网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.005

氮肥用量对花期高温胁迫玉米生长发育及产量的影响

苏明,汪华,洪自强,李翻过,周甜,万猛虎,李月琪,吴宏亮,张世博,康建宏
(宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021)

[摘 要] 【目的】探讨玉米开花期遭遇高温胁迫后合理施用氮肥对其生理特性、干物质积累及产量的影响。【方法】以耐热型玉米品种郑单 958(ZD958)和热敏感型玉米品种先玉 335(XY335)为材料,采用盆栽种植方式,共设 4 个施氮水平(0,75,150 和 225 kg/hm^2,分别标记为 N0、N1、N2 和 N3)为主区,以 2 个温度梯度为副区,即温室内高温处理((35±2) ℃,HT)和室外自然温度((30±2) ℃,CK)。于玉米开花期进行持续 5 d 高温处理,测定花后不同时期、不同玉米品种的生理特性(叶面积指数(LAI),相对叶绿素含量(SPAD),叶片持绿性,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量及花粉活力)、干物质积累及产量指标。【结果】高温胁迫抑制了玉米叶片的 LAI、SPAD 和持绿性的提升,扰乱了抗氧化酶的正常合成,增加了脂膜过氧化产物及渗透调节物质的积累,但降低了玉米的花粉活力。合理的氮肥用量可通过提高玉米叶片的 LAI、SPAD 和持绿性,增加 SOD、POD、CAT 活性和 Pro 含量,降低 MDA 含量,有效缓解高温胁迫对玉米叶片正常代谢的不利影响,增加了光合产物积累,改善了干物质积累特性。在玉米产量及其构成因素方面,花期高温胁迫后显著降低了玉米的百粒质量和籽粒产量。与 N0 相比,高温胁迫后 N2 处理 ZD958 和 XY335 的籽粒产量分别提高 40.79%和 51.20%,ZD958 的籽粒产量较 XY335 提高 15.61%,说明合理施氮可有效缓解高温胁迫对玉米籽粒产量的不利影响,以 N2 处理表现最优。主成分分析结果表明,高温胁迫后各氮素处理的 ZD958 和 XY335 综合得分均呈现 N2>N3>N1>N0。【结论】玉米花期高温胁迫下,施氮量保持在 150 kg/hm^2 可持续优化玉米叶片生理特性和干物质积累特性,进而提高产量,以实现合理施氮对玉米花期高温胁迫的补偿。

[关键词] 玉米;高温胁迫;氮肥用量;叶片生理特性;干物质积累特性;玉米栽培
[中图分类号] S513.01 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0045-11

Effect of nitrogen fertilizer application on the growth and yield of maize under high temperature stress during flowering period

SU Ming, WANG Hua, HONG Ziqiang, LI Fanguo, ZHOU Tian, WAN Menghu, LI Yueqi, WU Hongliang, ZHANG Shibo, KANG Jianhong
(*College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract:【Objective】 This research aims to explore the effects of reasonable application of nitrogen fertilizer on physiological characteristics, dry matter accumulation and yield of maize under high temperature stress during flowering. 【Method】 The heat-tolerant maize variety Zhengdan 958 (ZD958) and the heat-sensitive maize variety Xianyu 335 (XY335) were used as materials, and were grown in pots. A total of four N application levels (0, 75, 150, and 225 kg/hm^2 labeled N0, N1, N2, and N3, respectively) were set

[收稿日期] 2024-12-20 [修回日期] 2025-04-10
[基金项目] 宁夏高质量发展与生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-3-02);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC03072);宁夏回族自治区重点研发项目(2019BBF02003);宁夏粮食作物种质创制与生长调控科技创新团队项目(2022BSB03109)
[作者简介] 苏明(1999—),男,安徽铜陵人,硕士,主要从事作物生理生态研究。E-mail:sumcakwx1208@163.com
[通信作者] 康建宏(1968—),男,宁夏青铜峡人,教授,硕士生导师,主要从事作物高产栽培研究。E-mail:kangjianhong@163.com
张世博(1994—),男,甘肃永昌人,讲师,硕士生导师,主要从事作物高产栽培研究。E-mail:z2335570357@163.com

as the main zones, and two temperature gradients as the sub-zones: high temperature treatment in the greenhouse ((35±2) ℃, HT) and outdoor natural temperature ((30±2) ℃, CK). The physiological characteristics (LAI, SPAD, leaf greening, SOD, POD, CAT, MDA, Pro, and pollen viability), dry matter accumulation, and yield indexes of different maize varieties were determined at different periods after the flowering of maize under continuous high temperature treatments for 5 days. 【Result】 High temperature stress inhibited the elevation of LAI, SPAD, and greening of maize leaves, disturbed the normal synthesis of antioxidant enzymes, increased the accumulation of lipid-membrane peroxidation products and osmotic-regulating substances, and reduced pollen viability in maize. Reasonable nitrogen fertilizer dosage could effectively alleviate the adverse effects of high temperature stress on normal leaf metabolism, increase photosynthetic product accumulation and improve dry matter accumulation characteristics by improving maize leaf LAI, SPAD and green holding, increasing of SOD, POD, CAT activity and the content of Pro, and decreasing the content of MDA. For maize yield and its components, 100-kernel mass and seed yield were significantly reduced after high temperature stress at anthesis. Compared with N0, the seed yield of ZD958 and XY335 treated with N2 after high temperature stress increased by 40.79% and 51.20%, respectively, and the seed yield of ZD958 increased by 15.61% compared with that of XY335, which indicated that reasonable nitrogen application could effectively alleviate the adverse effects of high temperature stress on maize seed yield, with N2 treatment showing the best performance. Principal component analysis showed that the composite scores of ZD958 and XY335 under each nitrogen treatment after high temperature stress were ranked as N2＞N3＞N1＞N0. 【Conclusion】 Under the high temperature stress at the flowering stage of maize, keeping the N application rate at 150 kg/hm^2 can continuously optimize the physiological characteristics of maize leaves and dry matter accumulation characteristics, and then improve the yield, to realize the compensation of reasonable N application to the high temperature stress at the flowering stage of maize.

Key words: maize; high temperature stress; nitrogen fertilizer dosage; leaf physiological characteristics; dry matter accumulation characteristics; maize cultivation

玉米作为全球重要的粮食、饲料和工业原料作物，其产量和品质对于保障粮食安全和农业经济发展至关重要。在玉米生长发育过程中，开花期是一个极为关键的阶段，此时期玉米的生殖生长直接决定了最终产量的形成[1-3]。然而随着全球气候变暖的加剧，高温胁迫现象愈发频繁，对玉米开花期的正常生长发育构成了严重威胁[4]。有研究表明，在高温胁迫环境下，玉米花粉活力首先受到影响；花粉作为玉米完成受精过程的关键载体，其活力的降低可能导致授粉不良，进而引起结实率下降；高温还会破坏花粉细胞膜的完整性，影响花粉内各种代谢酶的活性，从而改变花粉的生理特性[5-7]。同时，高温胁迫还会明显改变玉米植株的生理特性，植株的光合作用、呼吸作用等基本生理过程的协调性被打破[8-9]。有研究表明，高温会使玉米叶片叶面积指数下降，造成叶片提前衰老，致使气孔关闭，限制二氧化碳的进入，降低光合效率，叶绿素含量降低，减少光合产物的合成[10-11]。同时，这一过程还伴随着细胞内活性氧(ROS)的大量积累，ROS 的过量产生会对细胞内的生物大分子，如蛋白质、脂质和核酸等造成氧化损伤，进一步扰乱细胞的正常生理功能[12-13]。前人研究发现，抗氧化酶系统(如超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等)和抗氧化剂(如抗坏血酸、谷胱甘肽等)在清除 ROS、减轻氧化损伤方面发挥着重要作用[14-16]。高温可能会削弱抗氧化系统的功能或者使抗氧化物质的合成和代谢失调。也有研究表明，干物质积累是玉米产量形成的物质基础，开花期高温胁迫下，玉米干物质积累特性发生显著变化。一方面光合产物合成减少直接限制了干物质的来源，另一方面高温可能会改变干物质在植株不同器官之间的分配模式，例如减少向生殖器官的分配比例，影响籽粒的充实和发育[17]。这些变化最终都将反映在玉米的产量上，导致穗粒数减少、籽粒质量降低等问题，从而造成严重的产量损失。

