文章编号：1005-0906(2026)01-0093-11 DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20260111

氮肥用量和种植密度对爆裂玉米产量与膨爆品质的影响

杨 昆[1],骆 遥[2],朱镕一[1],汤郑豪[1],白康杰[1],冯 宇[1],赵光武[1],王晓敏[1]
(1.浙江农林大学现代农学院,杭州 311300; 2.义乌市雅荷农业开发有限公司,浙江 义乌 322000)

摘 要：引进沈爆3号、沈爆16号、斯达爆2号、佳蝶270、佳球105等5个爆裂玉米品种,开展品种比较试验,探究氮肥施用量和种植密度对爆裂玉米产量与膨爆品质的影响。结果表明,佳蝶270和斯达爆2号的产量较对照品种(沈爆3号)分别增加30.8%和26.0%,其穗行数、千粒重、穗粗、叶面积指数等性状具有明显优势。与斯达爆2号相比,佳蝶270的膨爆倍数和爆花率分别提高16.1%和3.2%,且小花率和死粒率分别降低40.2%和40.0%。在氮肥用量195 kg/hm^2、种植密度67 500株/hm^{2}的条件下,佳蝶270的产量和膨爆品质(膨爆倍数)较其他处理分别增加1.5% ~ 23.1%和1.4% ~ 34.8%,单穗重较其他处理增加1.0% ~ 19.6%,过氧化物酶(POD)较其他处理增加17.4% ~ 47.9%。综上所述,佳蝶270的产量和膨爆品质表现更佳。

关键词：爆裂玉米;氮肥;种植密度;产量;膨爆品质
中图分类号：S513.062 **文献标识码**：A

Effects of Nitrogen Fertilizer Application and Cultivation Density on the Yield and Popping Quality of Popcorn

YANG Kun[1], LUO Yao[2], ZHU Rong-yi[1], TANG Zheng-hao[1], BAI Kang-jie[1], FENG Yu[1], ZHAO Guang-wu[1], WANG Xiao-min[1]
(1. *College of Advanced Agricultural Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300; 2. *Yiwu Yahe Agricultural Development Co., Ltd., Yiwu* 322000, China)

Abstract: This study introduced five popcorn varieties, namely Shenbao No.3, Shenbao No.16, Sidabao No.2, Jiadie270 and Jiaqiu105, and conducted variety comparison experiments in Zhejiang Province to further explore the effects of nitrogen fertilizer application and planting density on the yield and popping quality of popcorn. The results showed that the yield of Jiadie270 and Sidabao No.2 increased by 30.8% and 26.0% respectively compared to the control variety(Shenbao No.3). This was mainly attributed to their significant advantages in traits such as ear row number, thousand-grain weight, ear diameter, and leaf area index. Compared with Sidabao No.2, the popping expansion rate and popping rate of Jiadie270 increased by 16.1% and 3.2% respectively, while the small popping rate and dead-kernel rate decreased by 40.2% and 40.0% respectively. In addition, when the nitrogen fertilizer application rate was 195 kg/ha and the planting density was 67 500 plants/ha, the yield and popping quality(popping expansion rate)of Jiadie270 increased by 1.5%-23.1% and 1.4%-34.8%, respectively, compared to other treatments. The ear weight increased by 1.0%-19.6%, and the peroxidase increased by 17.4%-47.9% compared to other treatments. To sum up, Jiadie270 has better yield and popping quality.

Key words: Popcorn; Nitrogen fertilizer; Cultivation density; Yield; Popping quality

录用日期：2024-12-02
基金项目：浙江省农业新品种选育重大科技专项(2021C02064-43)、浙江省农业重大技术协同推广项目(2021XTTGLY0304)、杭州市科技发展计划项目(202203A02)
作者简介：杨 昆(1998-),男,硕士,主要从事种业科学研究。E-mail:980493721@qq.com
王晓敏为本文通信作者。E-mail:wxmcfs@163.com

爆裂玉米(*Zea mays* L. *everta Sturt*)是专门制作爆米花的特用玉米,具有良好的膨爆特性,和普通玉米需要高压制作爆米花不同,爆裂玉米在常压下加热即可膨爆[1]。用其制成的爆米花富含蛋白质、纤维质、多糖和铁、钙等微量元素,热量低且易消化,已成为大众主要的休闲食品[2]。目前我国爆裂玉米产

业已趋于成熟，形成了从品种选育、高产优质栽培、原料深加工、食品生产、产品销售的全产业链，逐步向订单化、规模化、机械化、标准化的方向发展，具有很大的发展前景。此外，因地制宜种植爆裂玉米，强化爆裂玉米深加工和膨化食品的研发，可以作为乡村振兴的特色产业。

1986年，中国农业科学院作物品种资源所选育出我国第一个爆裂玉米品种黄玫瑰。1997年，育成首个爆裂玉米单交种沈爆2号；到2018年，最具代表性的球形爆裂玉米佳球105出现在大众视野中[3]。爆裂玉米育种研究发展至今已有近40年，从综合种到单交种，爆裂玉米产量增加20%以上，整体的品质水平已经达到或超过进口爆裂玉米[4]。近年来，我国爆裂玉米种质资源不断增加，通过传统育种、分子辅助选择、基因编辑等技术选育的新品种数量也在逐步增加，综合发展水平已经与国外相当。爆裂玉米的种植和发展主要集中在我国的东北和华北地区，南方地区种植较少，浙江省仅有农户零星种植，导致浙江省爆裂玉米发展缓慢。

玉米产量和品质受多种因素的影响，其中氮肥用量和种植密度是影响产量的关键因素[5]。氮肥用量过少或过量均会对其产生负面效应[6]。合理的氮肥施用量是挖掘爆裂玉米产量潜力的重要途径[7]，氮素不仅影响干物质的积累转运，还能增强叶片的光合能力，提高同化物向子粒的转运。缺氮会导致灌浆不充分、子粒发育不良，穗粒数下降；过量施用氮肥也会导致作物氮素利用效率降低，影响玉米生育后期营养物质消耗及各器官分配[8]。种植密度通过影响玉米田间通气透光等条件改善作物生长状态，密度过大或过小均会影响产量和品质，种植密度过高，会导致田间透气性较差，导致玉米子粒品质指标下降，种植密度增加会使单株产量下降[9-10]。

本研究引进5个爆裂玉米品种，系统比较各品种的产量和品质。在此基础上，进一步分析各品种的果穗性状、膨爆品质、光合性能等方面，进而筛选出适合在浙江省种植与推广的优良爆裂玉米品种及栽培措施，为加快爆裂玉米在浙江的种植与推广提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试品种

试验品种为沈爆3号、沈爆16号、斯达爆2号、佳蝶270和佳球105。沈爆3号为区域试验的对照品种，达爆2号、佳蝶270和佳球105为国家审定品种。

表1 爆裂玉米品种基本信息

Table 1 General information of popcorn variety

名 称 Name	类 型 Variety type	生育期(d) Growth period	来 源 Source
沈爆3号	单交种	119.0	沈阳农业大学特种玉米研究所
沈爆16号	单交种	117.0	沈阳农业大学特种玉米研究所
斯达爆2号	单交种	112.6	北京中农斯达农业科技开发有限公司
佳蝶270	单交种	117.0	沈阳特亦佳玉米科技有限公司
佳球105	单交种	122.0	沈阳特亦佳玉米科技有限公司

