



刘朋程,岳海旺,魏建伟,杨浩翔,陈淑萍,卜俊周. 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系生长发育及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(03): 25-38.

LIU Pengcheng, YUE Haiwang, WEI Jianwei, YANG Haoxiang, CHEN Shuping, BU Junzhou. Effects of high-temperature stress at the flowering stage on the growth, development and yield of maize hybrids and their parental inbred lines[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 25-38.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.03

花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系生长发育及产量的影响

刘朋程 岳海旺 魏建伟 杨浩翔 陈淑萍 卜俊周*

(河北省农林科学院 旱作农业研究所/河北省农作物抗旱研究重点实验室,河北 衡水 053000)

摘 要 为明确花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系生长发育及产量的影响,以‘衡玉7182’、‘衡玉868’、‘先玉335’和‘郑单958’及其亲本自交系为试验材料,于吐丝前7 d开始高温胁迫(HT),持续处理14 d,以同期大田正常条件为对照(CK),测定穗发育、叶片保护酶、膜脂过氧化物及产量性状指标的变化,并利用多元统计分析对4个杂交种及其亲本自交系进行评价。结果表明:1)花期高温胁迫(HT)下,除‘衡玉7182’和‘衡玉868’及其父本自交系‘H 102’和‘H 40’的单株籽粒产量、穗粒数与CK无显著差异外,‘郑单958’和‘先玉335’及其他自交系单株籽粒产量和穗粒数均显著低于CK。2)HT的‘衡玉7182’、‘衡玉868’、‘郑单958’和‘先玉335’的雄穗分枝数、雄穗干重和雌穗长度均显著低于CK,其中‘衡玉7182’和‘衡玉868’的降幅均显著低于‘郑单958’和‘先玉335’;‘H 103’、‘H 102’、‘H 35’和‘H 40’的雌雄穗干重与CK无显著差异,‘H 102’的雄穗分枝数和‘H 40’的雌穗长度与CK相比也均无显著差异。3)HT的‘衡玉7182’叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性下降不显著,‘衡玉868’的CAT活性下降幅度显著低于‘郑单958’和‘先玉335’;自交系‘H 102’叶片的SOD和CAT活性与CK相比均无显著差异,‘H 40’叶片的SOD活性与CK相比也无显著差异。4)综合相关性分析、灰色关联度分析和主成分分析发现,雄穗分枝数、穗粒数和雌穗干重可作为玉米杂交种及其亲本自交系耐热评价的主要指标。玉米自交系‘H 102’和‘H 40’的耐热性均显著优于‘昌7-2’和‘PH4CV’,具有较好的耐热性。因此,玉米自交系‘H 102’和‘H 40’可作为优良的耐热种质在育种中加以利用。

关键词 玉米;花期;高温胁迫;杂交种;亲本自交系;生长发育;产量

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2026)03-0025-14

文献标志码 A

Effects of high-temperature stress at the flowering stage on the growth, development and yield of maize hybrids and their parental inbred lines

LIU Pengcheng, YUE Haiwang, WEI Jianwei, YANG Haoxiang,
CHEN Shuping, BU Junzhou*

(Institute of Dryland Farming/Hebei Key Laboratory of Crop Drought Resistance Research, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract This study aimed to clarify the effects of high-temperature stress at the flowering stage on the growth, development and yield of maize hybrids and their parental inbred lines. Using ‘Hengyu 7182’, ‘Hengyu 868’, ‘Xianyu 335’, ‘Zhengdan 958’ and their parental inbred lines as experimental materials, high-temperature stress (HT) was initiated at 7 d before silking and maintained for 14 d with plants grown under normal field conditions

收稿日期: 2025-05-14;接受日期: 2025-07-23

基金项目: 河北省农林科学院基本科研业务费项目(2025040103)

第一作者: 刘朋程(ORCID:0009-0006-7410-7312),副研究员,主要从事玉米新品种选育及配套栽培技术研究,E-mail:15933989590@163.com

