

马晨晨,梁小蕊,张前进,等. 玉米杂交种及其亲本自交系耐高温性综合分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(13):80-89.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.13.011

玉米杂交种及其亲本自交系耐高温性综合分析

马晨晨^{1,2}, 梁小蕊^{1,2}, 张前进^{1,2}, 叶飞宇^{1,2}, 庞芸芸¹, 张新^{1,2}, 鲁晓民^{1,2}, 曹丽茹^{1,2}

(1. 河南省农业科学院粮食作物研究所,河南郑州 450002; 2. 神农种业实验室,河南郑州 450002)

摘要:为了筛选出耐高温性较强的玉米杂交种和自交系,以 7 个杂交种及其亲本 14 个玉米自交系为材料,在正常生长和高温胁迫条件下测定玉米株高、穗位高、叶绿素含量、净光合速率(P_n)、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白(SP)含量、脯氨酸(Pro)含量、抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性、玉米产量等 11 个指标,并利用隶属函数值法、主成分分析、灰色关联度等对耐高温性进行综合评价。结果表明,高温胁迫下玉米植株的株高、穗位高均上升,叶绿素含量下降,净光合速率降低,MDA、SP、Pro 大量积累,SOD、POD、CAT 活性大幅度上升,玉米百粒重均显著降低。利用高温系数相关性与主成分分析、关联度分析,得出 POD 活性、净光合速率、MDA 含量、SP 含量、叶绿素含量、株高、SOD 活性、Pro 含量、CAT 活性可作为评价玉米耐高温能力的重要指标;运用综合隶属函数值作为核心评价参数进行聚类筛选,得到郑 3733、郑 8713、郑 V931、郑 K9713 等耐高温自交系以及郑单 819、郑单 988、郑单 6161 等耐高温杂交品种。

关键词:玉米;耐高温性指标;隶属函数;相关性分析;主成分分析

中图分类号:S513.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)13-0080-10

玉米是世界上最重要的粮食作物之一,也是我国第一大粮食作物,在全国范围内广泛种植,其种植面积与总产量仅次于美国,在国民经济中占有十分重要的地位。随着时代的进步与农业技术的革新,玉米的种植面积实现了前所未有的扩张;玉米

不仅是饲料作物,还是食品、医药、化工中不可或缺的重要原材料,确保玉米的高产稳产乃至增产具有重要意义^[1-2]。玉米在生长过程中受多种环境因素的影响,其中温度是极其重要的影响因子;合适的温度是玉米实现高产稳产的必要条件之一,而极端温度(过低或过高)会对玉米的生长发育造成不良影响。随着全球温室效应的日益严峻,气候变暖已成为不可逆转的趋势^[3]。极端高温天气频繁出现,导致玉米植株生长发育不良、产量下降或品质降低等问题,对玉米的生长构成了严峻的挑战。前人研究发现,我国夏玉米产区的高温极端阈值温度为 36℃,极端高温每升高 1℃,玉米产量下降 226.62 kg/hm²;在有利的生长条件下,温度每升高 1℃,玉米产量降低 1%^[4-5]。异常高温已成为制约

收稿日期:2024-06-25

基金项目:河南省农业科学院自主创新项目(编号:2023ZC011);河南省科技研发计划联合基金重点项目(编号:232301420023);河南省玉米产业技术体系建设专项(编号:HARS-22-02-G1)。

作者简介:马晨晨(1998—),女,河南周口人,硕士,研究实习员,主要从事玉米遗传育种。E-mail:mchenchen1017@163.com。

通信作者:曹丽茹,博士,副研究员,主要从事玉米抗逆基因挖掘及种质创制和新品种选育,E-mail:caoliru008@126.com;鲁晓民,博士,研究员,主要从事高产优质抗逆宜机收玉米新品种选育,E-mail:luxiaomin2004@163.com。

[35]王丽芳,康娟,马耕,等. 农田施氮对冬小麦产量、根-冠氮素积累及其利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(11):1403-1408.

[36]覃潇敏,蒋娟娟,韦巧云,等. 轮作与施用生物有机肥对菠萝莲作土壤微生物特性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(12):50-57.

[37]金江,黄依妮,刘鸿宇,等. 减施氮肥及玉米间作绿肥对混合饲草产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(9):61-69.

[38]王霜. 施氮和棉花密度配置对枣棉间作系统土壤温室气体排放的影响[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2024.

[39]崔荣霖. 减量施氮下甘蔗/大豆间作对土壤硝化和反硝化微生物丰度的影响研究[D]. 南宁:广西大学,2024.

[40]胡丹,李培楚,康丽霞,等. 抑制剂包膜尿素对石灰性土壤硝化及相关酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(15):231-238.

[41]杨德任,朱原立,李书玲,等. 酚酸对桉树纯林和混交林土壤养分有效性的影响[J]. 森林与环境学报,2023,43(6):579-587.

[42]张广彩,李菁,梁兆君,等. 不同花生轮作模式对土壤酶活性的影响[J]. 花生学报,2024,53(3):21-27,41.

[43]张斯佳,杨杰,赵帅,等. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响[J]. 中国农业科学,2025,58(2):238-251.

农作物生产的主要非生物逆境胁迫之一^[6]。因此,研究玉米响应高温胁迫的生理机制,培育耐高温品种,是减轻高温胁迫对作物影响的最有效方法。

当植株在生长发育阶段遭遇高温胁迫时,植物体内的生理活动、器官功能以及基因表达均会受到不同程度的影响,从而导致作物产量下降^[7]。研究表明,高温胁迫会导致玉米叶片伸长速率变慢,叶面积减小^[8-9];玉米叶绿素含量降低、光合系统受到干扰,叶片的气孔导度降低,植物的光合速率下降等^[10]。植物在应对各种逆境胁迫时,其核心防御与适应机制高度依赖细胞膜系统的强健与稳定。在高温胁迫下,细胞膜系统的稳定性与植株整体抗逆性之间存在着一种直接且显著的正向关联。高温胁迫可诱导 POD、CAT、SOD 等酶活性增强,对细胞膜起保护作用;同时,细胞质内的渗透调节物质脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白(SP)含量也随之增加^[11]。在水稻的研究中可观察到一系列耐高温性生理反应的迹象,包括细胞膜透性增强、Pro 积累以及 POD、CAT、SOD 活性增强,这些变化很可能是水稻为了应对高温胁迫而采取的自我保护和适应机制^[12]。