1.2 试验设计

1.2.1 爆裂玉米品比试验设计

2022年在浙江省衢州市开化县独山村浙江农林大学科技特派员试验基地(118°40′ E, 29°07′ N)开展爆裂玉米品比试验，在4月10日进行播种。试验采用随机区组设计，小区面积20 m^2，4行区，3次重复，四周设置与小区行数相同的保护行，实收中间两行测产。

各品种种植密度为55 500 株/hm^2，播种前施复合肥(15-15-15)600 kg/hm^2作为基肥。苗期、大喇叭口期分别施尿素150 kg/hm^2、75 kg/hm^2作为追肥。大喇叭口期用5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂防治玉米螟。为防止花粉直感影响子粒品质，每个品种套袋自交20株(穗)，套袋隔离直至采摘，以备果穗性状和品质测定。

1.2.2 氮肥用量和种植密度试验设计

通过对比结果，筛选出适合浙江省种植的爆裂玉米品种。在品比结果基础上，进行氮肥用量和种植密度试验设计，试验品种为品比试验选出适合种植的爆裂玉米品种佳蝶270。试验采用裂区设计，3次重复，每个小区为15 m^2。氮肥施用量为主区，种植密度为副区。氮肥用量设置4个水平：N9、N11、N13和N15，分别为纯氮135、165、195和225 kg/hm^2；种植密度设置4个水平：D35、D40、D45和D50，分别

为52 500、60 000、67 500和75 000 株/hm²。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　果穗性状测定

每个品种取自交的果穗6个,自然晾干,然后测量玉米果穗的穗长、穗粗、穗行数、行粒数、秃尖长,使用天平测定单穗重和千粒重,应用谷物水分测定仪测量子粒的含水量。

1.3.2　叶片SPAD值测定

SPAD值:采用SPAD-502 Plus叶绿素荧光仪测定玉米叶片的SPAD值,拔节期选取倒1叶,抽雄期和成熟期选取棒3叶,每个小区测定10株。

1.3.3　叶面积指数测定

在拔节期、抽雄期和成熟期取3株生长良好的玉米植株,用刻度尺测量叶片的长和宽,叶面积和叶面积指数计算公式如下:

叶面积=长×宽×0.75;

叶面积指数(LAI)=叶片总面积/土地面积。

1.3.4　干物质积累量测定

分别于拔节期、抽雄期和成熟期取3株生长良好的玉米植株,拔节期、抽雄期取茎和叶,成熟期时取茎、叶和穗。将茎、叶、穗分开,于105 ℃烘箱中杀青0.5 h后,85 ℃烘干至恒重,测量干物质积累量。

1.3.5　膨爆相关品质测定

膨爆倍数:随机取50 mL爆裂玉米置于爆米花机内膨爆,再用1 000 mL量筒测形成的爆米花体积,重复3次。

膨爆时间:随机取1 000粒爆裂玉米,置于爆米花机内膨爆,重复3次,以第1个玉米花爆裂的时间记为膨爆时间。

膨爆倍数=爆花后体积/爆花前体积;

爆花率=爆裂开的粒数/总粒数×100%;

小花率=爆裂但不能正常食用的玉米粒数/总粒数×100%;

死粒率=未能开裂及只裂口而不成花的粒数/总粒数×100%。

气界体积和水界体积[11]:取玉米100 g,将玉米倒入200 mL量筒,读取刻度,记为气界体积;取100 g,用200 mL量筒装入100 mL蒸馏水,再将玉米倒入,读取上升的刻度,记为水界体积。

1.3.6　生物酶活性测定

采取玉米叶片分装在大离心管中,放在-70 ℃的冰箱中保存。酶液制备时,将叶片放进研钵中,加入液氮研磨,转入加有0.5 mL的磷酸缓冲液(pH值为7.8)的玻璃管中,在4 000 r/min转速下冷冻离心50 min,取上清液即酶液至玻璃试管中4 ℃冰箱保存,用于测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性通过四氮唑蓝法测定[12];过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定[13];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定[14];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定[15]。

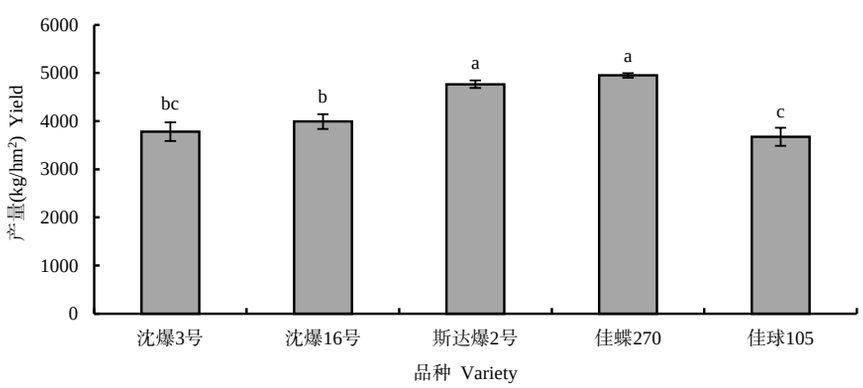
1.4　数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2021软件对爆裂玉米的果穗性状和品质进行整理和分析,应用SPSS 26.0软件和Statistix9软件采用LSD法对数据进行方差分析和多重比较,采用R 4.3.1对爆裂玉米叶片光合性能及产量相关性状和膨爆品质相关性进行分析和绘图。

2　结果与分析

2.1　不同爆裂玉米品种的产量分析

不同爆裂玉米品种间的产量存在显著差异(图1)。爆裂玉米产量超过4 500 kg/hm²的品种有佳蝶270(产量4 950.0 kg/hm²)和斯达爆2号(产量



注:不同小写字母表示不同处理差异显著(P<0.05)。下图、下表同

Note: Different lowercase letters indicated significant differences at P<0.05. The same below

图1　不同爆裂玉米品种的产量

Fig.1　Yield of different popcorn varieties

4 767.0 kg/hm²),且显著高于其他品种。相比沈爆3号(对照品种,产量3 782.5 kg/hm²),佳蝶270和斯达爆2号的产量分别增加30.8%和26.0%。沈爆16号(产量3 991.5 kg/hm²)比对照增加5.5%,未达到显著水平;佳球105的产量(3 676.5 kg/hm²)低于对照品种。

2.2 不同爆裂玉米品种的果穗性状分析

不同爆裂玉米品种的果穗外形比较见图2。佳蝶270和斯达爆2号的果穗对比其他品种较粗,整体偏短;沈爆3号、沈爆16号及佳球105果穗较长,粗度较细。佳蝶270的果穗子粒密度最高,总体比较饱满;沈爆16号和佳球105果穗子粒分散,总体比较单薄;沈爆3号和斯达爆2号的果穗子粒饱满度适中,总体表现良好。