大量研究已经证实，合理施用氮肥在缓解作物开花期高温胁迫的负面影响方面具有潜在的重要作用；氮肥作为植物生长发育所必需的大量元素肥料，合理施用能够调节植物的生理代谢过程[18-20]。在高

温胁迫下，适量的氮肥供应可能有助于维持玉米花粉的活力，可以为花粉的发育和代谢提供必要的物质和能量，改善花粉的生理状态，提高其在高温环境下的耐受性[17]。对于作物生理特性而言，氮肥能够促进叶片的生长和发育，增强叶绿素含量，延长叶片功能期，在一定程度上缓解高温引起的气孔关闭和光合抑制现象[21]；氮肥可能通过影响抗氧化酶相关基因的表达或者提高抗氧化物质的合成水平，增强玉米植株的抗氧化能力，从而减轻氧化损伤[22]。在干物质积累方面，合理施氮能够促进光合产物的合成和运输，优化干物质在植株各器官的分配，有利于增加库器官干物质填充，最终提高作物的产量[19]。目前，我国西北地区气温上升较为明显，对宁夏引黄灌区玉米花期产生严重威胁，但关于氮素缓解玉米花期高温胁迫的研究却略显不足。为此，本研究重点探讨施氮对花期高温胁迫后玉米生理特性、干物质积累及产量的影响，为制定有效的玉米高产栽培策略提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试玉米品种为耐热型品种郑单 958（ZD958）和热敏感型品种先玉 335（XY335），均由山东寿禾种业有限公司提供。供试肥料为尿素（N≥46.4%，中石化宁夏石化总公司生产）、重过磷酸钙（P_2O_5≥46.0%，宁夏鲁西化工化肥有限公司生产）和氯化钾（K_2O≥51.0%，国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产）。

1.2　试验设计

试验于 2024 年在宁夏大学农科实训基地智能化控温温室开展。采用盆栽方式，选用直径 43 cm，高 34 cm 的塑料花盆，每盆装 20 kg 充分混匀过筛的灌淤土，土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾的含量分别为 11.36 g/kg、0.82 g/kg、0.53 g/kg、50.32 mg/kg、45.68 mg/kg 和 152.81 mg/kg。试验采用裂区试验设计，共设 4 个施氮水平为主区，分别为 0 kg/hm²（N0）、75 kg/hm²（N1）、150 kg/hm²（N2）和 225 kg/hm²（N3），即 0，0.67，1.33 和 2.00 g/盆，同时以 2 个温度梯度为副区，分别为（35±2）℃（温室内高温处理，HT）和（30±2）℃（室外自然温度，CK）。

肥料施用方法为磷肥（120 kg/hm²，1.07 g/盆）和钾肥（90 kg/hm²，0.80 g/盆）均作为基肥施用，氮肥按照各处理的施用量，以基肥和追肥按 6∶4 比例分别在播种期和开花期施用，即播种期 N0（0 g/盆）、N1（0.40 g/盆）、N2（0.80 g/盆）、N3（1.20 g/盆），开花期 N0（0 g/盆）、N1（0.27 g/盆）、N2（0.53 g/盆）、N3（0.80 g/盆）。于 2024 年 5 月 1 日播种，每个氮素处理 30 盆，一半为高温处理，另一半为常温处理，共计 240 盆，每盆 3 粒种子，待完全出苗后，选择长势较好的幼苗定苗，每盆留苗 1 株，在玉米开花期之前所有处理均在自然条件下进行，待进入开花期时将各处理半数盆栽搬入温室内进行高温处理，温室内的空气相对湿度保持在 50%，花盆中土壤水分保持在最大持水量的 65%～75%，共持续 5 d，时间为每日 09:00－17:00，其余时间均为自然温度。处理结束后转入自然条件下生长至成熟。2024 年玉米高温处理期间同一时刻气温、日照强度变化的平均气象数据见表 1。

表 1　温度处理期间日均气温和光照强度变化

Table 1　Variation of daily average air temperature and light intensity during temperature treatment period

处理时间/d Treatment time	气温/℃ Air temperature		光照强度/lx Light intensity	
	高温 HT	常温 CK	高温 HT	常温 CK
1	36.20	31.56	68 658.84	71 262.36
2	36.23	31.71	70 361.12	72 236.19
3	36.54	31.78	68 412.28	72 239.34
4	36.89	31.92	70 362.11	70 231.85
5	37.00	32.40	70 002.51	72 893.09

1.3　测定指标及方法

于玉米花后 5，20，35 和 50 d，采用长宽系数法测定叶面积，计算叶面积指数（LAI）和叶片持绿性，采用便携式 SPAD 仪测定玉米叶片的相对叶绿素含量（SPAD）。

于玉米花后 50 d，采取玉米棒三叶，将新鲜叶片放入含有干冰的采样箱保鲜运送至实验室，放入－80 ℃冰箱保存待测。采用氮蓝四唑（NBT）法[23]测定超氧化物歧化酶（SOD）活性；采用紫外吸收法[23]测定过氧化氢酶（CAT）活性；采用愈创木酚法[23]测定过氧化物酶（POD）活性；采用双组分分光光度计法[23]测定丙二醛（MDA）含量；采用磺基水杨酸提取法[23]测定脯氨酸（Pro）含量。

于玉米花后 5 d，选择晴朗无风且花粉散粉旺盛

的时段(上午 09:00—11:00),用信封袋套住玉米雄穗,轻轻拍打抖出花粉,送入实验室低温贮藏待测。采用 TTC 染色法[24]测定花粉活力:将花粉染色后在显微镜中随机选取 3 个视野,保持细胞数在 100,观察染色成红色的细胞数,记为有活力花粉,无色则为无活力花粉,计算花粉活力。

于玉米花后 5,20,35 和 50 d,每个处理随机选取 3 株玉米植株,将其各器官分解后分别装入对应的档案袋或者网袋做好标记,随即送入实验室,用烘箱 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒质量,测定干物质质量;利用 Logistic 方程对玉米单株干物质积累过程进行进一步分析,得到拟合特征参数和决定系数,能够准确反映玉米干物质积累特性[25]。

于玉米收获期,在每个小区选取 3 株进行考种,测定穗行数、行粒数、穗粒数、百粒质量和单株籽粒产量,并用电子游标卡尺测定秃尖长度。

叶片持绿性(Gh)=成熟期(花后 50 d)玉米全株叶面积/吐丝期(花后 5 d)全株叶面积×100%。

花粉活力(Pv)=视野中呈红色细胞数/视野中总细胞数×100%。

$$Y=A/(1+Be^{-KX});$$

$$T_{max}=(\ln B)/K;$$

$$W_{max}=A/2;$$

$$V_{max}=AK/4;$$

$$D=(\ln 9B)/K。$$

式中:Y 为干物质积累量,g/株;A 为干物质最终积累量,g;B 为初始参数;K 为积累速率参数;X 为开花后时间,d;T_{max} 为干物质积累速率最大时的时间,d;W_{max} 为干物质积累速率最大时的生物量,g/株;V_{max} 为干物质最大积累速率,g/(株·d);D 为干物质积累活跃期(约完成总积累量 90%所需的时间),d。