通讯作者: 卜俊周(ORCID:0009-0009-7591-832X),研究员,主要从事玉米新品种选育研究,E-mail:bujunzhou@126.com

during the same period serving as the control (CK). Changes in ear development, leaf protective enzyme activities, membrane lipid peroxidation products, and yield-related traits were measured. The results showed that: 1) Under high-temperature stress (HT) at the flowering stage, only ‘Hengyu 7182’ and ‘Hengyu 868’ and their paternal inbred lines ‘H 102’ and ‘H 40’ showed no significant differences in grain yield per plant and kernel number per ear compared with the CK, the grain yield per plant and kernel number per ear of ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ and their other inbred lines were significantly reduced. 2) After high-temperature stress (HT), the number of tassel branches, tassel dry weight, and ear length of ‘Hengyu 7182’, ‘Hengyu 868’, ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ were all significantly lower than those of the CK. The reduction was smaller in ‘Hengyu 7182’ and ‘Hengyu 868’ than in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’. No significant changes were observed in the dry weights of male and female ears for inbred lines ‘H 103’, ‘H 102’, ‘H 35’ and ‘H 40’. Furthermore, no significant differences were discovered in the number of tassel branches for ‘H 102’ and in the ear length for ‘H 40’. 3) Under high temperature stress (HT), the decreases in the activities of SOD and CAT in the leaves of ‘Hengyu 7182’ were not significant, and the decrease amplitude of CAT activity in ‘Hengyu 868’ was significantly lower than that in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’. The decreases in the activities of SOD and CAT in the leaves of inbred line ‘H 102’ were not significant, and the decrease in SOD activity in the leaves of ‘H 40’ was not significant. 4) Combined application of correlation analysis, grey relational analysis and principal component analysis identified that the number of tassel branches, kernel number per ear and dry weight of ear could be used as the main indicators for evaluating the heat tolerance of maize hybrids and their parental inbred lines. The inbred lines ‘H 102’ and ‘H 40’ exhibited significantly superior heat tolerance compared to the ‘Chang 7-2’ and ‘PH4CV’, indicating that the former two lines exhibited desirable heat tolerance. Consequently, ‘H 102’ and ‘H 40’ are recommended as valuable heat-tolerant germplasms for future breeding programs.

Keywords maize; flowering period; high-temperature stress; hybrid; parental inbred line; growth and development; yield

玉米 (*Zea mays*) 是我国种植面积最大、总产量最高的粮食作物,对保障国家粮食安全和满足市场需求发挥着重要作用^[1]。黄淮海夏玉米区是我国玉米优势产区之一,但随着全球气候逐渐变暖,黄淮海夏玉米生育期极端高温频发,气温超过 35℃ 的天数明显增多,开花期是玉米对高温胁迫最敏感时期之一,此时遭受高温胁迫会不利于玉米高产稳产^[2-3]。然而,当前对玉米耐热种质资源的鉴定,尤其是对骨干亲本自交系耐热性的系统评价仍显不足,制约了耐高温品种的选育效率。因此,挖掘优异耐热亲本并阐明其遗传生理基础,已成为育种实践的迫切需求。为此,系统研究高温胁迫下夏玉米及其亲本的生长发育响应与生理机制,对于定向选育耐热品种及制定针对性栽培策略具有重要理论指导意义。

高温胁迫是限制玉米生长发育的主要非生物逆境胁迫之一,直接影响玉米籽粒产量。当发生高温胁迫时,玉米花粉活力降低,雌雄穗发育受阻^[4-5]。高温胁迫后,玉米叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性降低,清除活性氧的能力下

降^[6];玉米叶面积指数、穗粒数也均会显著减少,抑制了同化物向籽粒的转运,最终造成籽粒产量降低^[7]。在品种耐热性差异方面,不同玉米品种存在显著分化。已有学者筛选出 1 批耐热种质资源,并明确穗粒数、花粉活力可作为耐热性初步鉴定指标^[8-9]。但现有研究多聚焦于杂交种本身的耐热表现,对亲本自交系与杂交种耐热性的遗传关联探究不足,尤其缺乏对骨干自交系耐热性的系统评价,难以明确亲本对杂交种耐热性的贡献度^[10-11]。此外,玉米耐热性是多性状协同作用的复杂数量性状,当前评价指标体系尚未统一,多数研究仅基于单一或少数指标开展鉴定,综合评价体系的缺失制约了耐热品种选育效率。因此,开展玉米杂交种和亲本自交系耐热性研究显得尤为重要。目前,针对黄淮海夏玉米区主栽品种,结合雌雄穗发育、生理代谢及产量性状的多维度耐热性评价,以及亲本自交系耐热核心指标的筛选等研究尚未见报道。本研究以黄淮海夏玉米区 4 个杂交种及其亲本自交系为供试材料,通过 2 年田间试验,测定了开花期高温胁迫下花粉活力、雌雄穗发育特征和膜脂过氧化

物、保护酶活性等叶片生理指标,以及产量及产量构成因素的变化,并通过相关分析、灰色关联度分析和主成分分析对供试12个玉米杂交种/自交系耐热性进行评价,旨在明确花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系生长发育及产量的影响,以期为耐高温玉米新品种选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以黄淮海夏播玉米区品种‘衡玉7182’、‘衡玉868’、‘郑单958’、‘先玉335’及其亲本自交系为试验材料(表1)。杂交种‘郑单958’和‘先玉335’种子分别来源于河南金博士种业股份有限公司和敦煌种业先锋良种有限公司,自交系‘郑58’、‘昌7-2’、‘PH6WC’和‘PH4CV’种子均来源于中国农业科学院作物科学研究所,‘衡玉7182’、‘衡玉868’及其亲本自交系均来源于河北省农林科学院旱作农业研究所。