目前关于玉米杂交种耐热性评价的指标体系和方法尚不完善,相关的研究报道也较少。与单一指标相比,利用间接评价方法中的耐高温隶属函数来鉴定品种间的抗性比较,是被大多数学者所认可的。本研究利用 14 份玉米自交系及其组配的 7 个组合为试验材料,在玉米雌雄生殖器官发育的敏感时期,实施精准的人工模拟增温处理,测定生理生化相关性状来评价玉米的耐高温性,旨在为极端高温条件下的大田生产提供优异种质资源及杂交组合,并初步阐述耐高温自交系与杂交组合响应高温的生理变化趋势。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为郑单 958、郑单 988、郑单 819、郑单 6161、郑单 6153、先玉 335、登海 605 7 个栽培品种及其亲本郑 58、昌 7-2、郑 63、郑 36、郑 K9713、郑 8713、郑 5831、郑 6722、郑 V931、郑 3733、PH6WC、PH4CV、DH351、DH382 14 个自交系(表 1)。

1.2 种植方式及胁迫处理

试验材料于 2020 年在河南省农业科学院原阳基地种植,采用自制塑料大棚模拟高温环境,温室

表 1 玉米品种及亲本

品种名称	亲本名称
郑单 958	郑 58 昌 7-2
郑单 988	郑 63 郑 36
郑单 819	郑 K9713 郑 8713
郑单 6161	郑 5831 郑 6722
郑单 6153	郑 V931 郑 3733
先玉 335	PH6WC PH4CV
登海 605	DH351 DH382

长 20 m、宽 12 m、高 4 m,由钢管搭建并固定于田间。温室四周覆盖透光率 $\geq 95\%$ 的塑料薄膜,以确保内部温度的快速提升与维持。温室两侧预留 20% 的薄膜作为开合区域,用于气体交换。在玉米生长发育敏感期(吐丝前 8 d 至吐丝后 8 d),每天 10:00—17:00 进行高温处理(HT),其余时间进行通风降温,处理结束后将薄膜拆除。以自然生长条件下的玉米植株为对照组(CK),设 3 个小区重复。高温处理结束后,测定各关键生理生化指标,整个生育期保证肥水分供应充足。

1.3 生理指标的测定

采用丙酮法测定叶绿素(Chl)含量;采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性。采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量;利用磺基水杨酸提取-茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量,于 520 nm 波长下比色。每个指标设置 3 次生物学重复。

1.4 耐高温系数

耐高温系数 = 高温处理测定值/对照测定值。

1.5 隶属函数值的计算

隶属函数值的计算公式:

$$\hat{X}_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})。$$

如果某一指标与耐高温性呈负相关则采用以下公式计算:

$$\hat{X}_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})。$$

平均隶属函数值:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{X}_{ij}$$

式中： X_{ij} 是指*i*品种*j*性状的耐高温系数。 X_{jmin} 、 X_{jmax} 分别是指*j*性状中耐高温系数的最小值、最大值，它们为评估各品种间的相对耐高温性能提供参照基准。 \hat{X}_{ij} 为*i*品种*j*性状的隶属函数值，通过累加每个品种在各性状上的隶属函数值 X_{ij} ，再求其平均隶属函数值(\bar{X}_i)，综合评价各个品种的耐高温强弱。 \bar{X}_i 值越大，说明该品种的耐高温性能越为优异，表明其在高温条件下能够保持较高的生长稳定性和产量潜力。

1.6 数据分析

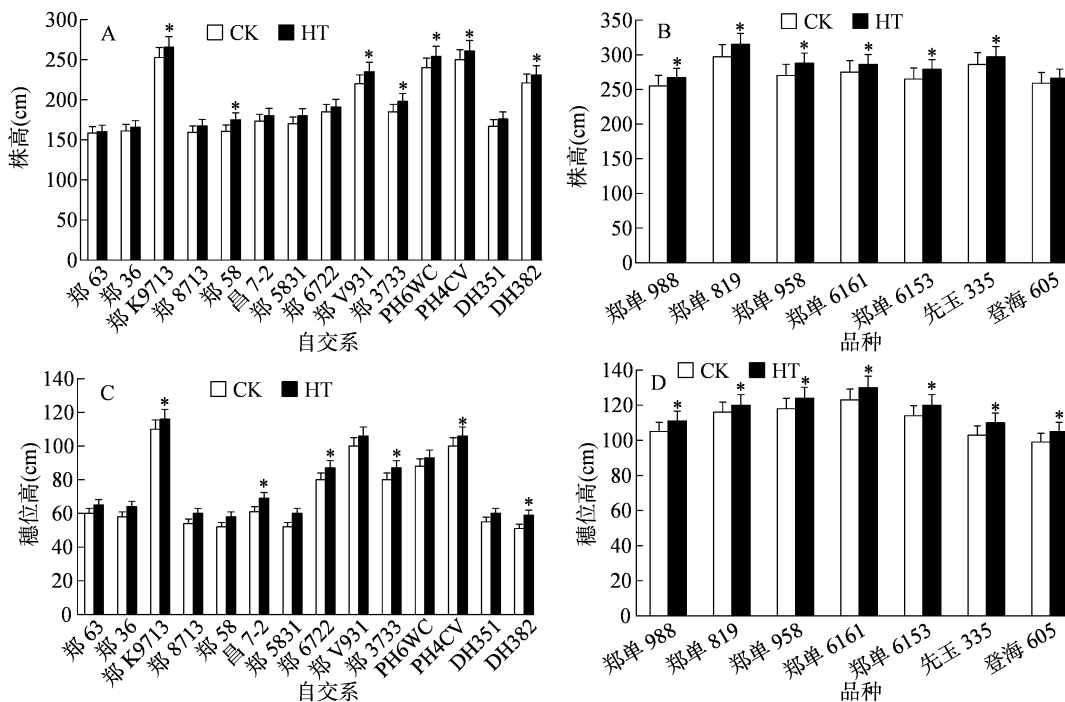
利用 Excle 2010 进行数据分析，SPSSAU 进行相关性和主成分分析。试验数据均进行 3 次重复，并用“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 Duncan’s 新复极差法进行差异显著性分析，利用 SPSS 22.0 对 7 个杂交种及其亲本 14 个玉米自交系进行系统聚类

分析，遗传距离采用欧氏距离。

2 结果分析

2.1 高温胁迫对玉米植株株高与穗位高的影响

高温胁迫对玉米植株生长发育的影响涉及各个方面^[13]，其株高、穗位高是较为明显的形态特征。由图 1 可知，正常生长条件下，自交系的株高为 158.5 ~ 252.6 cm，穗位高为 51.0 ~ 110.0 cm；高温条件下自交系的株高、穗位高分别为 160.3 ~ 265.6 cm、58.0 ~ 116.0 cm，分别比对照增加 1.1% ~ 9.1%、5.5% ~ 15.7%。杂交种在高温条件下株高、穗位高均有不同程度的增高，其中郑单 958 的株高升幅最大，其次是郑单 819；先玉 335 的穗位高升幅最大，其次是登海 605(图 1)。由此可见，高温条件会导致玉米株高、穗位高呈上升趋势，不同品种的升高幅度存在差异。