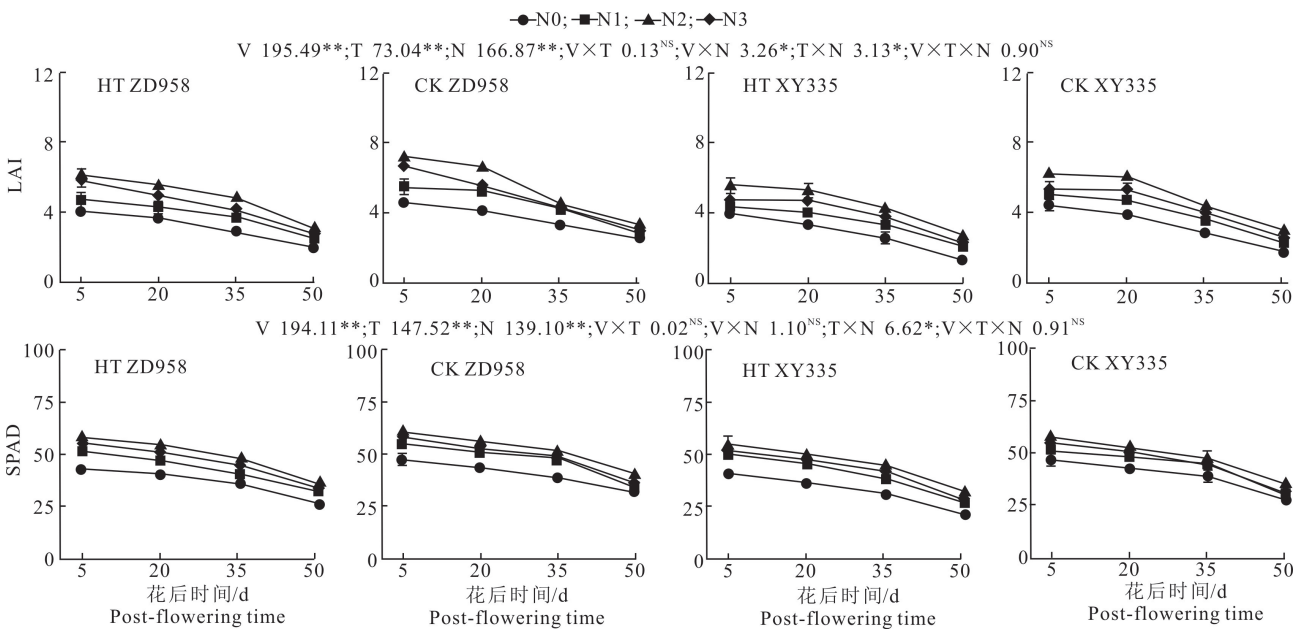
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理,使用 SPSS 20.0 对数据进行统计分析,采用 GraphPad Prism 9.5.1 进行绘图,同时利用 Origin 2021 对各项指标做主成分分析,以 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 品种、氮肥和温度互作对玉米叶片 LAI 和 SPAD 的影响

品种、氮肥和温度互作对玉米叶片 LAI 和 SPAD 的影响见图 1。



ZD958. 郑单 958;XY335. 先玉 335;HT. 高温处理;CK. 常温处理。* 表示达到显著水平($P<0.05$),** 表示达到极显著水平($P<0.01$),NS 表示无显著差异。V 代表品种,T 代表温度处理,N 代表氮肥处理。下同。

ZD958. Zhengdan 958;XY335. Xianyu 335;HT. High temperature treatment;CK. Room temperature treatment. * indicates reaching a significant level ($P<0.05$),** indicates reaching a highly significant level ($P<0.01$),and NS indicates no significant difference. V stands for varieties,T stands for temperature treatments,and N stands for nitrogen fertilizer treatments. The same below.

图 1 品种、氮肥和温度互作对玉米叶片 LAI 和 SPAD 的影响

Fig. 1 Effects of variety,nitrogen fertiliser and temperature interactions on LAI and SPAD of maize leaf

如图 1 所示，随着生育进程推进，玉米叶片的 LAI 和 SPAD 呈现逐渐下降趋势，花后 5 d 的 LAI 和 SPAD 值最大，HT 处理较 CK 显著降低。在不同温度处理下，氮肥用量对郑单 958 和先玉 335 的 LAI 和 SPAD 影响均表现为 N2＞N3＞N1＞N0，即均以 N2 处理效果最优。以花后 5 d 为例，在 HT 处理下，与 N0 相比，N1、N2 和 N3 处理 ZD958 叶片的 LAI 分别增加 16.46%，49.76%和 43.17%，SPAD 分别增加 20.88%，37.08%和 29.93%；N1、N2 和 N3 处理 XY335 叶片的 LAI 分别增加 19.70%，40.96%和 22.06%，SPAD 分别增加 23.02%，34.49%和 26.19%；同时在 N2 处理下，ZD958 叶片的 LAI 和 SPAD 较 XY335 增加 9.06%和 6.41%。与 CK 相比，在 HT 处理下，各氮肥处理 ZD958 叶片的 LAI 降幅为 10.28%～15.31%，SAPD 降幅为 3.83%～9.83%；XY335 叶片则表现为 LAI 下降 9.29%～17.10%，SPAD 下降 1.73%～12.59%。方差分析结果显示，玉米叶片的 LAI 和 SPAD 在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著，在温度与氮肥互作条件下差异显著。

2.2　品种、氮肥和温度互作对玉米叶片持绿性、抗氧化能力及脂膜过氧化产物积累的影响

如表 2 所示，随着施氮量的增加，玉米叶片的持绿性及 SOD、POD 和 CAT 活性呈现单峰趋势；在不同施氮量下，以 N2 处理最好。在 HT 处理下，玉米叶片的持绿性及 SOD、POD 和 CAT 活性较 CK 明显降低，各氮肥处理 ZD958 的持绿性及 SOD、POD 和 CAT 活性较 CK 分别降低 12.02%～66.68%，6.76%～9.51%，3.42%～12.80%和 7.38%～11.43%，XY335 的持绿性及 SOD、POD 和 CAT 活性较 CK 分别降低 21.05%～61.56%，1.24%～10.53%，4.72%～22.12%和 9.11%～18.18%。方差分析结果显示，玉米叶片的持绿性及 SOD、POD 和 CAT 活性在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著，而在温度与氮肥互作条件下只有 SOD 和 CAT 活性差异显著。

表 2　品种、氮肥和温度互作对玉米叶片持绿性、抗氧化能力、脂膜过氧化产物积累及花粉活力的影响

Table 2　Effects of varieties, nitrogen fertilizer and temperature interactions on green holding, antioxidant capacity, lipid membrane peroxidation products and pollen viability of maize leaves