1.2 试验设计

试验于河北省农林科学院旱作农业研究所深州护驾迟试验基地(37°53′27″N, 112°42′45″E, 海拔20 m)进行。试验田耕层土壤(0—20 cm)含有机质10.4 g/kg、碱解氮85 mg/kg、速效磷25.7 mg/kg、速效钾169.7 mg/kg。2023和2024年均于6月5日起分批播种,保证玉米抽雄期基本一致。

表1 供试玉米杂交种及其亲本玉米自交系

Table 1 Tested maize hybrids and their parental inbred lines

杂交种 Hybrid	母本 Female parent	父本 Male parent
衡玉 7182 HY 7182	H 103	H 102
衡玉 868 HY 868	H 35	H 40
郑单 958 ZD 958	郑 58(Z58)	昌 7-2(C7-2)
先玉 335 XY 335	PH6WC	PH4CV

采用随机区组试验设计,设置高温胁迫处理(HT)和田间自然条件(对照,CK)2个处理。CK为全生育期田间自然条件,小区为4行区,行长5 m,行距60 cm,种植密度67 500株/hm²。高温处理在玉米吐丝前7 d开始,持续14 d,通过搭建高温棚(棚长45 m、宽20 m、肩高3 m、棚高3.5 m)进行模拟,高温棚由树脂薄膜(透光率≥95%)和钢架组成,棚顶部和底部均留出通风口以保证棚内外湿度和CO₂浓度基本一致,棚内放置鼓风机,保证棚内空气流动和温度均匀,并安装自动加热控制装置,实时根据温度进行调节,使处理期间HT的日均气温比CK高5℃左右(图1)。使用杭州精创信息技术有限公司的GSP-6型温湿度自动记录仪每隔15 min自动记录棚内外玉米冠层温湿度,除温度处理外,其他管理措施与CK保持一致,处理结束后拆除高温棚,继续使植株自然生长至生理成熟期。每个处理重复3次。

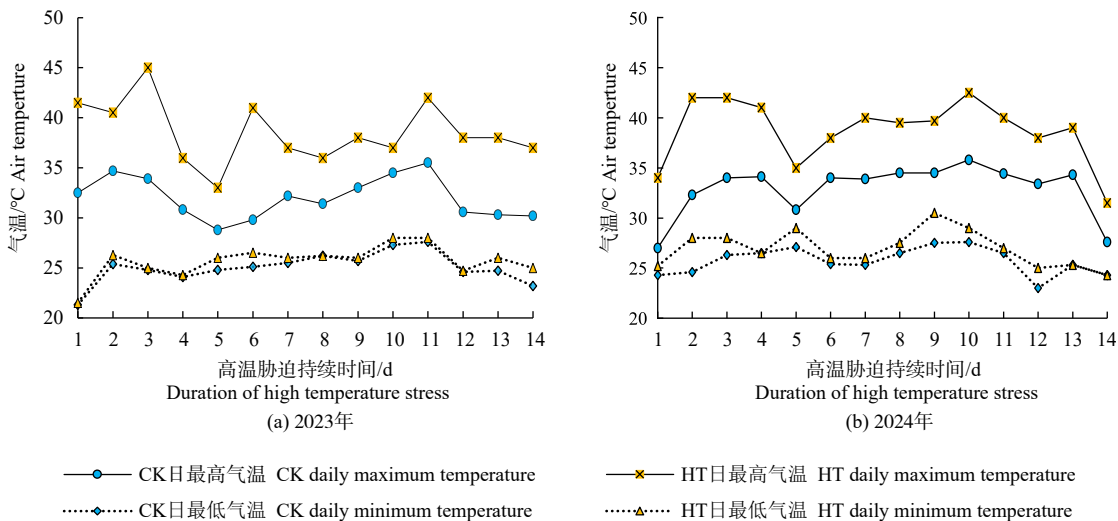


图1 试验期间玉米高温胁迫处理(HT)和大田对照(CK)的气温变化

Fig. 1 Variation of temperature under high temperature stress (HT) and field control (CK) during the experimental period