*、** 分别表示每个材料对照与高温胁迫之间在 0.05、0.01 水平存在显著、极显著差异。下图同

图1 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系株高、穗位高的影响

2.2 高温胁迫对玉米叶绿素的影响

在植物的光合作用机制中，叶绿素含量在光吸收、传递、转换过程中起重要作用，能直接反映光合能力的强弱，是评估植物生产力的关键参数之一。由图 2 可知，在正常生长条件下，14 个玉米自交系叶绿素含量为 27.0 ~ 30.8 mg/g；高温条件下，叶绿素含量为 13.0 ~ 20.1 mg/g，较正常生长条件下降

30.6% ~ 54.2%。正常生长条件下，自交系的叶绿素含量之间无显著差异，高温胁迫后叶绿素含量显著降低。其中，降幅最小的是郑 3733，其次是郑 6722、郑 8713；降幅最大的是 PH6WC，其次是 PH4CV、DH382。正常生长条件下，杂交种的叶绿素含量之间无显著差异；高温胁迫后，先玉 335 叶绿素含量最低，其次是登海 605、郑单 958，其中先玉 335

叶绿素含量下降幅度最大;叶绿素含量下降幅度最小的是郑单 819,其次是郑单 6153。由此可见,高温

胁迫后玉米叶片中的叶绿素含量均显著下降,不同品种叶片的叶绿素含量降幅存在差异。

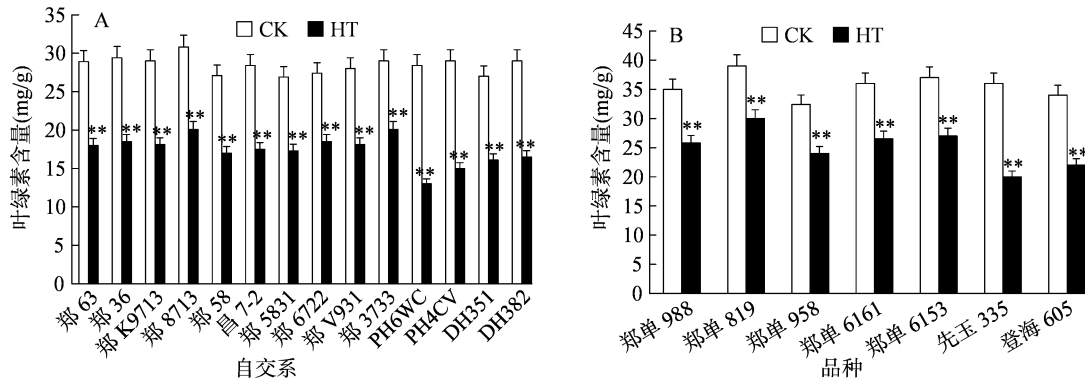


图2 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系叶绿素含量的影响

2.3 高温胁迫对光合作用的影响

昼夜高温和极端短期高温均会影响植株的光合作用,危害植株生长。由图 3 可知,在正常生长条件下,14 个玉米自交系的净光合速率为 24.0 ~ 28.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,高温胁迫下净光合速率为 12.0 ~ 20.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,净光合速率均显著下

降,下降幅度为 23.7% ~ 50.0%。其中,郑 8713 降幅最小,PH6WC 降幅最大。杂交种在遇高温胁迫后,净光合速率呈现不同程度的下降,降幅为 21.9% ~ 36.4%。其中郑单 819 降幅最小,先玉 335 降幅最大。由此可见,高温胁迫下不同品种的净光合速率均降低,降幅也因品种不同而存在差异。

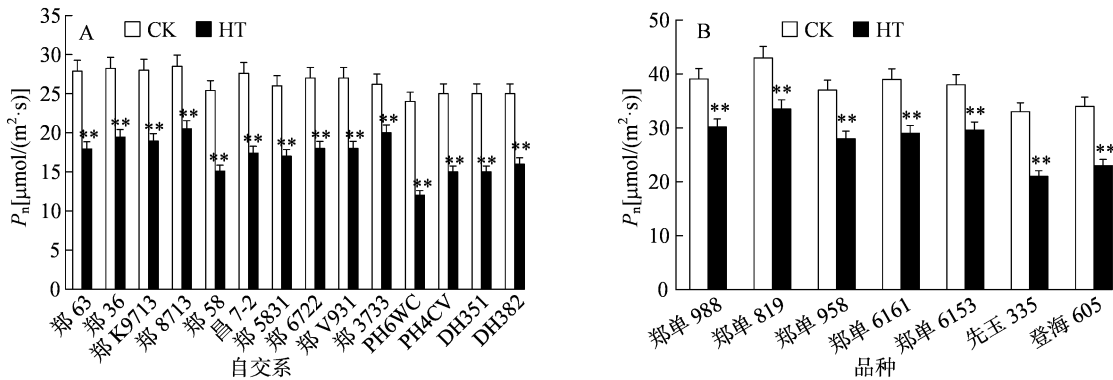


图3 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系净光合速率的影响

2.4 高温胁迫对玉米膜脂透性的影响

在高温条件下,叶片细胞膜会受到不同程度的损伤;MDA 含量是鉴定细胞膜损伤程度的重要生理指标。由图 4 - A、图 4 - B 可知,在正常生长条件下,不同自交系以及杂交种间的 MDA 含量无显著差异;遭受高温胁迫后所有自交系和杂交种 MDA 含量均显著升高。在 14 个自交系中,PH6WC 的 MDA 含量最高,升幅最大,是正常条件的 1.8 倍,其次是郑 58、郑 63;而郑 8713 升幅最小,是正常条件下的 1.4 倍,其次是郑 3733、郑 36、郑 6722。在杂交组合中,先玉 335 的 MDA 含量最高,升幅最大,其次是登海 605、郑单 958;而郑单 819 的 MDA 含量最低,升幅也最小,其次是郑单 6161。由此可见,高温胁迫