品种 Variety	温度处理 Temperature treatment	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	叶片持绿性/% Leaf green holding	SOD 活性/(U·g^{-1}·h^{-1}) SOD activity	POD 活性/(U·g^{-1}·s^{-1}) POD activity	CAT 活性/(U·g^{-1}·min^{-1}) CAT activity	MDA 含量/(μmol·g^{-1}) MDA content	Pro 含量/(μg·g^{-1}) Pro content	花粉活力/% Pollen viability
郑单 958 ZD958	HT	N0	9.52 b	78.23 c	56.60 b	50.84 b	25.39 a	116.64 c	46.33 c
		N1	22.22 ab	91.20 b	68.86 ab	58.97 b	23.83 ab	133.74 b	59.00 b
		N2	34.92 a	110.93 a	77.35 a	77.87 a	20.45 c	143.46 a	62.00 a
		N3	26.99 ab	95.20 b	74.16 a	70.37 a	22.81 b	130.73 b	57.67 b
	CK	N0	28.57 b	83.90 c	60.02 c	55.32 c	19.20 a	81.44 b	54.00 c
		N1	34.92 ab	100.43 b	71.30 bc	63.67 b	18.37 ab	88.11 b	63.33 b
		N2	39.69 a	121.60 a	88.70 a	85.65 a	16.80 b	98.09 a	75.33 a
		N3	36.51 a	105.20 b	83.52 ab	79.86 a	18.53 a	87.17 b	75.00 a
先玉 335 XY335	HT	N0	7.93 c	62.90 c	46.79 b	45.29 b	26.82 a	129.93 c	42.33 b
		N1	12.69 bc	74.10 b	59.81 ab	47.73 b	24.52 a	145.38 b	50.67 a
		N2	26.98 a	86.90 a	65.19 a	60.37 a	22.67 b	156.58 a	59.67 a
		N3	23.81 ab	76.97 b	62.41 a	55.97 a	23.41 b	140.90 bc	51.67 a
	CK	N0	20.63 b	68.33 c	49.11 c	49.83 d	21.60 a	106.79 b	49.00 c
		N1	26.98 ab	75.03 bc	68.11 b	57.86 c	20.49 ab	114.06 ab	57.67 b
		N2	34.92 a	97.13 a	83.71 a	73.78 a	17.80 bc	130.64 a	70.33 a
		N3	30.16 ab	80.53 b	70.71 b	65.93 b	18.85 c	123.74 ab	63.67 b
F 值 *F* value	V		10.23**	139.26**	13.71**	84.89**	18.20**	82.10**	12.87**
	T		32.19**	14.41**	8.01**	47.47**	229.28**	206.29**	35.35**
	N		15.01**	56.20**	18.81**	85.43**	25.97**	16.99**	23.48**
	V×T		0.10^{NS}	2.03^{NS}	0.77^{NS}	1.54^{NS}	0.15^{NS}	15.12**	0.23^{NS}
	V×N		0.24^{NS}	1.17^{NS}	0.27^{NS}	3.60*	1.02^{NS}	0.26^{NS}	0.48^{NS}
	T×N		1.37^{NS}	5.62*	1.65^{NS}	3.03*	6.32**	3.95*	0.23^{NS}
	V×T×N		0.32^{NS}	0.60^{NS}	0.14^{NS}	0.42^{NS}	0.92^{NS}	0.47^{NS}	0.25^{NS}

注：同列数据后标不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著。* 表示达到显著水平（$P<0.05$），* * 表示达到极显著水平（$P<0.01$），NS 表示无显著差异。V 代表品种，T 代表温度处理，N 代表氮肥处理。下同。

Note: Data in the same column followed by different lowercase letters indicate that different treatments are significantly different at the 0.05 level. * indicates reaching a significant level ($P<0.05$), * * indicates reaching a highly significant level ($P<0.01$), and NS indicates no significant difference. V stands for varieties, T stands for temperature treatments, and N stands for nitrogen fertilizer treatments. The same below.

表 2 显示,随着施氮量的增加,玉米叶片的 MDA 含量呈现先降后升趋势,而 Pro 含量则呈现单峰趋势;在不同施氮量下,均以 N2 处理最好。在 HT 处理下,玉米叶片的 MDA 和 Pro 含量较 CK 提高明显,各氮肥处理 ZD958 的 MDA 和 Pro 含量较 CK 增幅达 21.73%～32.24%和 43.22%～49.97%,XY335 的 MDA 和 Pro 含量较 CK 增幅达 19.70%～27.36%和 13.87%～27.46%。方差分析结果显示,玉米叶片的 MDA 和 Pro 含量在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著,在温度与氮肥互作条件下差异极显著和显著。

2.3 品种、氮肥和温度互作对玉米花粉活力的影响

由表 2 可以看出,随着施氮量的增加,玉米花粉活力呈现单峰趋势;在不同施氮量下,以 N2 处理最好。在 HT 处理下,玉米的花粉活力较 CK 显著降低,各氮肥处理 ZD958 的花粉活力较 CK 降幅达 6.84%～23.11%,XY335 的花粉活力较 CK 降幅达 12.14%～18.85%。在 HT 处理下,与 N0 处理相比,N1、N2 和 N3 处理 ZD958 的花粉活力分别增加 27.35%,33.82%和 24.48%,XY335 的花粉活力分别增加 19.70%,40.96%和 22.06%;在 N2 处理下,ZD958 的花粉活力较 XY335 增加 3.90%。方差分析结果显示,玉米的花粉活力在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著,而在因子互作条件下均无显著差异。

2.4 品种、氮肥和温度互作对玉米单株干物质积累的影响

2.4.1 对干物质积累的影响 由图 2 可以看出,随着生育进程的推进,玉米总干物质积累量呈现逐渐上升趋势,HT 处理总干物质积累量较 CK 显著降低,而在不同温度处理下,合理的氮肥用量能显著提高干物质质量。在 HT 处理下,N1、N2 和 N3 处理 ZD958 的干物质积累量较 N0 处理分别增加 19.27%,32.79%和 26.87%,XY335 的干物质积累量较 N0 处理分别增加 10.80%,35.63%和 23.45%;在 N2 处理下,ZD958 的干物质积累量较 XY335 增加 13.65%。在 HT 处理下,各氮肥处理 ZD958 和 XY335 的干物质积累量较 CK 降幅分别为 3.71%～9.87%和 7.92%～14.23%。方差分析结果表明,玉米的干物质积累量在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著,在品种与温度互作、温度与氮肥互作条件下差异显著和极显著。

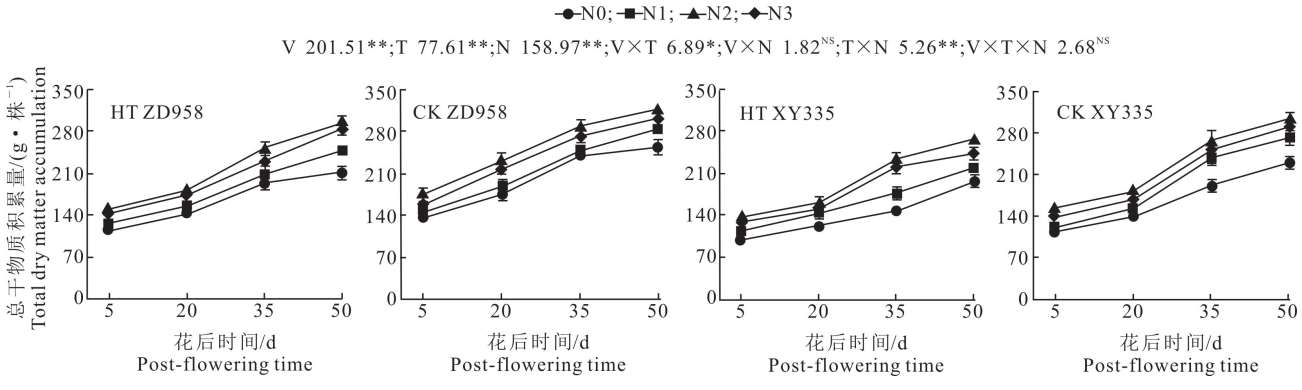


图 2 品种、氮肥和温度互作对玉米单株干物质积累的影响

Fig. 2 Effect of variety, nitrogen fertilizer and temperature interactions on dry matter accumulation of maize monocots