在产量结果的基础上,进一步分析不同爆裂玉米品种的果穗性状(表2)。相比对照品种,佳蝶270的单穗重显著增加34.6%,其主要原因是佳蝶270的穗行数、穗粗显著高于对照品种,且秃尖长降低22.2%。相比对照品种,斯达爆2号的单穗重增加20.5%,其主要原因是斯达爆2号的千粒重和穗粗显著高于对照品种,且秃尖长降低38.9%。沈爆16号的行粒数较对照品种减少15.0%,但千粒重增加10.7%,且秃尖长降低16.7%。佳球105的单穗重低于对照品种,其原因是佳球105的行粒数减少10.7%。

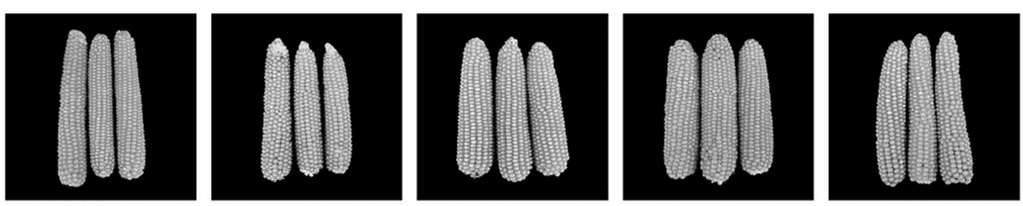


图2 不同爆裂玉米品种的果穗图

Fig.2 Ear photo of different popcorn varieties

表2 不同爆裂玉米品种的果穗性状

Table 2 Ear characteristics of different popcorn varieties

品 种 Variety	单穗重(g) Ear weight	千粒重(g) 1000-kernel weight	穗行数 Kernel row number	行粒数 Kernel number per row	穗长(cm) Ear length	穗粗(cm) Ear diameter	秃尖长(cm) Ear barren tip length
沈爆3号	103.6±1.8 c	138.0±1.5 b	14.8±0.5 bc	42.8±1.4 a	18.6±0.2 a	3.1±0.1 c	1.8±0.1 a
沈爆16号	105.1±3.8 c	152.7±2.3 a	14.4±1.0 c	36.4±1.0 b	16.9±0.7 b	3.2±0.1 c	1.5±0.1 b
斯达爆2号	124.8±4.0 b	155.7±1.9 a	17.2±0.8 b	39.8±1.2 ab	16.7±0.4 b	3.7±0.1 b	1.1±0.0 c
佳蝶270	139.4±3.5 a	142.3±1.8 b	21.2±0.8 a	39.6±1.2 ab	16.8±0.3 b	4.1±0.1 a	1.4±0.1 b
佳球105	95.9±3.2 c	141.7±2.3 b	14.8±1.2 bc	38.2±0.7 b	17.5±0.3 ab	3.2±0.0 c	1.4±0.1 bc

注:表中数值为平均数±标准差

Note: Date are mean±SD in table above

2.3 不同爆裂玉米品种的SPAD值和叶面积指数分析

在产量基础上,进一步分析不同爆裂玉米品种的光合性能(图3)。在爆裂玉米生长的拔节期、抽雄期和成熟期,不同品种间的SPAD值差异不显著。在各时期,不同品种的叶面积指数存在显著差异。在拔节期,佳蝶270和沈爆16号的叶面积指数显著高于其他品种,相比沈爆3号,分别增加28.6%和23.8%。在抽雄期,佳蝶270和斯达爆2号的叶面积指数较高,不同品种间的叶面积指数差异明显缩小。在成熟期,佳蝶270的叶面积指数最大,相比斯达爆2号叶面积指数增加14.3%。在生长期间保持较大的叶面积指数,提高光合性能是佳蝶270高产的重要因素。

2.4 不同爆裂玉米品种的膨爆品质分析

不同爆裂玉米品种的膨爆品质存在显著差异(表3)。佳蝶270、沈爆16号和佳球105的膨爆倍数显著高于沈爆3号,分别增加17.7%、16.3%和10.6%;斯达爆2号的膨爆倍数高于沈爆3号,差异不显著。佳蝶270的爆花率最高(95.2%),显著高于斯达爆2号、佳球105和沈爆3号;斯达爆2号的爆花时间最长,且小花率和死粒率最高,均显著高于佳蝶270和对照品种。此外,不同品种间的水界体积间差异不显著。气界体积间存在显著差异,沈爆16号、斯达爆2号和佳球105的气界体积显著高于沈爆3号。

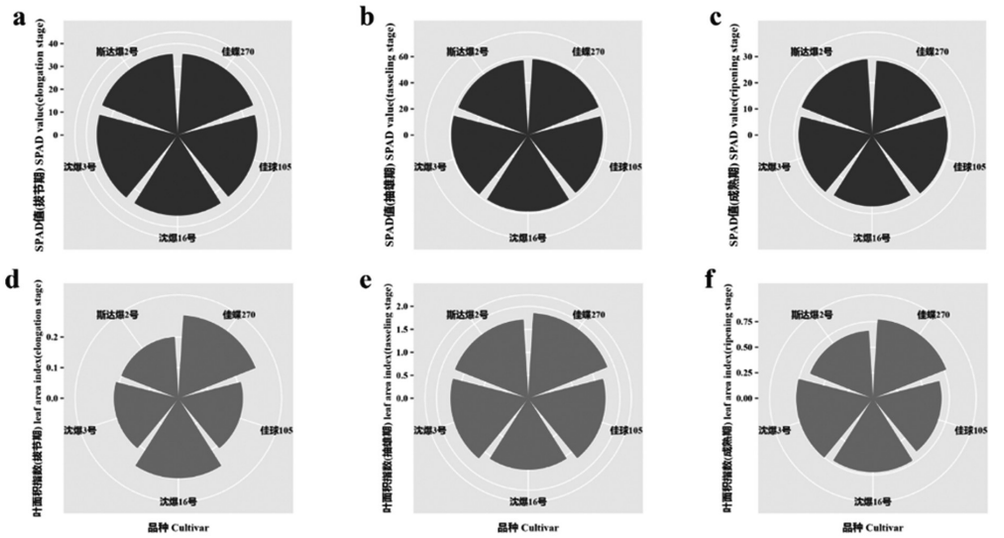


图3　不同爆裂玉米品种各时期的SPAD值和叶面积指数

Fig.3　SPAD value and leaf area index of different popcorn varieties in different stages