1.3 测定指标及方法

1.3.1 花粉活力

玉米雄穗盛花期,于上午10:00时左右采集花粉,置于冰盒带回试验室,采用氯化三苯基四氮唑(TTC染色)法^[12]测定花粉活力,公式如下:

$$\text{花粉活力} = \frac{\text{染色花粉粒数}}{\text{总花粉粒数}} \times 100\%$$

1.3.2 雌雄穗发育

高温处理结束后,每区选取3株长势一致的植株,称取雄穗干重,调查雄穗分枝数;轻轻剥去包裹在雌穗外部的苞叶,测量雌穗穗长,称取雌穗干重。

1.3.3 叶片保护酶活性

于吐丝后第5天,每个重复取3株穗位叶测定叶片的保护酶活性。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[13]测定,过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法^[14]。

1.3.4 叶片膜脂过氧化物和细胞膜透性

在吐丝后第5天,每个重复取3株穗位叶测定叶片MDA含量和细胞膜透性。丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[15],采用相对电导率法^[16]测定细胞膜透性(CMP),%。

1.3.5 测产和考种

成熟期,每个小区收获中间2行,并选取20个

代表穗测定穗粒数、百粒重。将收获的小区全部果穗脱粒并自然风干,使用日本KETT公司生产的凯特PM-8188-A谷物水分测量仪测定水分后,计算单株籽粒产量(按14%含水率进行折算)。

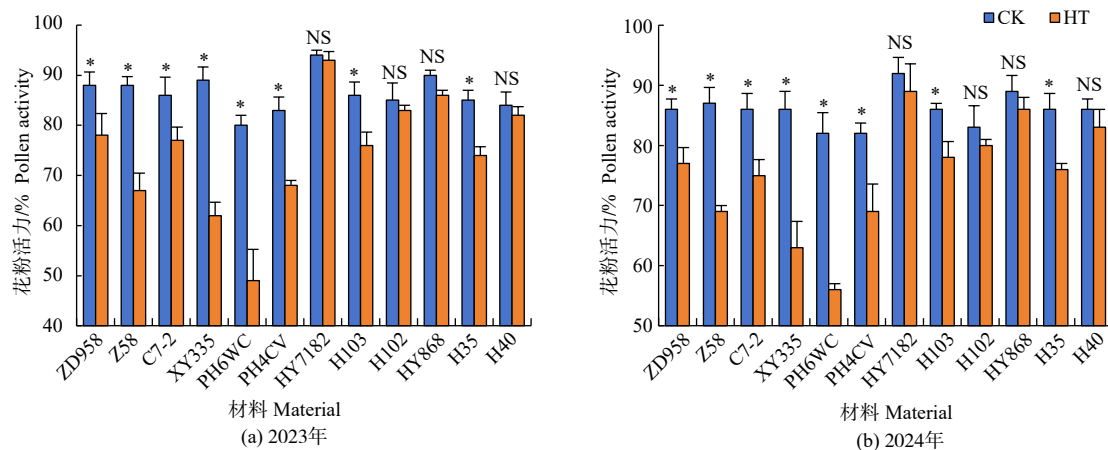
1.4 数据处理

采用WPS Office 2025软件整理数据,用Origin Pro 2021软件作图,用DPS v21.05软件对数据进行多重比较及显著性检验,其中处理间差异显著性采用LSD法进行检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系花粉活力的影响

由图2可知,花期高温胁迫(HT)处理的参试玉米杂交种及其亲本自交系的花粉活力均低于正常大田对照(CK)。与CK相比,高温胁迫处理(HT)的玉米杂交种‘XY 335’和‘ZD 958’花粉活力显著降低($P<0.05$),降幅分别为28.54%和10.91%,自交系‘H 103’、‘H 35’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘Z 58’和‘C 7-2’分别降低10.47%、12.28%、35.23%、16.96%、22.28%和11.63%($P<0.05$)。但‘HY 7182’和‘HY 868’的父本自交系‘H 102’和‘H 40’的花粉活力均未发生显著降低。



ZD958, XY335, HY7182和HY868分别为杂交种‘郑单958’,‘先玉335’,‘衡玉7182’和‘衡玉868’;Z58, C7-2, PH6WC, PH4CV, H103, H102, H35, H40为自交系。HT为高温胁迫处理,CK为大田对照。*表示同一份材料不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$);NS表示同一份材料不同处理间差异不显著。下同。

ZD958, XY335, HY7182 and HY868 are hybrid maize varieties ‘Zhengdan 958’, ‘Xianyu 335’, ‘Hengyu 7182’ and ‘Hengyu 868’, respectively. Z58, C7-2, PH6WC, PH4CV, H103, H102, H35 and H40 are inbred lines. HT represents high temperature stress. CK represents field control. * indicates that the difference between different treatments of the same material reaches a significant level ($P<0.05$). NS indicates that there is no significant difference between different treatments of the same material. The same below.