2.4.2 玉米干物质积累的拟合及参数分析 表 3 表明,HT 处理的干物质最大积累速率(V_{max})、干物质积累速率最大时的生物量(W_{max})较 CK 显著降低。在不同温度处理下,合理的氮肥用量能显著提高 V_{max} 和 W_{max},且均以 N2 处理效果最优。在 HT 处理下,与 N0 相比,N1、N2 和 N3 处理 ZD958 的 V_{max} 分别加快 31.40%,59.57%和 33.12%,W_{max} 分别增加 14.48%,25.84%和 23.09%;XY335 表现为 V_{max} 分别加快 32.35%,62.25%和 42.16%,W_{max} 分别增加 23.43%,36.39%和 28.44%。与 CK 相比,在 HT 处理下,各氮肥处理 ZD958 的 V_{max} 降幅为 2.55%～22.82%,W_{max} 降幅为 2.11%～22.81%;XY335 的 V_{max} 降幅为 6.90%～16.73%,W_{max} 降幅为 6.12%～16.69%。此外,本研究还发现,N2 处理对 V_{max} 和 W_{max} 有显著提升作用,同时有助于将 T_{max} 和 D 控制在适宜范围内。

2.5 品种、氮肥和温度互作对玉米产量及其构成因素的影响

品种、氮肥和温度互作对玉米产量及其构成因素的影响见表 4。

表 3　品种、氮肥和温度互作对玉米干物质积累拟合参数的影响

Table 3　Effect of variety, nitrogen fertilizer and temperature interactions on fitted parameters of dry matter accumulation in maize

品种 Variety	温度处理 Temperature treatment	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	方程参数 Parameter of equation			R^2	干物质积累参数 Dry matter accumulation parameters			
			A	B	K		T_{max}/d	W_{max}/(g·株$^{-1}$)	V_{max}/(g·株$^{-1}$·d^{-1})	D/d
郑单 958 ZD958	HT	N0	332.93	6.90	0.055 9	0.995 2	34.55	166.47	4.65	107.33
		N1	381.14	7.90	0.064 1	0.983 1	32.24	190.57	6.11	93.60
		N2	418.95	7.73	0.070 8	0.982 5	28.89	209.48	7.42	84.75
		N3	409.82	8.02	0.060 4	0.985 4	34.47	204.91	6.19	70.85
	CK	N0	357.16	6.89	0.055 1	0.974 9	35.03	178.58	4.92	108.89
		N1	389.34	8.54	0.064 4	0.998 0	33.30	194.67	6.27	93.17
		N2	508.73	8.12	0.069 1	0.998 6	30.31	271.37	8.79	86.83
		N3	481.82	7.99	0.066 6	0.999 7	31.20	259.91	8.02	64.20
先玉 335 XY335	HT	N0	294.56	7.06	0.055 4	0.956 1	35.28	142.28	4.08	74.94
		N1	351.24	7.67	0.061 5	0.991 2	33.13	175.62	5.40	97.56
		N2	388.12	7.81	0.068 2	0.971 6	30.14	194.06	6.62	87.98
		N3	365.49	7.75	0.063 5	0.921 7	32.25	182.75	5.80	94.49
	CK	N0	341.56	7.95	0.057 4	0.941 5	36.12	170.78	4.90	74.40
		N1	374.12	8.26	0.062 0	0.999 1	34.06	187.06	5.80	96.77
		N2	426.74	8.33	0.067 1	0.932 6	31.59	213.37	7.16	89.42
		N3	411.08	7.88	0.061 2	0.923 6	33.73	205.54	6.29	98.04

注：T_{max}. 干物质积累速率最大时的时间；W_{max}. 干物质积累速率最大时的生物量；V_{max}. 干物质最大积累速率；D. 干物质积累活跃期。

Note: T_{max}. Time to reach maximum dry matter accumulation rate; W_{max}. Biomass to reach maximum dry matter accumulation rate; V_{max}. Maximum dry matter accumulation rate; D. Active dry matter accumulation period.

表 4　品种、氮肥和温度互作对玉米产量及其构成因素的影响

Table 4　Effect of variety, nitrogen fertilizer and temperature interactions on maize yield and its components

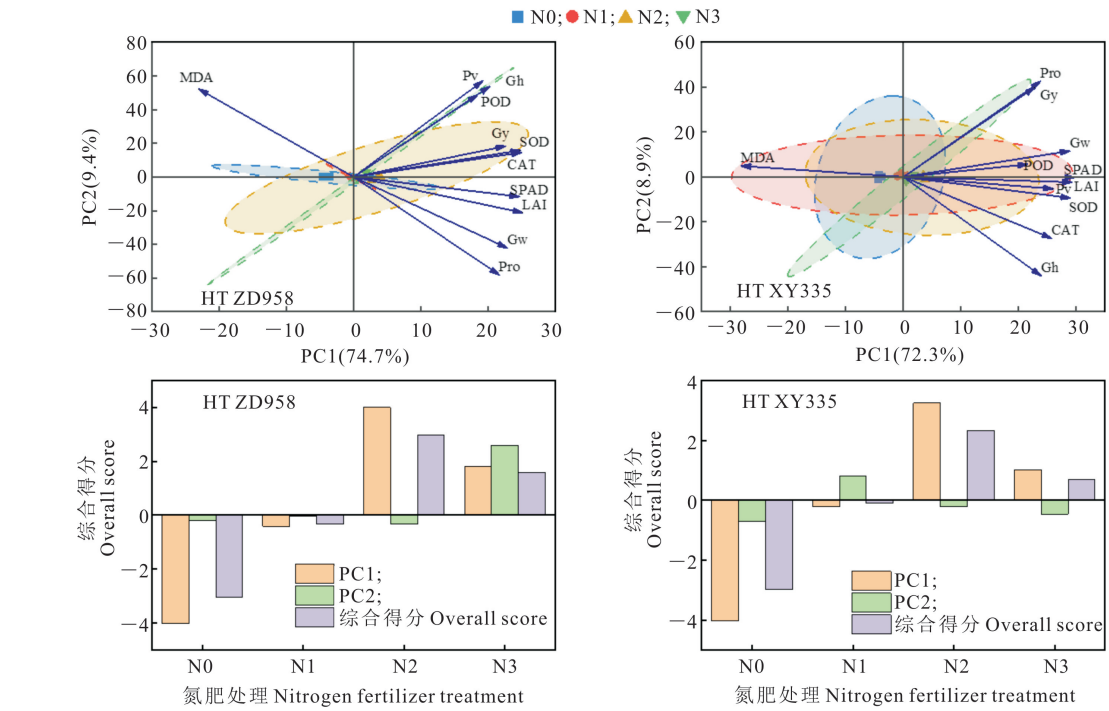
品种 Variety	温度处理 Temperature treatment	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	穗行数 Number of rows per ear	行粒数 Number of particles per row	穗粒数 Number of grains per ear	秃尖长度/cm Bald tip length	百粒质量/g Hundred grain quantity	籽粒产量/(g·株$^{-1}$) Grain yield
郑单 958 ZD958	HT	N0	18.00 a	32.25 c	541.00 c	2.28 a	31.22 b	164.96 b
		N1	18.50 a	35.25 bc	649.25 b	1.70 a	31.97 b	205.52 ab
		N2	21.50 a	43.00 a	747.00 a	1.00 a	39.09 a	232.24 a
		N3	19.00 a	38.75 b	660.75 b	1.50 a	34.15 b	210.60 a
	CK	N0	18.50 b	35.50 b	628.00 c	2.13 a	32.25 b	186.31 c
		N1	20.00 a	37.50 b	687.00 b	1.45 a	35.54 b	218.31 bc
		N2	22.00 a	44.25 a	773.00 a	1.28 a	43.88 a	248.56 a
		N3	20.00 a	42.75 a	696.50 b	1.60 a	39.43 b	229.92 ab
先玉 335 XY335	HT	N0	16.50 b	33.75 b	534.75 c	2.73 a	23.55 c	132.86 c
		N1	16.50 b	38.25 a	636.25 b	1.33 b	31.51 b	188.75 a
		N2	18.50 a	42.00 a	708.25 a	0.85 c	37.10 a	200.89 a
		N3	16.50 b	40.75 a	642.00 b	1.28 b	32.19 b	200.59 a
	CK	N0	17.00 b	36.50 b	630.00 c	1.23 a	26.72 c	181.34 c
		N1	17.50 b	37.00 b	681.50 b	0.88 b	31.88 b	211.47 b
		N2	19.00 a	43.50 a	746.00 a	0.55 b	41.70 a	232.32 a
		N3	18.00 a	41.75 a	694.25 b	1.08 a	37.89 a	225.18 a
F 值 F-value	V		22.61^{**}	0.81^{NS}	0.89^{NS}	16.6^{**}	78.16^{**}	16.61^{**}
	T		0.07^{NS}	9.79^{*}	13.90^{**}	0.62^{NS}	97.90^{**}	23.12^{**}
	N		6.26^{*}	43.92^{**}	22.88^{**}	8.61^{**}	192.53^{**}	36.56^{**}
	V×T		0.32^{NS}	2.05^{NS}	0.20^{NS}	0.21^{NS}	6.70^{*}	0.25^{NS}
	V×N		0.42^{NS}	0.72^{NS}	0.94^{*}	0.30^{NS}	3.45^{*}	9.68^{**}
	T×N		0.21^{NS}	6.31^{*}	5.83^{*}	0.65^{NS}	9.43^{**}	7.37^{**}
	V×T×N		0.05^{NS}	0.61^{NS}	0.01^{NS}	0.95^{NS}	1.48^{NS}	0.25^{NS}