表3　不同爆裂玉米品种的膨爆品质

Table 3　Popping quality of different popcorn varieties

品种 Variety	膨爆倍数 Popping expansion rate	爆花率(%) Popping rate	爆花时间(s) Popped time	小花率(%) Small popping rate	死粒率(%) Dead-kernel rate	气界体积(mL/100 g) Air volume	水界体积(mL/100 g) Water volume
沈爆3号	14.1±0.4 c	93.7±0.3 b	35.1±0.9 b	6.2±0.4 b	6.3±0.3 b	116.7±1.8 b	176.7±2.4 a
沈爆16号	16.4±0.2 a	94.0±0.5 ab	38.2±0.2 a	9.0±0.3 a	6.0±0.5 bc	126.0±2.0 a	182.7±1.8 a
斯达爆2号	14.3±0.3 bc	92.0±1.0 c	38.6±0.7 a	9.7±0.2 a	8.0±1.0 a	122.7±1.3 a	180.7±2.4 a
佳蝶270	16.6±0.5 a	95.2±0.3 a	30.2±0.2 c	5.8±0.2 b	4.8±0.3 c	122.0±1.2 ab	178.7±0.7 a
佳球105	15.6±0.4 ab	93.2±0.3 bc	30.2±1.0 c	5.2±0.4 b	6.8±0.3 ab	124.0±1.2 a	180.0±2.3 a

2.5　爆裂玉米产量相关性状与膨爆品质的相关性分析

爆裂玉米种质材料间果穗性状和膨爆品质均具有丰富的多样性,不同爆裂玉米种质资源的膨爆特性差异较大(图4)。爆裂玉米果穗性状与膨爆特性间存在明显相关性,单穗重与穗行数、穗粗、含水量呈显著正相关(P<0.05);小花率与千粒重和膨爆时间呈显著正相关(P<0.05);死粒率与爆花率呈显著负相关(P<0.05);千粒重与爆花时间呈显著负相关(P<0.05)。

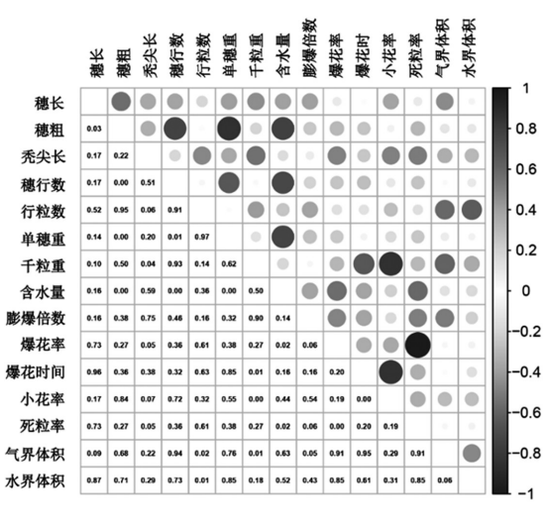


图4　爆裂玉米产量相关性状与膨爆品质的相关性

Fig.4　Correlation between yields and popping quality of popcorn

2.6 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米产量的影响

随着氮肥用量增加，佳蝶270的产量呈先增加后减少的趋势(表4)。在N13(195 kg/hm²)处理最高，为4 846.1 kg/hm²；在N9(135 kg/hm²)处理最低，为4 352.4 kg/hm²。随着种植密度增加，佳蝶270的产量呈先增加后平缓的趋势，产量最低的种植密度为D35处理(52 500株/hm²)，到D45(67 500株/hm²)处理时达到最高值4 690.8 kg/hm²，密度再增加，产量有所下降，但不同处理的产量未达到显著差异。因此，佳蝶270的最佳种植密度为67 500株/hm²。总体看来，不同氮肥处理间呈极显著差异，不同密度处理间未呈极显著差异，说明主因素氮肥用量对爆裂玉米品种佳蝶270产量的影响最大，种植密度对其影响较小。

表4 不同处理下产量的差异显著性比较

Table 4 Comparison of yield difference with different treatments

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	产 量 (kg/hm²) Yield	5%显著水平 5% level of significance	1%显著水平 1% level of significance	密度处理 Densities	产 量 (kg/hm²) Yield	5%显著水平 5% level of significance	1%显著水平 1% level of significance
N9	4 352.4	c	B	D35	4 522.8	b	A
N11	4 545.3	bc	AB	D40	4 641.2	ab	A
N13	4 846.1	a	A	D45	4 690.8	a	A
N15	4 791.9	ab	A	D50	4 680.9	a	A

为了进一步探究两个因素互作对佳蝶270产量的影响，对16个不同处理的产量进行分析(图5)。佳蝶270在不同氮肥用量与种植密度的条件下产量有明显差异。在氮肥施用量195 kg/hm²、种植密度67 500株/hm²的条件下，产量较高，为5 050.5 kg/hm²；氮肥施用量135 kg/hm²、种植密度52 500株/hm²的条件下产量最低，为4 079.1 kg/hm²。

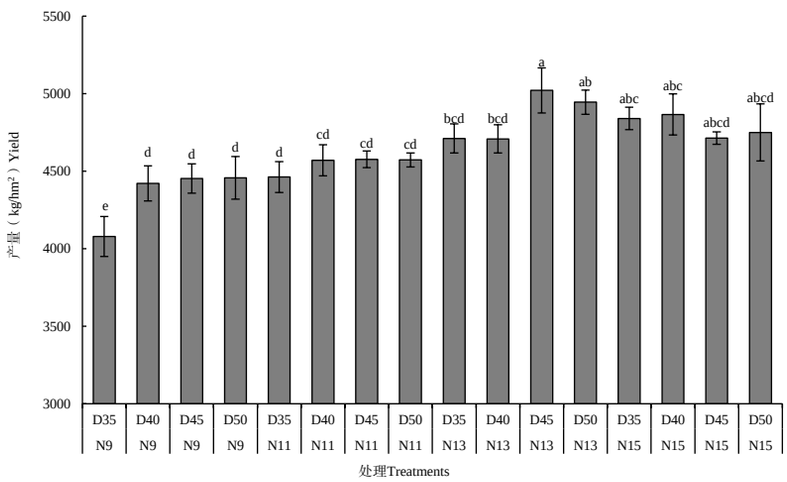


图5 不同处理下佳蝶270的产量

Fig.5 The yield of Jiadie270 with different treatments

2.7 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米果穗性状的影响

佳蝶270在不同氮肥用量的条件下单穗重、穗行数、行粒数有显著差异，穗长和穗粗无显著差异，单穗重在不同种植密度下呈显著差异(表5)。单穗重、穗行数、行粒数的最大值大部分都分布在N13处理(195 kg/hm²)，单穗重在N13、D45处理(氮肥用量195 kg/hm²，种植密度67 500株/hm²)的条件下最高，为141.2 g；穗行数大部分条件下平均值都在19.3；行粒数氮肥用量195 kg/hm²、种植密度75 000株/hm²的条件下最高，为41.7粒；穗长在氮肥用量165 kg/hm²、种植密度52 500株/hm²的条件下最长，为16.4 cm；穗粗在氮肥用量195 kg/hm²、密度67 500株/hm²和氮肥用量225 kg/hm²、密度75 000株/hm²的条件下最粗，为4.1 cm。由表5可知，佳蝶270的单穗重、穗行数、行粒数、穗长和穗粗的最大值，均出现在N13(195 kg/hm²)、D45(67 500株/hm²)处理。