后 MDA 含量均显著上升,上升幅度不同,说明不同自交系和杂交种面对高温胁迫时,其叶片细胞膜受到的破坏程度不同。

脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物质参与植物体内渗透电势的调节,维持细胞膨胀的平衡与稳定,使植物体内各代谢过程保持正常。由图 4 - C 至图 4 - F 可知,在正常生长条件下,不同自交系和杂交种的可溶性蛋白、脯氨酸含量之间无显著差异;高温条件下,所有自交系和杂交种可溶性蛋白、脯氨酸含量总体显著升高。自交系中,郑 8713、郑 36、郑 V931、郑 5831 升幅较大,而 PH6WC、PH4CV 升幅较小。杂交组合中,郑单 819 升幅最大,先玉 335 升幅最小。这表明,高温胁迫后,植物为维持体

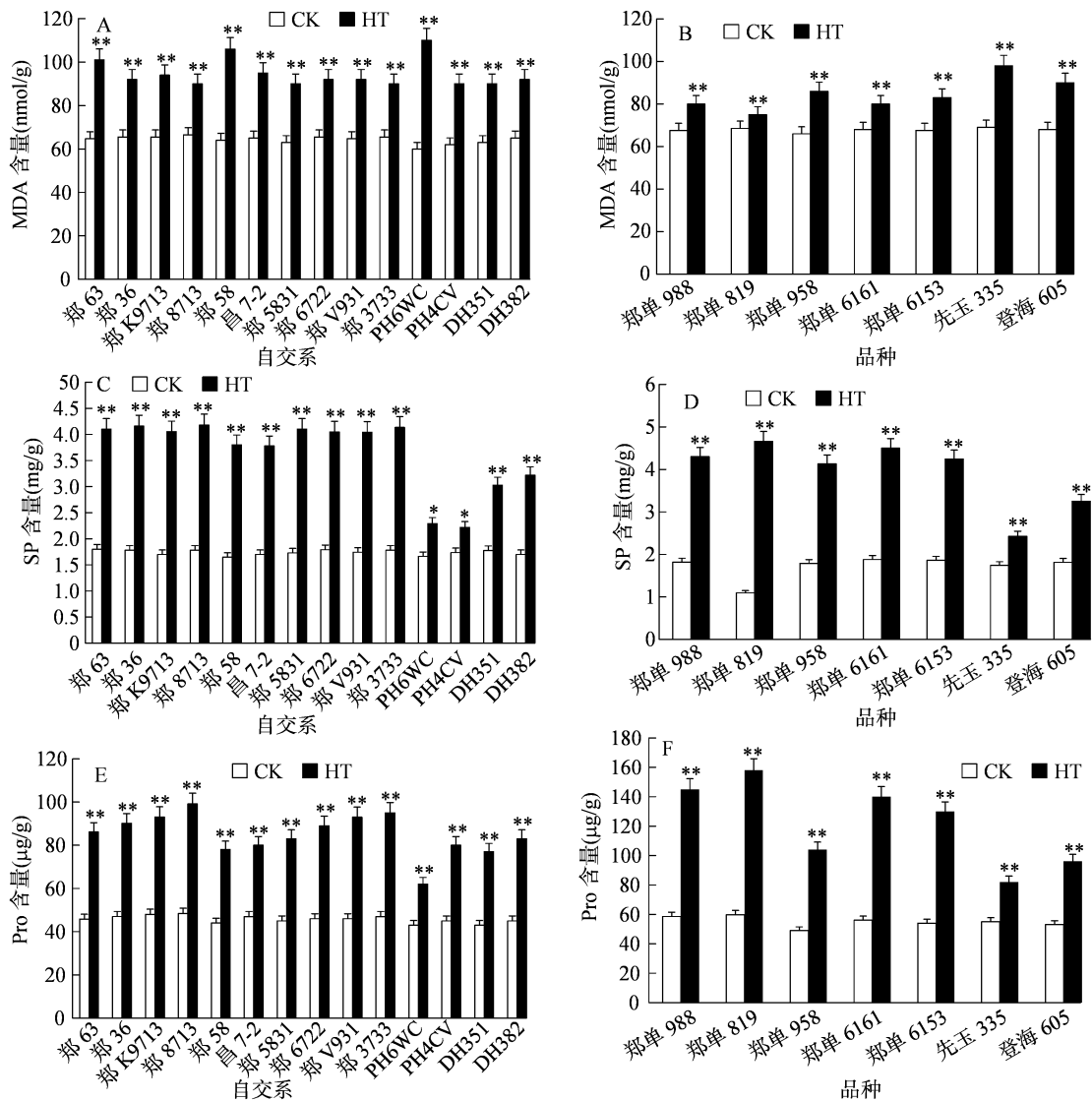


图4 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系玉米膜脂透性的影响

内的正常代谢过程,提高了细胞内渗透调节物质的积累;但不同自交系和杂交种对高温的抵抗能力不同,脯氨酸、可溶性蛋白的积累量也不同。

2.5 高温胁迫对玉米抗氧化酶活性的影响

在植物应对外界胁迫时,抗氧化酶活性是反映其抵抗能力的重要指标之一。当遭受逆境胁迫时,植物组织细胞会产生大量的活性氧(ROS),活性氧的过度产生会造成严重的负面影响。高温胁迫打破植物体内 ROS 与 SOD、CAT、POD 等保护酶系统的动态平衡,导致 ROS 大量累积,造成氧化伤害,从而影响植株的正常生长发育。

在正常生长条件下,各自交系间 SOD、POD、CAT 活性无明显差异;高温胁迫后,各自交系和杂交种间酶活性有不同幅度的变化。除自交系 PH6WC、杂交组合先玉 335 的 SOD、POD 活性均降

低外,其他自交系和杂交组合中的酶活性均升高,其中,郑 8713、郑单 819 的酶活性均最高(图 5 - A 至图 5 - D)。高温胁迫后,各自交系和杂交组合的 CAT 活性均显著升高。自交系中,郑 8713 的 CAT 活性最高,是正常生长条件的 2.2 倍;PH6WC 的 CAT 活性最低,但仍是正常生长条件的 1.8 倍。杂交组合中,郑单 819 的 CAT 活性最高,是正常生长条件的 2.6 倍;先玉 335 的 CAT 活性最低,是正常生长条件的 2.0 倍(图 5 - E、图 5 - F)。可见,由于不同自交系和杂交种对高温胁迫的抵抗能力不同,酶活性变化幅度也不同。