由表 4 可知，HT 处理玉米的籽粒产量和百粒质量较 CK 显著降低；在不同氮肥处理下，合理的氮

肥用量能显著提高其籽粒产量和百粒质量,且均以 N2 处理表现最优。在 HT 处理下,与 N0 相比,N1、N2 和 N3 处理 ZD958 的籽粒产量分别增加 24.59%,40.79% 和 27.69%,百粒质量分别增加 2.40%,25.21% 和 9.39%,XY335 籽粒产量分别增加 42.07%,51.20% 和 50.99%,百粒质量分别增加 33.80%,57.54% 和 36.69%;同时在 N2 处理下,ZD958 的籽粒产量和百粒质量较 XY335 分别提高 15.61% 和 21.44%。与 CK 相比,在 HT 处理下,各氮肥处理 ZD958 的籽粒产量降幅为 5.86%~11.48%,百粒质量降幅为 3.19%~13.39%;XY335 籽粒产量降幅为 11.48%~26.73%,百粒质量降幅为 1.16%~15.04%。方差分析结果表明,玉米的百粒质量和籽粒产量在品种、温度和氮肥单个因子处理下差异极显著,在品种与氮肥互作和温度与氮肥互作条件下差异显著和极显著。

2.6 高温胁迫下品种和氮肥用量对玉米生理特性及产量的综合评价

由图 3 可以看出,在高温胁迫下,不同玉米品种第 1 主成分和第 2 主成分的得分情况不一致,其中 ZD958 的 PC1 为 74.7%,PC2 为 9.4%,累计方差贡献率为 84.1%;XY335 的 PC1 为 72.3%,PC2 为 8.9%,累计方差贡献率为 81.2%。从各氮素处理的综合得分比较发现,ZD958 和 XY335 均呈现 N2>N3>N1>N0。



LAI. 叶面积指数;SPAD. 相对叶绿素含量;Gh. 叶片持绿性;SOD. SOD 活性;POD. POD 活性;CAT. CAT 活性;MDA. MDA 含量;Pro. Pro 含量;Pv. 花粉活力;Gw. 百粒质量;Gy. 籽粒产量。

LAI. Leaf area index;SPAD. Relative chlorophyll content;Gh. Leaf green holding;SOD. SOD activity;POD. POD activity;CAT. CAT activity;MDA. MDA content;Pro. Pro content;Pv. Pollen viability;Gw. Hundred grain mass;Gy. Seed yield.

图 3 高温胁迫后品种和氮肥用量对玉米生理特性及产量的综合评价

Fig. 3 Comprehensive evaluation of varieties and nitrogen fertilizer dosage on physiological characteristics and yield of maize after high temperature stress

3 讨 论

3.1 品种、氮肥和温度互作对玉米叶片生理特性的影响

目前相关研究表明,在高温胁迫环境下,作物的 SPAD 值、叶面积指数(LAI)、花粉活力和叶片持绿性会受到显著影响,而合理施用氮肥是缓解这些负面影响的关键因素[9]。对于 SPAD 值,高温会加速叶片衰老,降低叶绿素含量;合理的氮肥供应能在一定程度上稳定或提高 SPAD 值,进而提高叶片持绿性,延长叶片功能期[9]。在 LAI 方面,高温胁迫会使叶片生长受阻,加速叶片枯萎,氮肥的合理施用可以促进叶片生长,增加叶面积,但在高温下过量氮肥可能会加重植株的代谢负担,不利于 LAI 的提升[26]。在高温胁迫下花粉活力会急剧下降,而适量氮肥能改善玉米的营养状况,提高花粉发育所需的

能量和物质供应，增强花粉对高温的耐受性[27]。不同作物品种对氮素的敏感程度不同，因此缓解效果也会存在差异，例如某些品种对氮肥更为敏感，合理施肥能显著提高其花粉活力，减少因高温导致的花粉败育，从而保障授粉过程顺利进行，提高结实率[27]。本研究结果发现，与 CK 相比，在高温胁迫下，耐热型玉米品种 ZD958 与热敏感型玉米品种 XY335 的 SPAD、LAI、叶片持绿性和花粉活力均会有所降低，且 ZD958 下降幅度明显低于 XY335；而通过合理施氮均能显著提高 2 个玉米品种的 SPAD、LAI、叶片持绿性和花粉活力，且以 N2 处理效果最佳。