表5　不同处理下佳蝶270的果穗性状

Table 5　Ear characteristics of Jiadie270 with different treatments

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	密度处理 Densities	单穗重(g) Ear weight	穗行数 Kernel row number	行粒数 Kernel number per row	穗长(cm) Ear length	穗粗(cm) Ear diameter
N9	D35	118.2 ± 3.7 e	16.7 ± 0.7 b	37.3 ± 1.2 de	15.3 ± 0.2 a	3.8 ± 0.1 a
	D40	126.8 ± 1.8 d	16.7 ± 1.3 b	37.3 ± 0.6 de	16.3 ± 0.3 a	3.9 ± 0.1 a
	D45	130.1 ± 0.7 d	17.3 ± 0.7 ab	37.0 ± 1.0 e	15.9 ± 0.5 a	3.9 ± 0.0 a
	D50	130.3 ± 3.5 d	19.3 ± 0.7 a	39.3 ± 0.7 bcd	16.1 ± 0.4 a	3.7 ± 0.1 a
N11	D35	129.2 ± 2.4 d	19.3 ± 0.7 a	38.3 ± 1.3 cde	16.4 ± 0.6 a	3.9 ± 0.1 a
	D40	132.8 ± 1.5 cd	19.3 ± 0.7 a	39.0 ± 1.0 cd	16.0 ± 0.5 a	3.8 ± 0.1 a
	D45	134.1 ± 1.5 bc	19.3 ± 0.7 a	39.7 ± 1.3 bcd	16.0 ± 0.3 a	3.9 ± 0.1 a
	D50	134.2 ± 2.4 bc	18.7 ± 0.7 ab	39.0 ± 1.0 cd	15.9 ± 0.4 a	3.8 ± 0.1 a
N13	D35	139.7 ± 2.6 ab	19.3 ± 0.7 a	40.0 ± 1.0 bcd	15.7 ± 0.4 a	3.9 ± 0.1 a
	D40	139.3 ± 2.2 ab	19.3 ± 0.7 a	40.3 ± 1.0 bc	16.1 ± 0.6 a	4.0 ± 0.3 a
	D45	141.4 ± 1.7 a	19.3 ± 0.7 a	41.3 ± 0.6 ab	16.3 ± 0.7 a	4.1 ± 0.2 a
	D50	140.7 ± 3.3 a	18.7 ± 0.7 ab	41.7 ± 0.7 a	16.1 ± 0.2 a	4.0 ± 0.1 a
N15	D35	140.2 ± 0.9 ab	18.7 ± 0.7 ab	40.7 ± 0.3 abc	15.9 ± 0.3 a	3.9 ± 0.0 a
	D40	140.3 ± 2.1 a	18.7 ± 0.7 ab	40.7 ± 0.3 abc	16.1 ± 0.6 a	4.0 ± 0.2 a
	D45	139.4 ± 2.0 ab	19.3 ± 0.7 a	39.0 ± 1.0 bcd	16.0 ± 0.2 a	3.9 ± 0.2 a
	D50	139.0 ± 0.7 abc	19.3 ± 0.7 a	40.0 ± 1.0 bcd	16.1 ± 0.5 a	4.1 ± 0.1 a

2.8　氮肥用量和种植密度对爆裂玉米干物质积累的影响

佳蝶270的干物质积累量在不同氮肥用量与种植密度的条件下有显著差异(表6)。拔节期在氮肥165 kg/hm^2、密度75 000株/hm^{2}时干物质积累量最高;抽雄期和成熟期分别在氮肥195 kg/hm^2、密度67 500株/hm^{2}和75 000株/hm^{2}时最高。收获指数在氮肥225 kg/hm^2、密度52 500株/hm^{2}时最高,为61.5%,最高值比最低值高48.9%。

表6　不同处理下佳蝶270的干物质积累量

Table 6　Dry matter accumulation of Jiadie270 with different treatments

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	密度处理 Densities	拔节期(g) Elongating stage	抽雄期(g) Tasseling stage	成熟期(g) Ripening stage	收获指数(%) Harvest index
N9	D35	19.1 ± 1.0 g	225.2 ± 11.9 j	473.6 ± 4.4 j	57.4 ± 1.6 ab
	D40	20.6 ± 0.8 fg	272.2 ± 2.4 f	559.5 ± 12.6 h	52.7 ± 0.8 cd
	D45	24.1 ± 1.9 de	302.0 ± 9.2 cd	641.3 ± 5.0 f	46.3 ± 1.6 ef
	D50	25.8 ± 1.1 bcd	328.0 ± 6.5 b	716.5 ± 17.9 bc	41.5 ± 2.6 g
N11	D35	20.3 ± 0.3 fg	245.4 ± 0.9 h	504.7 ± 1.1 i	58.9 ± 1.9 a
	D40	20.6 ± 1.8 fg	258.8 ± 2.9 g	587.1 ± 10.0 g	51.9 ± 2.4 cd
	D45	24.3 ± 0.7 cde	308.5 ± 7.9 c	660.2 ± 19.8 ef	46.3 ± 2.2 ef
	D50	29.8 ± 1.8 a	335.8 ± 8.8 b	735.4 ± 14.2 b	41.5 ± 0.4 g
N13	D35	20.7 ± 0.9 fg	232.9 ± 2.7 ij	527.5 ± 9.3 i	59.6 ± 2.1 a
	D40	27.2 ± 0.2 b	331.4 ± 1.7 b	610.4 ± 12.0 g	51.4 ± 1.8 cd
	D45	20.8 ± 0.6 fg	353.8 ± 0.6 a	691.2 ± 10.7 cd	48.5 ± 2.7 de
	D50	26.8 ± 1.4 bc	292.4 ± 0.1 de	768.9 ± 18.9 a	42.9 ± 1.3 fg
N15	D35	20.3 ± 0.9 fg	239.1 ± 0.9 hi	525.0 ± 2.7 i	61.5 ± 1.6 a
	D40	22.2 ± 0.2 ef	281.4 ± 3.1 ef	608.6 ± 8.4 g	53.3 ± 2.0 bc
	D45	25.4 ± 1.3 bcd	289.1 ± 1.3 e	677.1 ± 16.1 de	46.4 ± 0.7 ef
	D50	24.0 ± 0.8 de	329.8 ± 5.9 b	765.6 ± 4.1 a	41.3 ± 2.1 g

2.9 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米膨爆品质的影响

佳蝶270在不同氮肥用量与种植密度的条件下膨爆品质呈明显差异(表7)。膨爆倍数在氮肥195 kg/hm²、密度67 500株/hm²的条件下最高,为20.5倍;膨爆时间在氮肥225 kg/hm²、密度52 500株/hm²最短,在氮肥195 kg/hm²、密度67 500株/hm²次之;爆花率在氮肥165 kg/hm²、密度67 500株/hm²的条件下最高,为99 %;小花率和死粒率在氮肥165 kg/hm²、密度67 500株/hm²的条件下最低,分别为3.7%和1%。不同密度处理下,佳蝶270的膨爆倍数、膨爆时间、爆花率、小花率和死粒率的最优值都分布在D45(67 500株/hm²)处理,不同氮肥用量处理下,最优值集中在N11(165 kg/hm²)与N13(195 kg/hm²)处理。