2.6 高温胁迫对不同品种玉米产量的影响

籽粒灌浆过程是确保作物最终产量和粒重的核心,与灌浆速率的高低及持续时间的长短紧密关联。然而,高温条件不仅会削弱籽粒灌浆速率,还

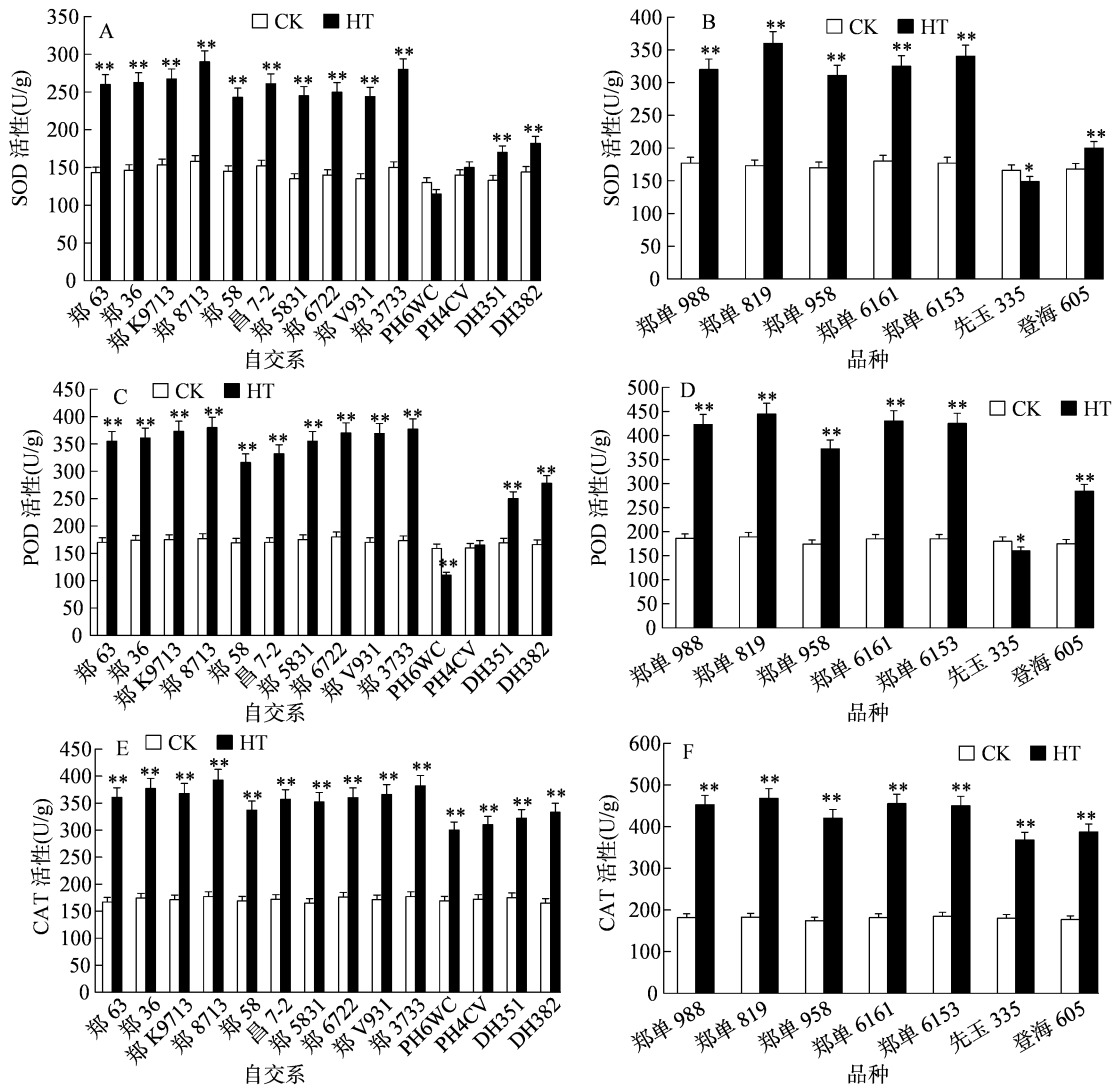


图5 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系抗氧化酶活性的影响

会缩短灌浆周期,导致籽粒重量的减少,进而显著影响作物产量。正常条件下自交系的百粒重为 23.6 ~ 29.1 g,高温条件为 20.1 ~ 23.7 g,降幅为 7.1% ~ 24.7%;其中,PH6WC 的降幅最大,郑 K9713 的降幅最小。杂交种的百粒重降幅为

13.0% ~ 21.5%;先玉 335 的降幅最大,其次是登海 605,郑单 819 的降幅最小(图 6)。这表明,高温条件下不同自交系和杂交种的百粒重均下降,且降幅存在差异。

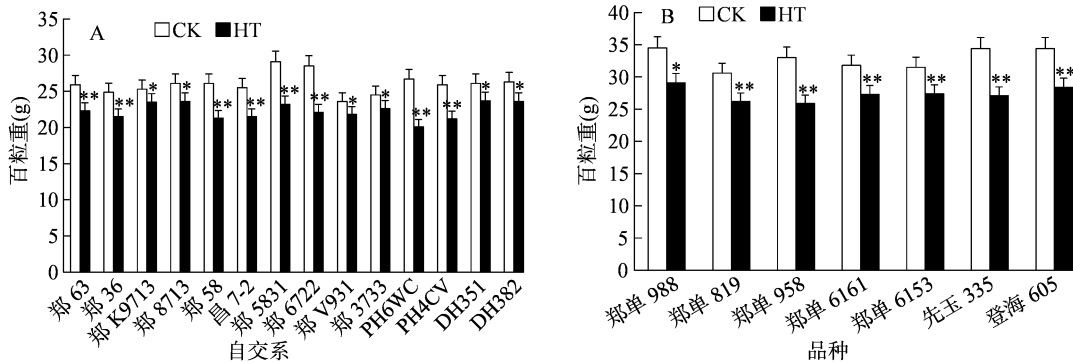


图6 高温胁迫对不同玉米品种及其亲本自交系产量的影响

2.7 杂交种及自交系各指标耐高温系数相关性与主成分分析

利用 SPSS 软件对 11 个指标进行相关性分析(表 2)。穗位高与 CAT 活性呈显著负相关;百粒重与 POD 活性呈显著正相关;叶绿素含量与净光合速率、MDA 含量、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸含量均呈极显著正相关;净光合速率与 MDA 含量、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸含量均呈极显著正相关;MDA 含量与 SOD 活性呈显著正相关,与 POD 活性、SOD 活性、脯氨酸含量均呈极显著正相关;可溶性蛋白含量与 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸含量均呈极显著正相关;SOD 活性与 POD 活性、