在作物开花期遭遇高温胁迫时，氮肥的合理施用对作物 SOD、POD、CAT 活性和 MDA、Pro 含量有着较大影响[28]。在高温胁迫下，玉米体内会产生大量活性氧，而氮肥为 SOD 合成相关代谢过程奠定了必要的物质基础[13,29]，同时合理施氮有助于缓解此类不利影响[4]。另有研究表明，氮肥可以调节 POD（过氧化物酶）和 CAT（过氧化氢酶）的表达及活性；适当的氮肥用量能促进作物生长健壮，为抗氧化酶的合成和功能发挥创造了良好条件[22]。在高温胁迫下，通过合理施氮，作物体内 POD 和 CAT 能更高效地分解过氧化氢等过氧化物，减轻氧化伤害[30-31]。本研究发现，与 CK 处理相比，在 HT 条件下，ZD958 和 XY335 的 SOD、POD 和 CAT 活性均明显下降，同时 N2 处理能显著缓解高温胁迫危害，耐热型品种 ZD958 抗氧化能力下降速度明显低于热敏感型品种 XY335。大量研究证实，不合理施氮及非生物胁迫均会导致 MDA 大量积累，表明膜系统受损严重；而合理施氮能降低 MDA 含量，用以缓解高温胁迫对植株的危害[32]。在高温胁迫下，适量氮肥能促进作物合成 Pro，提高细胞的渗透调节能力，稳定蛋白质和膜结构[32-33]。本研究结果与上述结论基本一致，在 HT 处理下玉米 MDA 和 Pro 含量较 CK 显著提高，在不同温度处理下合理的氮肥用量能显著降低 MDA 含量，提高 Pro 含量。

3.2　品种、氮肥和温度互作对玉米干物质积累特性的影响

有研究表明，适量氮肥可促进高温胁迫下作物叶片光合色素合成，增强光合作用，使更多的光合产物得以积累[9,19]。对于茎秆，氮肥有助于维持其结构物质的合成，保证植株在高温下的机械支撑能力[18]。对于根系，合理施氮能增强根系活力，促进水分和养分吸收，有利于物质在植株体内的运输和分配[34]。另有研究表明，在自然温度下，中氮处理时玉米干物质积累量最高；而低氮限制了玉米生长，导致干物质积累少；高氮则导致营养生长过旺，干物质向生殖器官分配比例降低，在增温 2 ℃条件下适量氮肥处理的玉米干物质积累速率加快[35]。本研究结果表明，在不同温度处理下合理施氮能显著提高 V_{max} 和 W_{max}，同时在低氮或高氮处理下，干物质积累均会受阻，积累速率下降，尤其在高温胁迫下该现象更为明显，同时氮肥与温度的互作效应表现极显著。当处于适宜温度条件时，适量的氮肥投入能够充分激发玉米的增产潜力，促使玉米植株高效地进行光合作用并积累干物质，显著提高干物质积累量。研究表明，增施氮肥能提高水稻抽穗前茎鞘非结构性碳水化合物含量，促进花后非结构性碳水化合物向穗的转运，从而提高干物质积累量；同时在非生物逆境胁迫时，水稻茎鞘储藏的非结构性碳水化合物可以为干物质积累及后期的产量形成提供充足的同化物[18]。

3.3　品种、氮肥和温度互作对玉米产量及其构成因素的影响

氮肥对玉米产量构成因素的影响是多维度且至关重要的[19,36]。在玉米营养生长阶段，适量的氮肥供应能够为植株提供充足养分，促进细胞的分裂与伸长，进而显著增强植株的生长势，使玉米能够分化出更多数量的有效穗，为后续的产量提升奠定了基础；进入籽粒灌浆期，充足的氮肥供应能够促进植株体内光合产物的合成与转运，使更多的光合产物不断输送到籽粒中并积累下来，从而显著增加百粒质量。在玉米生长的各个关键时期，尤其是开花期和灌浆期，温度的适宜与否直接关系到玉米生理过程能否正常进行[33]。在开花期，适宜温度下玉米植株的光合作用效率较高，光合产物能够高效地从源器官转运至库器官，并在籽粒中大量积累，从而显著提高百粒质量[17]；然而当遭遇高温胁迫时，玉米的生长发育进程会被异常加速，灌浆期被明显缩短，光合产物的积累时间不足，导致百粒质量显著降低[20,33]。也有研究指出，氮肥与温度之间存在着明显的互作效应，在温度适宜的环境条件下，适量的氮肥能够充分激发玉米的增产潜力，通过协同促进穗数、穗粒数和百粒质量，从而实现玉米产量的显著提升；当处于极端高温条件时，氮肥的增产效果会受到削弱，但仍能极大程度缓解不利条件对产量的影响，例如在高温环境下，通过合理控制氮肥用量会减轻植株的呼吸作用，避免导致光合产物无效消耗的增加，进而减轻对产量及其构成因素的不利影响[37]。

这与本研究结果基本一致,即 HT 处理玉米的籽粒产量和百粒质量较 CK 显著降低,而在不同温度处理下,合理的氮肥用量能显著提高籽粒产量和百粒质量,且均以 N2 处理效果最优,说明合理控制施氮量能极大程度缓解高温胁迫对玉米的减产效应。

4 结 论

玉米开花期高温胁迫后,合理施氮具有很好缓解高温胁迫的作用。施氮可显著改善玉米叶片生理特性,增强抗氧化能力,减少膜脂过氧化产物的积累,缓解高温对细胞的损伤,有利于干物质积累,并优化其积累特性。综合考虑,施氮量保持在 150 kg/hm^2 能增强玉米开花期对高温胁迫的适应能力,对保障玉米产量的提升具有积极作用。

[参考文献]

[1] SHIFERAW B, PRASANNA B M, HELLIN J, et al. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security[J]. Food Security, 2011, 3(3): 307-327.

[2] FAO. World food and agriculture-statistical yearbook 2023[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations Press, 2023.

[3] 徐欣莹,邵长秀,孙志刚,等. 高温胁迫对玉米关键生育期生理特性和产量的影响研究进展[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 81-88.
XU X Y, SHAO C X, SUN Z G, et al. Research progress on the effect of heat stress on physiological characteristics of maize at key growth stage and the yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 81-88.

[4] 钟苑宁,王慧丽,高碧玮,等. 玉米高温胁迫研究热点及前沿探究[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(11): 1891-1902.
ZHONG Y N, WANG H L, GAO B W, et al. Research hotspots and frontiers of maize high temperature stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(11): 1891-1902.

[5] SÁNCHEZ B, RASMUSSEN A, PORTER J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review[J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 408-417.

[6] LIZASO J I, RUIZ-RAMOS M, RODRÍGUEZ L, et al. Impact of high temperatures in maize: phenology and yield components[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 129-140.

[7] HERRERO M P, JOHNSON R R. High temperature stress and pollen viability of maize1[J]. Crop Science, 1980, 20(6): 796-800.

[8] DUPUIS I, DUMAS C. Influence of temperature stress on in vitro fertilization and heat shock protein synthesis in maize (*Zea mays* L.) reproductive tissues[J]. Plant Physiology, 1990, 94(2): 665-670.

[9] 马昕,蔡丰乐,穆心愿,等. 施氮量对穗期高温胁迫下玉米叶片光合生理及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1852-1866.
MA X, CAI F L, MU X Y, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic physiology and yield of maize leaves under high temperature stress at ear stage[J]. Plant Nutrition and Fertilizer, 2022, 28(10): 1852-1866.

[10] CRAFTS-BRANDNER S J, SALVUCCI M E. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress[J]. Plant Physiology, 2002, 129(4): 1773-1780.

[11] LI Y T, XU W W, REN B Z, et al. High temperature reduces photosynthesis in maize leaves by damaging chloroplast ultrastructure and photosystem Ⅱ[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2020, 206(5): 548-564.

[12] HIGASHI Y, SAITO K. Lipidomic studies of membrane glycerolipids in plant leaves under heat stress[J]. Progress in Lipid Research, 2019, 75: 100990.

[13] LYONS J M. Chilling injury in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1973, 24: 445-466.

[14] BARNABÁS B, JÄGER K, FEHÉR A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals[J]. Plant, Cell & Environment, 2008, 31(1): 11-38.