图2 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系花粉活力的变化

Fig. 2 Changes of pollen activity of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

2.2 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系穗发育的影响

由表2可知,与CK相比,HT的杂交种‘ZD 958’雄穗干重未出现显著变化,其他3个杂交种‘XY 335’、‘HY 7182’和‘HY 868’分别降低39.05%、14.84%和25.66% ($P<0.05$);自交系‘H 103’、‘H 102’、‘H 35’和‘H 40’未出现显著变化,‘Z 58’、‘C 7-2’、‘PH6WC’和‘PH4CV’比CK分别降低

32.29%、42.46%、48.33%和62.91% ($P<0.05$)。HT的‘H 102’雄穗分枝数与CK相比未显著降低,其他杂交种和自交系均显著低于CK,‘ZD 958’、‘XY 335’、‘HY 7182’和‘HY 868’分别比CK低37.90%、53.97%、18.52%和32.43% ($P<0.05$),‘Z 58’、‘C 7-2’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘H 103’、‘H 35’和‘H 40’比CK分别降低39.32%、48.35%、53.29%、63.13%、19.68%、22.73%和19.67% ($P<0.05$)。

表2 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系的雄穗干重和分枝数

Table 2 Tassel dry weight and number of tassel branches of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

年份 Year	杂交种/亲本自交系 Hybrid/parental inbred line	雄穗干重/g Dry weight of tassel		雄穗分枝数/个 The number of tassel branches	
		CK	HT	CK	HT
2023	ZD958	1.82±0.04 ^{abc}	1.40±0.08 ^{cdefgNS}	9.44±0.27 ^a	5.82±0.26 ^{fighi*}
	Z58	1.50±0.08 ^{bcdef}	1.04±0.18 ^{ghij*}	7.20±0.17 ^{cd}	4.31±0.46 ^{kl*}
	C7-2	1.62±0.12 ^{abcde}	0.93±0.03 ^{hij*}	7.47±0.16 ^{cd}	3.80±0.60 ^{lm*}
	XY335	2.00±0.27 ^a	1.19±0.07 ^{efgh*}	10.00±0.98 ^a	4.48±0.26 ^{ijkl*}
	PH6WC	1.41±0.10 ^{cdefg}	0.71±0.12 ^{ij*}	6.82±0.26 ^{def}	3.11±0.17 ^{mn*}
	PH4CV	1.71±0.10 ^{abcd}	0.60±0.05 ^{j*}	7.02±0.44 ^{cde}	2.49±0.26 ^{n*}
	HY7182	1.32±0.23 ^{defgh}	1.13±0.31 ^{fighiNS}	8.03±0.44 ^{bc}	6.52±0.26 ^{defg*}
	H103	1.23±0.16 ^{efgh}	1.02±0.17 ^{ghijNS}	6.00±1.01 ^{efgh}	4.78±0.26 ^{ijkl*}
	H102	1.04±0.17 ^{ghij}	0.88±0.02 ^{hijNS}	5.51±0.36 ^{ghij}	4.88±0.20 ^{hijklNS}
	HY868	1.91±0.06 ^{ab}	1.40±0.17 ^{cdefg*}	9.00±0.62 ^{ab}	6.02±0.56 ^{efgh*}
	H35	1.43±0.04 ^{cdefg}	1.12±0.26 ^{fighiNS}	6.53±0.3 ^{defg}	5.01±0.20 ^{hijk*}
	H40	1.12±0.22 ^{fighi}	0.90±0.31 ^{hijNS}	5.82±0.17 ^{fighi}	4.60±0.44 ^{ijkl*}
2024	ZD958	1.89±0.11 ^{abc}	1.51±0.14 ^{cdefgNS}	9.57±0.26 ^{ab}	6.01±0.20 ^{hi*}
	Z58	1.62±0.07 ^{bcdef}	1.14±0.33 ^{ghij*}	7.31±0.20 ^{de}	4.47±0.26 ^{lm*}
	C7-2	1.73±0.15 ^{abcde}	1.02±0.18 ^{hij*}	7.61±0.36 ^{cd}	4.02±0.20 ^{m*}
	XY335	2.11±0.12 ^a	1.33±0.15 ^{efgh*}	10.20±0.26 ^a	4.83±0.26 ^{kl*}
	PH6WC	1.50±0.11 ^{cdefg}	0.81±0.07 ^{ij*}	6.91±0.46 ^{ef}	3.28±0.17 ^{n*}
	PH4CV	1.81±0.12 ^{abcd}	0.70±0.14 ^{j*}	7.11±0.36 ^{de}	2.74±0.17 ^{n*}
	HY7182	1.44±0.12 ^{defgh}	1.18±0.10 ^{fighi*}	8.17±0.26 ^c	6.72±0.46 ^{efg*}
	H103	1.28±0.23 ^{efgh}	1.07±0.20 ^{ghijNS}	6.20±0.36 ^{ghi}	5.01±0.20 ^{ijkl*}
	H102	1.09±0.13 ^{ghij}	1.04±0.12 ^{hijNS}	5.63±0.35 ^{ij}	5.02±0.10 ^{ijklNS}
	HY868	2.00±0.26 ^{ab}	1.52±0.16 ^{cdefg*}	9.21±0.20 ^b	6.34±0.26 ^{figh*}
	H35	1.51±0.20 ^{cdefg}	1.20±0.12 ^{fighiNS}	6.72±0.17 ^{efg}	5.20±0.26 ^{jk*}
	H40	1.22±0.07 ^{fighi}	1.01±0.21 ^{hijNS}	5.89±0.46 ^{hi}	4.82±0.20 ^{kl*}