CAT 活性、脯氨酸含量呈极显著正相关;POD 活性与 CAT 活性、脯氨酸含量呈极显著正相关;CAT 活性与脯氨酸含量呈极显著正相关。

为明确响应高温胁迫的关键性指标,试验对各指标进行主成分分析,共提取出 3 个主成分,其对应的加权后方差解释率(权重)依次为 72.76%、14.92%、12.32%;主成分 1 的权重远远高于主成分 2、主成分 3(表 3)。在主成分 1 中,叶绿素含量、净光合速率、POD 活性、CAT 活性的载荷系数 ≥ 0.9 ,MDA 含量、可溶性蛋白含量、SOD 活性、脯氨酸含量的载荷系数在 0.7~0.9 之间,表明这 8 个指标与植株的耐热性有更加密切的关联性。

表 2 不同玉米品种及其亲本自交系各指标耐高温系数相关性分析

指标	相关系数										
	株高	穗位高	百粒重	叶绿素含量	净光合速率	MDA 含量	可溶性蛋白含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	脯氨酸含量
株高	1.000										
穗位高	0.008	1.000									
百粒重	0.069	0.069	1.000								
叶绿素含量	0.056	-0.287	0.271	1.000							
净光合速率	0.028	-0.307	0.338	0.930**	1.000						
MDA 含量	-0.173	-0.245	0.378	0.780**	0.803**	1.000					
可溶性蛋白含量	-0.126	-0.149	0.26	0.631**	0.654**	0.423	1.000				
SOD 活性	0.117	-0.106	0.272	0.795**	0.735**	0.489*	0.822**	1.000			
POD 活性	0.059	-0.003	0.460*	0.851**	0.789**	0.583**	0.763**	0.925**	1.000		
CAT 活性	-0.001	-0.471*	0.099	0.860**	0.859**	0.708**	0.640**	0.736**	0.702**	1.000	
脯氨酸含量	0.109	-0.361	0.269	0.859**	0.784**	0.631**	0.674**	0.741**	0.750**	0.856**	1.000

注: * 代表显著相关($P < 0.05$); ** 代表极显著相关($P < 0.01$)。

表 3 不同玉米品种及其亲本自交系各指标耐高温系数的主成分分析

名称	载荷		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3
株高	0.022	0.250	0.944
穗位高	-0.310	0.782	-0.188
百粒重	0.374	0.572	-0.153
叶绿素含量	0.952	-0.056	0.043
净光合速率	0.934	-0.065	-0.015
MDA 含量	0.773	-0.121	-0.283
可溶性蛋白含量	0.786	0.134	-0.136
SOD 活性	0.878	0.220	0.108
POD 活性	0.900	0.346	-0.011
CAT 活性	0.902	-0.316	0.067
Pro 含量	0.899	-0.106	0.146
权重	72.76%	14.92%	12.32%

2.8 各指标耐高温系数的关联度分析

通过灰色关联度分析发现,高温胁迫后,各个指标增减幅度与其百粒重的关联度依次为 POD 活性 > 净光合速率 > MDA 含量 > 可溶性蛋白含量 > 叶绿素含量 > 株高 > SOD 活性 > 脯氨酸含量 > CAT 活性 > 穗位高;穗位高与百粒重的关联度最小(0.650)(表 4)。说明玉米在遭受高温胁迫时,这些指标均对玉米百粒重产生影响,其中 POD 活性、净光合速率对百粒重影响较大,与玉米耐高温能力密切相关。

2.9 杂交种及其亲本自交系耐高温性综合分析

利用单一指标对作物的耐逆性进行评价存在一定的局限性,需要综合考虑多个指标并使用多种方法对作物进行有效的抗逆性评价^[14]。利用隶属

表 4 不同玉米品种及其亲本自交系各个指标与产量的关联度及排序

指标	关联度	排名
POD 活性	0.745	1
净光合速率	0.722	2
MDA 含量	0.706	3
可溶性蛋白含量	0.701	4
叶绿素含量	0.695	5
株高	0.691	6
SOD 活性	0.690	7
Pro 含量	0.664	8
CAT 活性	0.652	9
穗位高	0.650	10

函数,综合株高、穗位高、百粒重、叶绿素含量、净光合速率、丙二醛含量等指标对 14 个自交系和 7 个杂交种进行耐高温综合评价,发现郑单 819、郑单 988、

郑单 6161、郑单 6153、郑 3733 的隶属函数值 >0.7 ; 郑 8713、郑 V931、郑单 958、郑 5831、郑 K9713、郑 36、昌 7-2、郑 6722、郑 63 的隶属函数值在 $0.5 \sim 0.7$ 之间;DH382、郑 58、登海 605、DH351、PH4CV、先玉 335、PH6WC 的隶属函数值 <0.5 (表 5)。

基于玉米耐高温隶属函数值评估体系,运用最短距离法对 14 个玉米自交系和 7 个杂交种 21 份材料进行聚类,设定欧氏距离为 10,这些材料被划分成 4 个不同的耐高温类群(图 7)。其中,第 1 类群为高耐热类型,包含郑单 819、郑单 6161、郑单 988、郑单 6153;第 2 类群为中耐热类型,包括郑 K9713、郑 8713、郑 V931、郑 3733、郑 63、郑 36、郑 6722、昌 7-2、郑 5831、郑单 958;第 3 类群为弱耐热类型,包括 DH351、DH382、登海 605、郑 58;第 4 类群为热敏感类型,包括 PH4CV、先玉 335、PH6WC。