表7 不同处理下佳蝶270的膨爆品质

Table 7 Popping quality of Jiadie270 with different treatments

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	密度处理 Densities	膨爆倍数 Popping expansion times	膨爆时间(s) Popped time	爆花率(%) Popping rate	小花率(%) Small popping rate	死粒率(%) Dead-kernel rate
N9	D35	15.5 ± 0.1 gh	18.0 ± 0.6 a	98.7 ± 0.3 ab	4.7 ± 0.8 cde	1.3 ± 0.3 cd
	D40	15.2 ± 0.2 h	18.5 ± 0.9 a	97.3 ± 0.3 bcd	6.7 ± 0.9 bc	2.7 ± 0.3 abc
	D45	16.9 ± 0.1 fg	18.3 ± 1.5 a	98.3 ± 0.3 abc	6.7 ± 0.9 bc	1.7 ± 0.3 bcd
	D50	16.2 ± 0.2 fgh	17.5 ± 0.1 ab	97.3 ± 0.3 bcd	4.7 ± 0.3 cde	2.7 ± 0.3 abcd
N11	D35	16.6 ± 0.4 fgh	15.2 ± 0.2 cd	98.0 ± 0.5 abc	4.7 ± 0.3 cde	2.0 ± 0.5 bcd
	D40	17.4 ± 0.5 ef	17.3 ± 1.4 ab	96.7 ± 1.4 cd	6.7 ± 1.5 bc	3.3 ± 1.4 ab
	D45	18.4 ± 0.4 de	17.4 ± 0.3 ab	99.0 ± 0.0 a	3.7 ± 1.8 e	1.0 ± 0.0 cd
	D50	19.4 ± 1.1 cde	18.2 ± 0.4 a	97.3 ± 0.6 bcd	5.3 ± 1.2 cd	2.7 ± 0.6 abc
N13	D35	18.9 ± 0.5 bcd	18.0 ± 0.3 a	95.3 ± 0.8 e	5.3 ± 0.3 cd	3.3 ± 0.3 ab
	D40	20.2 ± 0.6 ab	17.1 ± 1.5 ab	97.3 ± 0.8 bcd	5.3 ± 0.3 cd	2.7 ± 0.8 abc
	D45	20.5 ± 0.7 a	14.4 ± 0.2 d	98.7 ± 0.3 ab	5.0 ± 0.0 cd	2.3 ± 0.3 bcd
	D50	18.9 ± 0.8 bcd	16.4 ± 0.8 bc	96.3 ± 1.4 cde	5.7 ± 0.6 bcd	2.0 ± 0.5 bcd
N15	D35	16.4 ± 0.1 fgh	14.2 ± 0.3 d	99.3 ± 0.3 a	7.7 ± 1.2 ab	0.7 ± 0.3 d
	D40	20.0 ± 0.5 abc	17.3 ± 0.7 ab	95.7 ± 0.8 de	8.3 ± 1.6 a	4.3 ± 0.8 a
	D45	17.4 ± 1.4 ef	16.4 ± 0.6 bc	97.7 ± 0.7 bc	4.3 ± 0.8 de	2.3 ± 0.7 bcd
	D50	16.6 ± 0.8 fg	17.3 ± 1.3 ab	98.7 ± 0.3 ab	7.3 ± 0.8 abc	1.3 ± 0.3 cd

2.10 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米抗氧化酶活性和MDA含量的影响

佳蝶270在不同氮肥用量下其抗氧化酶活性和MDA含量有显著差异(表8)。随着氮肥用量的增加,SOD活性和POD活性均先上升后下降,SOD、POD在N11(135 kg/hm²)处理时达最高值;CAT活性和MDA含量随着氮肥用量的增加而逐渐降低;MDA含量在N15(225 kg/hm²)处理时降到最低,比最高值降低33.3%。

佳蝶270在不同种植密度下其抗氧化酶活性和MDA含量有显著差异(表9)。随着密度增加,SOD、POD和CAT酶活性均先上升后下降,SOD酶活性和CAT酶活性在D40(60 000株/hm²)处理时最高,为485.2 U/g;POD在D45(67 500株/hm²)处理时达最高值;MDA含量随着密度增加而逐渐增加,在D35(52 500株/hm²)处理时最低。

表8 不同氮肥用量下佳蝶270的抗氧化酶活性和MDA含量

Table 8 Antioxidant enzymes and MDA content of Jiadie270 with different nitrogen fertilizers

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	SOD(U/g) Superoxide dismutase	POD[U/(g·min)] Peroxidase	CAT[mg/(g·min)] Catalase	MDA(μmol/g) MDA content
N 9	214.7 d	97.5 b	43.6 a	3.4 a
N11	382.3 b	92.9 b	41.7 a	3.2 b
N13	414.4 a	107.3 a	34.0 b	3.0 b
N15	286.8 c	94.6 b	33.0 b	2.7 c

表9　不同种植密度下佳蝶270的抗氧化酶活性和MDA含量

Table 9　Antioxidant enzymes and MDA content of Jiadie270 with different densities

密度处理 Densities	SOD(U/g) Superoxide dismutase	POD[U/(g·min)] Peroxidase	CAT[mg/(g·min)] Catalase	MDA(μmol/g) MDA content
D35	247.3 b	96.9 bc	38.6 b	2.5 c
D40	485.2 a	93.8 c	44.8 a	2.8 bc
D45	330.2 ab	101.9 a	40.3 ab	3.1 a
D50	185.5 b	99.7 ab	28.6 c	3.0 ab

佳蝶270在不同氮肥用量和种植密度下其抗氧化酶活性和MDA含量有显著差异(表10)。SOD酶活性在氮肥用量195 kg/hm²、种植密度52 500株/hm²处理下最高;POD酶活性在氮肥195 kg/hm²、密度60 000株/hm²处理下最高;CAT酶活性在氮肥135 kg/hm²、密度67 500株/hm²处理下最高;MDA含量在氮肥135 kg/hm²、密度52 500和75 000株/hm²处理下最低。

表10　不同处理下佳蝶270的抗氧化酶活性和MDA含量

Table 10　Antioxidant enzymes and MDA content of Jiadie270 with different treatments