注:小写字母表示同一处理不同材料间的差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Lowercase letters indicate significant difference among different materials, under the same treatment ($P<0.05$). The same below.

由表3可知,与CK相比,HT的‘ZD 958’、‘XY 335’、‘HY 7182’和‘HY 868’雌穗长度分别降低14.64%、31.13%、12.92%和20.53% ($P<0.05$); HT的‘Z 58’、‘C 7-2’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘H 103’和‘H 35’比CK分别低30.33%、43.27%、45.21%、57.19%、16.03%和22.25% ($P<0.05$)。HT的‘XY 335’雌穗干重显著低于CK; HT的‘Z 58’、‘C 7-2’、‘PH6WC’和‘PH4CV’雌穗干重分别比CK低30.33%、43.27%、45.21%和57.19% ($P<0.05$)。

表3 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系的雌穗长度和干重
Table 3 Ear length and dry weight of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

年份 Year	杂交种/亲本自交系 Hybrid/parental inbred line	雌穗长度/cm The length of the female ear		雌穗干重/g Dry weight of the female ear	
		CK	HT	CK	HT
2023	ZD958	4.52±0.17 ^{bc}	3.22±0.26 ^{gh*}	2.02±0.17 ^{ab}	1.68±0.17 ^{bcdNS}
	Z58	3.81±0.26 ^{def}	2.80±0.26 ^{hi*}	1.61±0.10 ^{bcd^e}	1.10±0.10 ^{fghi*}
	C7-2	4.04±0.20 ^{de}	2.61±0.26 ^{i*}	1.82±0.30 ^{abc}	1.01±0.26 ^{ghi*}
	XY335	5.00±0.26 ^a	2.82±0.17 ^{hi*}	2.20±0.26 ^a	1.52±0.10 ^{cdef*}
	PH6WC	3.48±0.10 ^{fg}	2.13±0.10 ^{j*}	1.54±0.10 ^{cdef}	0.83±0.10 ^{hi*}
	PH4CV	3.92±0.17 ^{def}	1.84±0.20 ^{j*}	1.71±0.17 ^{bcd}	0.70±0.17 ^{i*}
	HY7182	4.20±0.17 ^{cd}	3.58±0.17 ^{efg*}	1.48±0.10 ^{cdef}	1.33±0.10 ^{defgNS}
	H103	3.02±0.26 ^{hi}	2.61±0.17 ^{iNS}	1.22±0.10 ^{efgh}	1.02±0.26 ^{ghⁱNS}
	H102	2.79±0.26 ^{hi}	2.73±0.10 ^{iNS}	1.00±0.17 ^{ghi}	0.90±0.26 ^{ghⁱNS}
	HY868	4.81±0.36 ^{ab}	3.50±0.10 ^{fg*}	1.91±0.26 ^{abc}	1.51±0.1 ^{cdefNS}
	H35	3.20±0.26 ^{gh}	2.70±0.26 ^{i*}	1.33±0.26 ^{defg}	1.00±0.26 ^{ghⁱNS}
	H40	2.87±0.26 ^{hi}	2.59±0.17 ^{iNS}	1.12±0.17 ^{fghi}	0.88±0.17 ^{ghⁱNS}
2024	ZD958	4.62±0.20 ^{ab}	3.34±0.46 ^{efg*}	2.14±0.17 ^{ab}	1.80±0.10 ^{bcdNS}
	Z58	3.89±0.26 ^{cd}	2.92±0.10 ^{gh*}	1.70±0.17 ^{bcd^e}	1.21±0.26 ^{fghi*}
	C7-2	4.12±0.17 ^{bcd}	2.71±0.10 ^{hi*}	1.92±0.26 ^{abc}	1.10±0.26 ^{ghi*}
	XY335	5.10±0.10 ^a	3.00±0.26 ^{gh*}	2.27±0.17 ^a	1.61±0.10 ^{cdef*}
	PH6WC	3.62±0.36 ^{def}	2.22±0.17 ^{ij*}	1.58±0.10 ^{cdef}	0.88±0.17 ^{hi*}
	PH4CV	4.01±0.17 ^{cd}	1.89±0.20 ^{j*}	1.82±0.10 ^{bcd}	0.79±0.05 ^{i*}
	HY7182	4.31±0.17 ^{bc}	3.68±0.26 ^{de*}	1.61±0.10 ^{cdef}	1.42±0.07 ^{defgNS}
	H103	3.10±0.17 ^{fgh}	2.72±0.17 ^{hi*}	1.30±0.20 ^{efgh}	1.08±0.23 ^{ghⁱNS}
	H102	2.92±0.10 ^{gh}	2.84±0.10 ^{ghNS}	1.11±0.10 ^{ghi}	1.03±0.15 ^{ghⁱNS}
	HY868	4.93±0.26 ^a	3.63±0.26 ^{def*}	2.00±0.17 ^{abc}	1.62±0.07 ^{cdefNS}
	H35	3.27±0.26 ^{efg}	2.82±0.20 ^{ghNS}	1.42±0.10 ^{defg}	1.10±0.03 ^{ghⁱNS}
	H40	3.00±0.26 ^{gh}	2.71±0.20 ^{hiNS}	1.22±0.10 ^{fghi}	1.00±0.17 ^{ghⁱNS}