表 5 不同玉米品种及其亲本自交系各性状隶属函数平均值

名称	隶属函数值											均值	排名
	株高	穗位高	百粒重	叶绿素含量	净光合速率	MDA 含量	可溶性蛋白	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	脯氨酸含量		
郑 63	0.00	0.40	0.61	0.47	0.51	0.37	0.84	0.76	0.84	0.38	0.42	0.51	14
郑 36	0.20	0.56	0.63	0.49	0.67	0.58	0.92	0.74	0.83	0.38	0.45	0.59	11
郑单 988	0.45	0.19	0.52	0.79	0.97	0.88	0.96	0.84	0.95	1.00	0.98	0.77	2
郑 K9713	0.50	0.16	1.00	0.47	0.63	0.54	0.99	0.70	0.87	0.36	0.47	0.61	10
郑 8713	0.47	0.63	0.86	0.55	0.78	0.65	0.94	0.78	0.88	0.44	0.57	0.69	6
郑单 819	0.62	0.00	0.59	0.88	1.00	1.00	0.94	0.98	1.00	0.82	0.82	0.79	1
郑 58	1.00	0.66	0.36	0.38	0.34	0.24	0.00	0.65	0.71	0.19	0.31	0.44	16
昌 7-2	0.37	0.79	0.51	0.40	0.47	0.50	0.77	0.68	0.76	0.28	0.25	0.53	12
郑单 958	0.69	0.13	0.18	0.71	0.92	0.41	0.89	0.77	0.87	0.66	0.64	0.63	8
郑 5831	0.60	0.98	0.25	0.53	0.55	0.55	0.97	0.76	0.81	0.35	0.38	0.61	9
郑 6722	0.26	0.43	0.13	0.62	0.59	0.58	0.82	0.73	0.82	0.25	0.47	0.52	13
郑单 6161	0.36	0.18	0.60	0.79	0.87	0.89	1.00	1.00	0.98	0.73	1.00	0.76	3
郑 V931	0.71	0.21	0.97	0.53	0.59	0.56	0.90	0.75	0.89	0.35	0.55	0.64	7
郑 3733	0.74	0.43	0.96	0.67	0.94	0.62	0.90	0.80	0.90	0.37	0.55	0.72	5
郑单 6153	0.52	0.15	0.66	1.00	0.99	0.82	0.84	0.85	0.97	0.68	0.91	0.76	4
PH6WC	0.59	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.02	0.32	0.14	21
PH4CV	0.41	0.21	0.37	0.17	0.36	0.52	0.27	0.15	0.20	0.05	0.00	0.25	19
先玉 335	0.34	0.27	0.20	0.28	0.49	0.56	0.03	0.01	0.12	0.25	0.05	0.24	20
DH351	0.53	0.46	0.88	0.39	0.36	0.55	0.07	0.14	0.47	0.13	0.33	0.39	18
DH382	0.43	1.00	0.82	0.36	0.50	0.57	0.32	0.12	0.59	0.00	0.38	0.46	15
登海 605	0.20	0.21	0.41	0.54	0.63	0.69	0.41	0.25	0.65	0.41	0.35	0.43	17

3 讨论与结论

高温条件下玉米的生理生化特性会发生变化,相同条件下不同品种的耐热性表现存在差异。叶

绿素是吸收、传递光能最主要的色素,高温胁迫会引起叶绿素含量和净光合速率的降低,从而使叶片中光合产物减少^[15-16]。高温胁迫会损伤小麦和玉米中的光合色素^[17-18]。于康珂等的研究表明,在玉

米 9 叶期,高温胁迫叶片的 SPAD 值显著低于正常生长条件^[19]。本研究中,高温胁迫下玉米的叶绿素

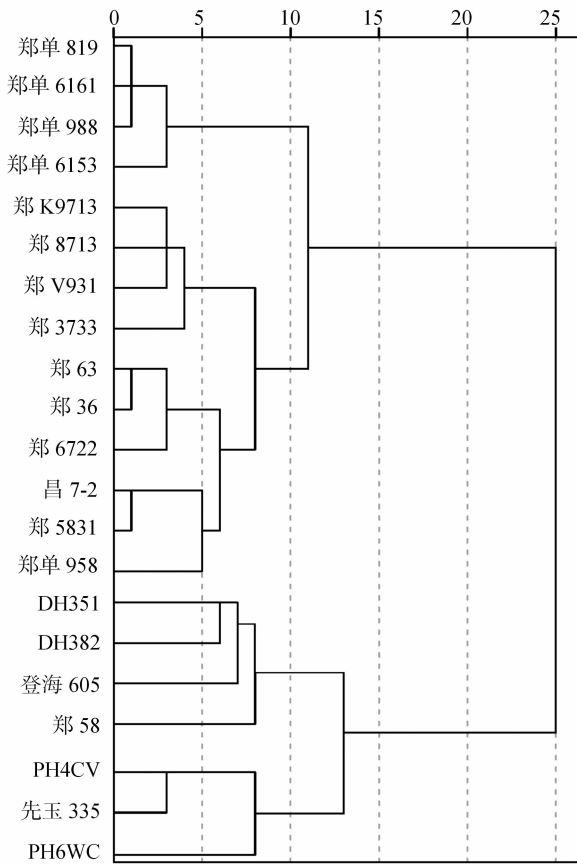


图7 不同玉米品种及其亲本自交系聚类分析

含量比正常生长条件下下降 30.6% ~ 54.2%,净光合速率下降 23.7% ~ 50.0%,与前人的研究结果^[20]一致。

MDA 是质膜过氧化的主要产物,其含量反映质膜过氧化程度,是评价作物抗逆性的重要生理指标之一。高温胁迫使玉米叶片中的 MDA 含量显著升高;相关研究表明,高温处理下玉米叶片 MDA 含量呈上升趋势,且会加剧玉米过氧化的程度^[21]。本研究结果表明,高温胁迫后所有自交系和杂交种的 MDA 含量均显著升高,14 个自交系中 PH6WC 的 MDA 含量上升幅度最大,郑 8713 上升幅度最小;杂交品种中,先玉 335 的 MDA 含量的升幅最大,郑单 819 的升幅最小。说明高温条件下,自交系 PH6WC 和杂交品种先玉 335 受到的迫害较强,耐高温能力较弱;而郑 8713、郑单 819 受到的迫害较弱,耐高温能力较强。

在正常生长环境中,植物体内的 ROS 处于动态平衡状态,不影响植物的生长发育过程。然而,当植物遭遇高温胁迫时,这种平衡状态就会被打破,

ROS 大量积累,严重干扰正常的氧化磷酸化过程,并对膜系统造成损伤。为了应对这一逆境挑战,植物通过一系列生理生化机制抵抗逆境损害,其中 POD、SOD、CAT 是植物防御系统中重要的抗氧化酶^[22]。本研究表明,在高温条件下,玉米不同自交系和杂交组合的抗氧化酶活性发生明显变化。其中,自交系 PH6WC、杂交品种先玉 335 的 SOD、POD 活性下降,与余梦奇等关于高温处理后玉米 SOD、POD、CAT 活性显著下降的研究结果^[23]一致;而其他自交系和杂交品种中的酶活性均显著升高,其中郑 8713、郑单 819 酶活性最高。表明这些材料在高温胁迫下,体内抗氧化酶活性快速提升,有效清除体内活性氧,减轻高温对植株的伤害,与前人的研究结果^[24]一致;进一步说明郑 8713、郑单 819 具有较强的耐高温能力。

