects of row spacing and density on yield and yield structure of wheat[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(2): 29, 84.
- [23] 李树锋, 彭方丽. 不同密度及行距配置对高粱产量和抗性的影响[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(4): 61-63.
- LI S F, PENG F L. Effects of different density and row spacing on yield and resistance of sorghum[J]. Tillage and Cultivation, 2023, 43(4): 61-63.
- [24] 王创云, 邓妍, 赵丽, 等. 不同覆膜栽培方式对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 62-67.
- WANG C Y, DENG Y, ZHAO L, et al. Effects of different film-mulching modes on photosynthetic characters and yield of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(30): 62-67.
- [25] 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.
- [26] 辛宗绪, 赵术伟, 孔凡信, 等. 氮肥施入量对高粱生长发育和产量的影响[J]. 现代农业科技, 2014, (8): 11-12.
- XIN Z X, ZHAO S W, KONG F X, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on growth and yield of sorghum[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014, (8): 11-12.
- [27] 苏富源, 郝明德, 张晓娟, 等. 施肥对甜高粱产量、养分吸收及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(3): 396-405.
- SU F Y, HAO M D, ZHANG X J, et al. Effects of fertilization on yield, nutrition uptake and quality of *Sorghum bicolor* (L.) moench [J]. Acta Agronomica Boreali-Occidentalis Sinica, 2016, 25(3): 396-405.
- [28] 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.