2.3 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系
膜脂过氧化和细胞膜透性的影响

由图3和图4可知,高温胁迫处理(HT)的玉米杂交种及其亲本自交系的穗位叶丙二醛(MDA)含量、细胞膜透性均显著高于CK。与CK相比,HT的玉米杂交种MDA、细胞膜透性升高幅度由高到低

为先玉335(63.05%、28.1%)>郑单958(28.74%、25.24%)>衡玉868(12.63%、22.94%)>衡玉7182(10.81%、23.31%) ($P<0.05$); HT的亲本自交系MDA升高幅度依次为PH6WC(65.21%)>郑58(45.43%)>PH4CV(43.13%)>H 103(37.09%)>昌 7-2(31.13%)>H 102(18.23%)>H 35

(14.75%)>H 40(14.74%)($P<0.05$);HT的亲本自交系细胞膜透性升高幅度由高到低为PH6WC(34.92%)>PH4CV(31.65%)>郑 58(30.73%)>

昌 7-2(29.54%)>H 40(27.23%)>H 103(26.87%)>H 35(26.26%)>H 102(25.35%)($P<0.05$)。

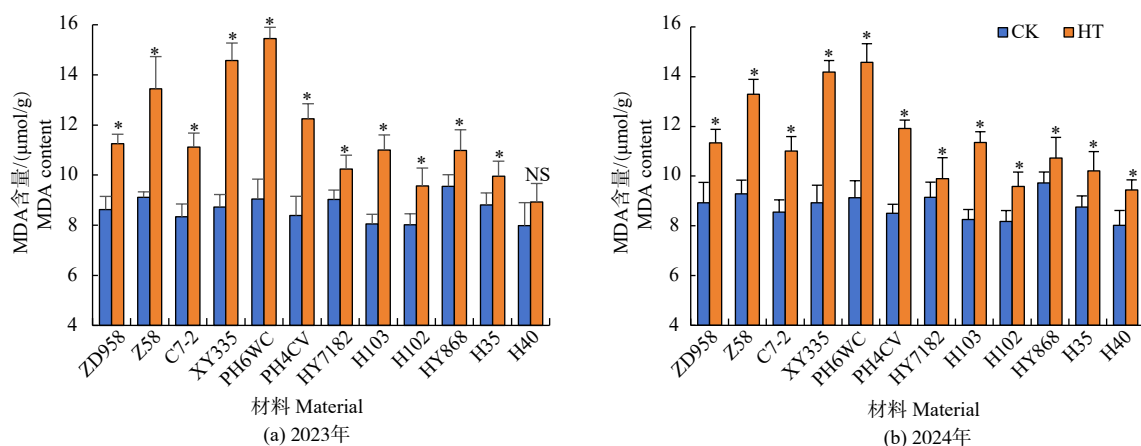


图3 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系丙二醛含量的变化

Fig. 3 Changes of MDA content of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