氮肥处理 Nitrogen fertilizers	密度处理 Densities	SOD(U/g) Superoxide dismutase	POD[U/(g·min)] Peroxidase	CAT[mg/(g·min)] Catalase	MDA(μmol/g) MDA content
N9	D35	409.1 ± 18.8 bcd	84.7 ± 0.6 g	34.6 ± 5.2 defg	2.0 ± 0.1 j
	D40	529.7 ± 5.7 ab	96.7 ± 1.6 cdef	43.8 ± 7.6 cd	4.7 ± 0.1 a
	D45	156.2 ± 1.6 def	104.1 ± 0.8 bc	67.3 ± 4.8 a	3.5 ± 0.1 d
	D50	172.9 ± 12.2 def	104.5 ± 3.7 bc	28.7 ± 6.1 fgh	2.0 ± 0.2 j
N11	D35	228.3 ± 5.4 cdef	96.5 ± 1.7 cdef	49.9 ± 1.4 bc	2.3 ± 0.1 i
	D40	431.1 ± 5.7 abcd	91.3 ± 1.4 efg	57.9 ± 3.1 ab	4.6 ± 0.1 a
	D45	155.4 ± 5.1 def	88.5 ± 2.7 fg	33.0 ± 3.0 efgh	3.7 ± 0.1 c
	D50	514.8 ± 0.8 ab	95.3 ± 2.4 def	26.1 ± 3.5 gh	4.0± 0.1 b
N13	D35	588.2 ± 4.9 a	100.4 ± 3.2 bcd	44.4 ± 0.4 cd	2.9 ± 0.1 f
	D40	474.6 ± 8.8 abc	103.2 ± 1.7 bcd	38.8 ± 2.3 de	3.1 ± 0.2 e
	D45	320.3 ± 8.2 cd	124.4 ± 10.3 a	23.7 ± 4.1 h	3.1 ± 0.1 e
	D50	275.7 ± 15.9 cd	101.4 ± 2.0 bcd	29.0 ± 1.4 efgh	2.7 ± 0.2 g
N15	D35	173.2 ± 18.8 def	105.9 ± 8.7 b	25.7 ± 7.5 gh	2.5 ± 0.1 h
	D40	506.0 ± 3.3 ab	84.1 ± 7.2 g	38.6 ± 4.5 de	2.5 ± 0.1 h
	D45	111.4 ± 7.3 ef	90.6 ± 1.5 efg	37.3 ± 7.7 def	2.5 ± 0.1 h
	D50	357.1 ± 0.8 bcd	97.6 ± 0.1 cde	30.5 ± 0.8 efgh	3.2 ± 0.0 e

3　结论与讨论

本研究从我国北方引进5个爆裂玉米品种在浙江省种植。研究表明,佳蝶270的产量与爆裂玉米品质均高于其他几个品种,具有在浙江省进行种植的潜能。在浙江省种植佳蝶270时,通过不同种植密度与氮肥用量的试验,结果表明,在氮肥用量195 kg/hm²、种植密度67 500株/hm²的条件下,产量和品质较高。同时可以控制氮肥用量165 kg/hm²、种植密度60 000株/hm²或氮肥用量195 kg/hm²、种植密度67 500株/hm²以增加其SOD、CAT或POD酶活性,从而增强其抗逆性,有效减少逆境对爆裂玉米正常生长和发育的影响,为其高产提供前提条件。

3.1　爆裂玉米品种筛选与分析

产量潜力是进一步推广爆裂玉米品种的重要前提。本研究系统比较5个爆裂玉米品种的实际产量,发现佳蝶270的产量最高,为4 950 kg/hm²。进一步分析发现,佳蝶270的高产主要取决于较高的穗行数和穗粗以及较低的秃尖长。可见,佳蝶270属于大穗型品种,有利于挖掘爆裂玉米产量潜力。大穗型品种具有库大的特点,子粒灌浆期需要较多的营养物质供应才能实现高产,玉米抽雄前后光合产物的积累是充实子粒的重要物质保障。本研究表明,佳蝶270在生长阶段持续保持较高的叶面积指

数，提高植株的光合性能，增加光合产物和子粒充实度，进而实现增产增效。因此，良好的株型是发挥大穗型品种产量潜力的基础。

此外，本研究的对照品种沈爆3号的产量为3 872.5 kg/hm^2，明显低于该品种在北方地区种植的产量，除生长环境因素外，种植密度是造成产量差异的重要因素。品种比较的筛选试验中爆裂玉米的种植密度是55 500株/hm^2。史振声等[16]研究表明，沈爆3号在超过54 000株/hm^{2}种植密度时才能真正发挥其产量潜力，高产密度一般在60 000株/hm^{2}左右。密度过大可能会造成植株相互遮挡，影响光合性能；同时，种植密度过大，植株之间为了争夺更多的太阳光照，会使植株向更高趋势增长，导致大多数养分被茎秆部分吸收，穗部得到的养分较少，使得单株玉米产量下降，影响最终产量[17]。合适的播种期也是影响爆裂玉米产量潜力的一个重要因素，本试验是在正常的玉米播种期条件下进行，并没有提前播或者晚于正常播种期，有可能晚播会提高其产量，有待进一步研究。

膨爆特性是爆裂玉米的主要品质指标。本研究表明，佳蝶270的膨爆倍数最高，且较对照品种增加17.7%。许多研究表明，爆裂玉米果穗性状与膨爆特性存在明显相关性，膨爆倍数、爆花率与穗粗、千粒重、穗行数、行粒数等存在显著负相关关系，膨爆倍数与爆花率存在显著正相关关系[18-21]。本试验中膨爆倍数与果穗性状没有显著相关性，这可能是供试品种的数量较少、品种类型单一，降低了膨爆特性与果穗性状的相关性。钟雪梅[22]等研究表明，爆裂玉米在不同种植区品质差异较大，在辽宁等区域产量和膨爆品质等综合指标较优，所以在浙江地区由于气候差异，综合对比下各指标会略低；另一个原因可能与供试品种的含水量有关，供试品种的含水量在17%左右，造成爆裂预热时间长，压力过大，爆花时间提前，膨爆不充分，膨爆倍数降低。孙淑凤等[23]研究表明，在含水量为13.4%～13.8%内球形花爆裂玉米的膨爆倍数可达27.4～27.5倍，继续增加或降低水分含量则膨爆倍数下降。因此，有待系统探究佳蝶270膨爆品质的影响因素，进一步挖掘佳蝶270的品质潜力。

3.2 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米产量和膨爆品质的影响

玉米产量和品质受多种因素的影响，其中氮肥用量和种植密度是最主要的影响指标。本研究表明，随着氮肥用量增加，佳蝶270的产量均表现为先增加后减少，到N13处理(氮肥用量195 kg/hm^2)时为最大值；随着种植密度增加，佳蝶270的产量也表现为先增加后减少，到D45处理(种植密度67 500株/hm^2)时为最大值。氮肥用量和种植密度处理试验表明，在氮肥用量195 kg/hm^2、种植密度67 500株/hm^{2}的条件下，佳蝶270在浙江种植的产量最高；相同氮肥用量，密度60 000株/hm^{2}时次之。高产处理的种植密度和北方地区对爆裂玉米的种植密度相比，范围偏差并不大，说明在浙江省种植爆裂玉米时，可以选择同北方一样的种植密度。

佳蝶270的膨爆品质在氮肥施用量195 kg/hm^2、种植密度60 000和67 500株/hm^{2}的条件下，膨爆倍数超过20倍。因此，在和普通玉米同播期的条件下，佳蝶270在浙江省的适宜种植方法为氮肥施用量195 kg/hm^2、种植密度60 000～67 500株/hm^2。

3.3 氮肥用量和种植密度对爆裂玉米抗氧化酶活性和MDA含量的影响

抗氧化酶是一种具有特殊生物活性的酶，具有消除生物体内部活性氧自由基、保护细胞膜和DNA免受氧化损伤的作用。在农业生产中，抗氧化酶的应用可有效提高农作物的抗逆性能和产量，同时能改善农产品的品质和安全性。随着氮肥用量的增加，佳蝶270的SOD、POD和CAT酶活性均先上升后下降，在氮肥用量165 kg/hm^{2}时达最高值，MDA含量均逐渐降低；随着密度的增加，SOD、POD和CAT酶活性均先上升后下降，佳蝶270在种植密度60 000株/hm^{2}时达最高值，MDA含量均逐渐升高。在不同氮肥用量和种植密度条件下，结合产量综合分析，佳蝶270的SOD和CAT酶活性在氮肥用量165 kg/hm^2、种植密度60 000株/hm^{2}处理下表现优异；POD酶活性在氮肥195 kg/hm^2、密度67 500株/hm^{2}处理下最高；MDA含量在氮肥165 kg/hm^2、密度52 500株/hm^{2}处理下最低。

参考文献：

[1] DONKEUN PARK, JOSEPH A M. Effects of storage temperature and kernel physical condition on popping qualities of popcorn hybrids[J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(4): 572-575.