作物的耐高温能力不仅体现为在高温环境下的生存能力,更体现在高温下产量的稳定性^[25-26]。虽然产量降低率是最理想的耐高温指标之一,但在作物产量形成这一复杂过程中,不同性状对产量的影响程度不同^[27],作物产量是多因素交织、共同作用的结果。因此,研究作物在高温条件下的生理指标及产量性状的变化规律,筛选出评价作物耐高温能力的综合性指标,并将其运用到生产实践中具有重要意义。已有大量研究表明,隶属函数法可以利用多个变量综合验证作物的抗逆性。邹成林等利用隶属函数法对 28 份玉米自交系进行抗旱性综合评价^[28]。鲁晓民等利用隶属函数法对 17 份玉米自交系进行抗旱性鉴定^[29]。陈雷等利用隶属函数和主成分分析对 8 个花生品种花针期进行抗旱性鉴定^[30]。王安乐等以花粉败育程度、花丝伸长程度和雄花小穗的减少程度 3 个指标的乘积作为综合指标,对 816 份自交系进行耐高温鉴定^[31]。葛朝红等利用隶属函数法对 5 个种源的辣木进行综合评价^[32]。牛丽等以 10 个指标的综合值对 24 个适宜黄淮海地区种植的玉米杂交种的耐高温性进行综合评价^[33]。这些研究结果表明,采用模糊隶属函数法对作物的抗逆性进行全面评估,可有效规避仅依赖单一指标所带来的局限性与片面性。本研究利用隶属函数法综合 11 个指标筛选出了郑 3733、郑 8713、郑 V931、郑 K9713 等耐高温自交系,以及郑单 819、郑单 988、郑单 6161 等耐高温杂交品种;结合聚类分析法,将这 21 个材料分为 4 个不同的耐高温类群。

参考文献:

- [1] 赵久然,王 帅,李 明,等. 玉米育种行业创新现状与发展趋势[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(3):435-446.
- [2] 刘柏宏. 玉米杂交种瑞玉 16 的适应性评价及扩密增高增效配套技术研究[D]. 雅安:四川农业大学,2018.
- [3] 葛全胜,王 芳,陈泮勤,等. 全球变化研究进展和趋势[J]. 地球科学进展,2007,22(4):417-427.
- [4] Zhang Q, Yang Z Q. Impact of extreme heat on corn yield in main summer corn cultivating area of China at present and under future climate change[J]. International Journal of Plant Production, 2019, 13(4):267-274.
- [5] Lobell D B, Bänziger M, Magorokosho C, et al. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(1):42-45.
- [6] Prasad P V V, Boote K J, Allen L H, et al. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2/3):398-411.
- [7] 尚蓉霞,余 欣,尤翠翠,等. 水稻孕穗期干旱-高温交叉胁迫的生理适应机制[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(6):39-46,54.
- [8] 付 景,孙宁宁,刘天学,等. 高温胁迫对玉米形态、叶片结构及其产量的影响[J]. 玉米科学,2019,27(1):46-53.
- [9] Karim M A, Fracheboud Y, Stamp P. Effect of high temperature on seedling growth and photosynthesis of tropical maize genotypes[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2000, 184(4):217-223.
- [10] 吴丽倩,王 蕊,杨玉荣,等. 高温对玉米叶片衰老及产量的影响[J]. 华北农学报,2022,37(增刊1):110-115.
- [11] Zafar M M, Chattha W S, Khan A I, et al. Drought and heat stress on cotton genotypes suggested agro-physiological and biochemical features for climate resilience[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1265700.
- [12] Vettakkorumakankav N N, Falk D, Saxena P, et al. A crucial role for gibberellins in stress protection of plants[J]. Plant and Cell Physiology, 1999, 40(5):542-548.
- [13] 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):81-88,96.
- [14] 邹成林,黄开健,翟瑞宁,等. 基于隶属函数法和主成分分析评价玉米萌发期抗旱性[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):7-13.
- [15] Qi Y, Zhang Q, Hu S J, et al. Effects of high temperature and drought stresses on growth and yield of summer maize during grain filling in North China[J]. Agriculture, 2022, 12(11):1948.
- [16] 滕中华,智 丽,宗学风,等. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响[J]. 作物学报,2008,34(9):1662-1666.
- [17] Kumar Tewari A, Charan Tripathy B. Temperature - stress - induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat[J]. Plant Physiology, 1998, 117(3):851-858.
- [18] 穆心愿,马智艳,张兰薰,等. 不同耐/感玉米品种的叶片光合荧光特性、授粉结实和产量构成因素对花期高温的反应[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(1):57-71.
- [19] 于康珂,孙宁宁,齐红志,等. 不同成熟度玉米叶片光合生理对高温胁迫的响应特征及其基因型差异[J]. 河南农业科学,2017,46(5):34-38.
- [20] 李萍萍,程高峰,张佳华,等. 高温对水稻抽穗扬花期生理特性的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2010,31(2):125-130.
- [21] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等. 花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J]. 中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
- [22] Su X Y, Gao T M, Zhang P Y, et al. Comparative physiological and transcriptomic analysis of sesame cultivars with different tolerance responses to heat stress[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2022, 28(5):1131-1146.
- [23] 余梦奇,路梦莉,张雅婷,等. 灌浆期高温对玉米叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业气象,2023,44(7):599-610.
- [24] 胡秀丽,李艳辉,杨海荣,等. HSP70 可提高干旱高温复合胁迫诱导的玉米叶片抗氧化防护能力[J]. 作物学报,2010,36(4):636-644.
- [25] 安 锋,林位夫. 植物耐荫性研究的意义与现状[J]. 热带农业科学,2005,25(2):68-72.
- [26] 侯宪斌,易 强,滕 峥,等. 不同玉米种质花期对干旱和高温胁迫的响应[J]. 南方农业学报,2023,54(6):1598-1611.
- [27] 陈燕华,李经成,李荣丹,等. 基于灰色关联度分析法综合评价 24 个绿豆新品种(系)在桂南地区的田间性状表现[J]. 南方农业学报,2020,51(11):2644-2652.
- [28] 邹成林,谭 华,黄开健,等. 28 份玉米自交系抗旱性鉴定[J]. 新疆农业科学,2022,59(10):2411-2420.
- [29] 鲁晓民,曹丽茹,张前进,等. 玉米自交系不同生育期的抗旱性鉴定及生理响应机制研究[J]. 玉米科学,2020,28(2):25-32.
- [30] 陈 雷,张枫叶,贺群岭,等. 基于隶属函数法和主成分分析评价花生品种花针期抗旱性[J]. 江苏农业科学,2024,52(14):87-94.
- [31] 王安乐,陈朝辉,赵德法. 玉米自交系材料耐高温特性鉴定筛选初报[J]. 玉米科学,2004,12(4):29-30.
- [32] 葛朝红,赵 爽,师树新,等. 不同种源辣木在北方的生长及抗寒性状综合评价[J]. 华北农学报,2019,34(增刊1):124-128.
- [33] 牛 丽,刘 源,于康珂,等. 玉米杂交种苗期耐热性评价[J]. 玉米科学,2015,23(1):107-114.