[15] BANERJEE A, ROYCHOUDHURY A. Abiotic stress, generation of reactive oxygen species, and their consequences[M]//SINGH V P, SINGH S, TRIPATHI D, et al. Reactive oxygen species in plants: boon or bane-revisiting the role of ROS. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2018: 23-50.

[16] PAMPLONA R. Membrane phospholipids, lipoxidative damage and molecular integrity: a causal role in aging and longevity[J]. Biochimica et Biophysica Acta-Bioenergetics, 2008, 1777(10): 1249-1262.

[17] 穆心愿,吕姗姗,卢良涛,等. 授粉期高温胁迫下雄穗大小对玉米干物质积累及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2880-2894.
MU X Y, LÜ S S, LU L T, et al. Effects of tassel sizes on post-flowering dry matter accumulation and yield of different maize varieties under high temperature stress during pollination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15): 2880-2894.

[18] 闫娜,谢可冉,高逖,等. 增施穗氮肥缓解水稻穗分化期高温伤害的生理机制研究[J]. 作物杂志, 2025(1): 89-98.
YAN N, XIE K R, GAO T, et al. Study on physiological mechanism of increasing panicle nitrogen fertilizer to alleviate high temperature injury during panicle differentiation of rice[J]. Crops, 2025(1): 89-98.

[19] 苏明,康建宏,吴宏亮,等. 旱地马铃薯花后高温胁迫下施氮对干物质积累、氮素利用及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 716-729.
SU M, KANG J H, WU H L, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation, nitrogen utilisation and yield of dryland potato under high temperature stress after flowering[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(3): 716-729

[20] 王瑞,李向岭,郭栋,等. 增施氮肥对夏玉米花后高温胁迫下籽

粒碳氮代谢的影响[J]. 作物学报，2023，49(12)：3342-3351.
WANG R，LI X L，GUO D，et al. Effects of increased nitrogen fertilisation on carbon and nitrogen metabolism in summer maize grains under post-flowering high temperature stress [J]. Crop Journal，2023，49(12)：3342-3351.

[21] 坚天才，吴宏亮，康建宏，等. 氮素缓解春小麦花后高温早衰的荧光特性研究[J]. 中国农业科学，2021，54(15)：3355-3368.
JIAN T C，WU H L，KANG J H，et al. Fluorescence characteristics of nitrogen mitigation of high temperature and early failure after flowering in spring wheat[J]. Chinese Agricultural Science，2021，54(15)：3355-3368.

[22] 坚天才，康建宏，吴宏亮，等. 氮素缓解春小麦花后高温早衰的抗氧化特性研究[J]. 中国农业科技导报，2021，23(7)：33-44.
JIAN T C，KANG J H，WU H L，et al. Study on the antioxidant properties of nitrogen in mitigating high temperature and early failure of spring wheat after flowering[J]. China Agricultural Science and Technology Bulletin，2021，23(7)：33-44.

[23] 孙群，胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 陕西杨凌：西北农林科技大学出版社，2006：209.
SUN Q，HU J J. Research technology of plant physiology [M]. Yangling，Shaanxi：Northwest Agriculture and Forestry University Press，2006：209.

[24] 王艳哲，崔彦宏，张丽华，等. 玉米花粉活力测定方法的比较研究[J]. 玉米科学，2010，18(3)：173-176.
WANG Y Z，CUI Y H，ZHANG L H，et al. Comparative study on methods for testing pollen viability of maize[J]. Journal of Maize Sciences，2010，18(3)：173-176.

[25] 苏明，吴佳瑞，洪自强，等. 西北半干旱区马铃薯块茎淀粉形成及产量对磷肥减量的响应[J]. 作物学报，2025，51(3)：713-727.
SU M，WU J R，HONG Z Q，et al. Response of potato tuber starch formation and yield to phosphorus fertilizer reduction in semi-arid area of northwest China[J]. Acta Agronomica Sinica，2025，51(3)：713-727.

[26] 缪乃耀，唐设，陈文珠，等. 氮素粒肥缓解水稻灌浆期高温胁迫的生理机制研究[J]. 南京农业大学学报，2017，40(1)：1-10.
MIAO N Y，TANG S，CHEN W Z，et al. Research of nitrogen granular fertilizer alleviating high temperature stress at rice grain filling stage and its physiological mechanism[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2017，40(1)：1-10.

[27] 蔡丰乐，马昕，王帅丽，等. 氮素对高温胁迫下玉米籽粒发育的调控效应[J]. 华北农学报，2022，37(3)：119-127.
CAI F L，MA X，WANG S L，et al. Effect regulating of nitrogen on grain development of maize under heat stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2022，37(3)：119-127.

[28] 刘洪展，郑风荣，赵世杰. 高温胁迫下氮素营养对小麦幼苗叶片中活性氧代谢的影响[J]. 福建农业学报，2006，21(2)：168-172.
LIU H Z，ZHENG F R，ZHAO S J. Effects of nitrate nutrition on active oxygen metabolism in the leaves of wheat seedlings under heat-stress condition[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences，2006，21(2)：168-172.

[29] NIU Y，XIANG Y. An overview of biomembrane functions in plant responses to high-temperature stress[J]. Frontiers in Plant Science，2018，9：915.

[30] 穆心愿，马智艳，卢良涛，等. 授粉期高温胁迫对夏玉米植株形态、叶片光合及产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2024，32(1)：106-118.
MU X Y，MA Z Y，LU L T，et al. Effects of high temperature stress during pollination on morphology，leaf photosynthesis and yield of summer maize plants[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture，2024，32(1)：106-118.

[31] 许艳秋. 灌浆温度与氮肥及其互作对稻米品质和茎鞘非结构性碳水化合物转运的影响[D]. 杭州：浙江大学，2022.
XU Y Q. Effects of grain filling temperature，nitrogen fertilizer and their interaction on rice quality and non-structural carbohydrate transport in stem and sheath[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2022.

[32] 班文慧. 温度与氮肥互作对旱地马铃薯块茎淀粉及产量形成和氮素利用效率的影响研究[D]. 银川：宁夏大学，2022.
BAN W H. Study on the effect of temperature and nitrogen fertiliser interactions on starch and yield formation and nitrogen use efficiency of dryland potato tubers[D]. Yinchuan：Ningxia University，2022.

[33] 任寒，刘鹏，董树亭，等. 高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展[J]. 玉米科学，2019，27(5)：109-115.
REN H，LIU P，DONG S T，et al. Research advancements of effect of high temperature stress on growth and development of maize[J]. Journal of Maize Sciences，2019，27(5)：109-115.

[34] 银敏华，李援农，李昊，等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(6)：129-138.
YIN M H，LI Y N，LI H，et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(6)：129-138.

[35] 王瑞. 温度与施氮量互作对玉米产量及品质形成的调控效应[D]. 河北秦皇岛：河北科技师范学院，2024.
WANG R. Regulation effect of interaction between temperature and nitrogen application rate on maize yield and quality formation[D]. Qinhuangdao，Hebei：Hebei Normal University of Science & Technology，2024.

[36] 尹梅，王贵宝，陈华，等. 控释尿素对云南旱地玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2015，43(11)：152-158.
YIN M，WANG G B，CHEN H，et al. Effects of controlled-release urea on yield and nitrogen utilization rate of maize in arid area of Yunnan[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2015，43(11)：152-158.

[37] 蔡丰乐. 施氮量对高温胁迫下玉米光合特性和籽粒发育的调控效应[D]. 郑州：河南农业大学，2022.
CAI F L. Regulation effect of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and grain development of maize under high temperature stress[D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2022.

(责任编辑：屈李纯)