[2] 于典司，王慧，郑洪建．爆裂玉米研究进展[J]．玉米科学，2020，28(1)：86-91．
YU D S, WANG H, ZHENG H J. A brief review of advancement on popcorn research[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(1): 86-91. (in Chinese)

[3] 刘勤来，于凯，张文君，等．爆裂玉米佳球105的特征特性及高产栽培技术[J]．现代农业科技，2020(17)：11．
LIU Q L, YU K, ZHANG W J, et al. Characteristics and high-yield cultivation techniques of popcorn Jiaqiu105[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(17): 11. (in Chinese)

[4] 史振声，孙淑凤，王志斌，等．中国爆裂玉米育种三十年[J]．玉米

科学,2019,27(1):42-45 .
SHI Z S, SUN S F, WANG Z B, et al. Thirty years of popcorn breeding in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(1): 42-45. (in Chinese)

[5] 苗向前,马文君 . 爆裂玉米高产栽培技术[J] . 农村科技,2018(5):17-18 .
MIAO X Q, MA W J. High-yield cultivation techniques of popcorn [J]. Rural Science & Technology, 2018(5): 17-18. (in Chinese)

[6] 陈火英,张建华,金兴龙,等 . 氮素对爆裂型玉米产量及叶片结构影响的研究[J] . 上海农学院学报,1994(4):253-256 .
CHEN H Y, ZHANG J H, JIN X L, et al. Effects of nitrogen on yield and leaf structure in popcorn[J]. Journal of Shanghai Agricultural College, 1994(4): 253-256. (in Chinese)

[7] 刘毅志,张漱茗,李新政 . 氮磷钾化肥对高产夏玉米子粒品质的影响[J] . 山东农业科学,1985(2):31-33 .
LIU Y Z, ZHANG S M, LI X Z. Effect of NPK fertilizers on the grain quality of high-yield maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 1985 (2): 31-33. (in Chinese)

[8] 姬丽,马琨,李虹,等 . 地膜覆盖与氮肥配施对玉米生长及氮素利用的影响[J] . 中国土壤与肥料,2023(11):92-100 .
JI L, MA K, LI H, et al. Effects of plastic film mulching combined with different nitrogen fertilizer levels on maize growth and nitrogen utilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(11): 92-100. (in Chinese)

[9] 王虹,史振声 . 种植密度对爆裂玉米产量及品质的影响[J] . 耕作与栽培,2014(6):1-4 .
WANG H, SHI Z S. Effects of planting density on yield and quality of popcorn[J]. Tillage and Cultivation, 2014(6): 1-4. (in Chinese)

[10] GÖKMEN S, SENCAR Ö, SAKIN M A. Response of popcorn(*Zea mays* everta) to nitrogen rates and plant densities[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2001, 25(1): 15-23.

[11] 史振声,钟雪梅,孙淑凤,等 . 中美几个爆裂玉米品种产品品质的比较[J] . 玉米科学,2018,26(5):7-13 .
SHI Z S, ZHONG X M, SUN S F, et al. Comparison of popcorn quality produced in China and USA[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(5): 7-13. (in Chinese)

[12] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2): 309-314.

[13] PIECHOWIAK T, SKÓRA B, GRZELAK B K, et al. Extraction of antioxidant compounds from blueberry fruit waste and evaluation of their in vitro biological activity in human keratinocytes[J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(11): 2317-2327.

[14] LIANG Y C, CHEN Q, LIU Q, et al. Exogenous silicon(Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt- stressed barley(*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(10): 1157-1164.

[15] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1): 189-198.

[16] 史振声,赵娜,吴玉群,等 . 种植密度对沈爆3号爆裂玉米产量和品质的影响[J] . 玉米科学,2005,13(增刊):130-132,134 .
SHI Z S, ZHAO N, WU Y Q, et al. Infection of planting density to yield and quality of popcorn Shenbao No.3[J]. Journal of Maize Sciencea, 2005, 13(S1): 130-132,134. (in Chinese)

[17] MADDONNI G A, OTEGUI M E, GIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. Field Corps Research, 2001,71(3): 183-193.

[18] 王慧,于典司,关媛,等 . 爆裂玉米种质资源的果穗性状和膨爆特性多样性及相关性分析[J] . 玉米科学,2019,27 (6):19-24 .
WANG H, YU D S, GUAN Y, et al. Diversity and correlation coefficient analysis on ear and explosion characters of popcorn germplasm resources[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(6): 19-24. (in Chinese)

[19] 王雪飞,李婷婷,郑云霄,等 . 132份爆裂玉米自交系的相关性状鉴定及杂种优势类群划分[J] . 中国农业大学学报,2023,28 (5):25-33 .
WANG X F, LI T T, ZHENG Y X, et al. Identification of related traits and classification of heterotic groups for 132 popcorn inbred lines[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(5): 25-33. (in Chinese)

[20] 李玉玲 . 爆裂玉米膨爆特性的遗传及杂交种选育研究进展[J] . 中国农学通报,2001,17(1):43-45 .
LI Y L. Advances in inheritance and hybrid breeding of popcorn expansion characters[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001, 17(1): 43-45. (in Chinese)

[21] 王苗,汪丽爽,李可可,等 . 玉米杂交分离群体的膨爆特性分析[J] . 中国农学通报,2022,38(15):7-10 .
WANG M, WANG L S, LI K K, et al. Maize hybrid-segregating population: Popping characteristics analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(15): 7-10. (in Chinese)

[22] 钟雪梅,宇涵,宏伟,等 . 沈爆4号爆裂玉米新品种选育及其综合表现[J] . 种子,2017,36(8):108-111 .
ZHONG X M, YU H, HONG W, et al. Breeding of popcorn maize hybrid variety Shenbao No.4 and its comprehensive performance [J]. Seed, 2017, 36(8): 108-111. (in Chinese)

[23] 孙淑凤,张喜华,王志斌,等 . 球形花爆裂玉米爆花品质影响因子研究[J] . 玉米科学,2019,27(5):22-27 .
SUN S F, ZHANG X H, WANG Z B, et al. Study on influencing factors of mushroom popcorn quality[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 22-27. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)