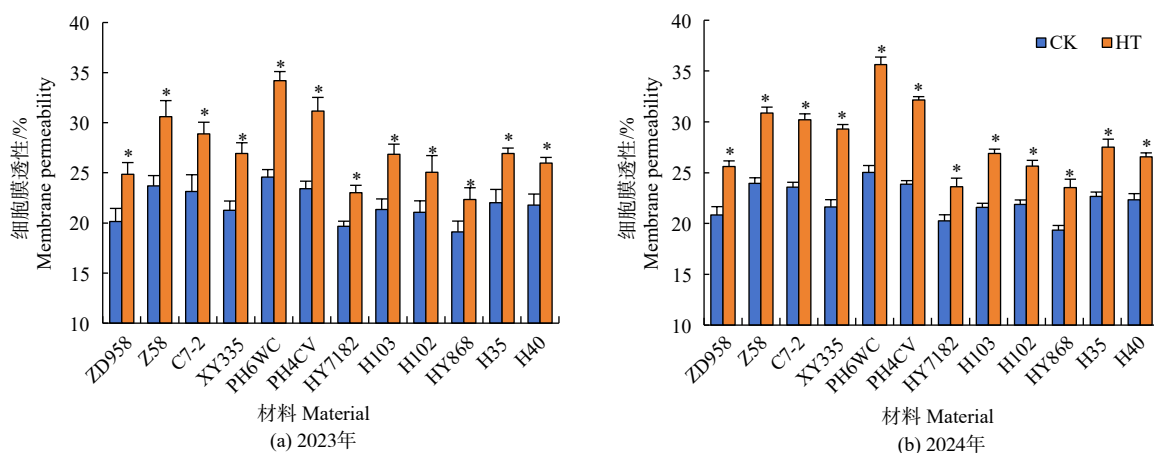


图4 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系细胞膜透性的变化

Fig. 4 Changes of cell membrane permeability of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

2.4 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系叶片保护酶活性的影响

由图5和图6可知,高温胁迫处理(HT)的玉米杂交种及其亲本自交系的穗位叶CAT和SOD活性均低于CK,且降幅差异较大。HT的‘衡玉7182’和‘衡玉868’叶片的SOD活性均低于CK,但差异未达显著水平,而‘先玉335’和‘郑单958’分别比CK低42.27%和23.49%($P<0.05$)。HT的‘衡玉7182’叶片CAT活性低于CK,差异也不显著,‘衡玉868’、‘先玉335’和‘郑单958’叶片CAT活性分

别比CK低4.45%、62.14%和27.61%($P<0.05$)。HT的‘H102’和‘H40’叶片SOD活性与CK相比也有降低,但差异不显著;‘H103’、‘H35’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘郑58’和‘昌7-2’叶片SOD活性分别比CK低5.80%、12.44%、45.39%、38.82%、17.30%和16.30%($P<0.05$)。HT的‘H102’叶片CAT活性低于CK,但不显著;‘H40’、‘H103’、‘H35’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘郑58’和‘昌7-2’叶片CAT活性分别比CK低5.70%、21.93%、27.54%、64.91%、29.03%、

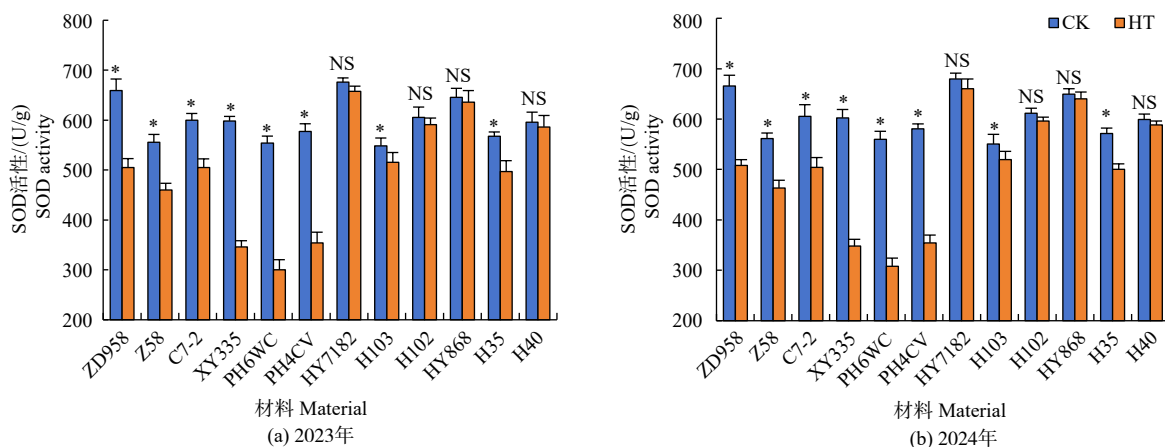


图5 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系SOD活性的变化

Fig. 5 Changes of SOD activity of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

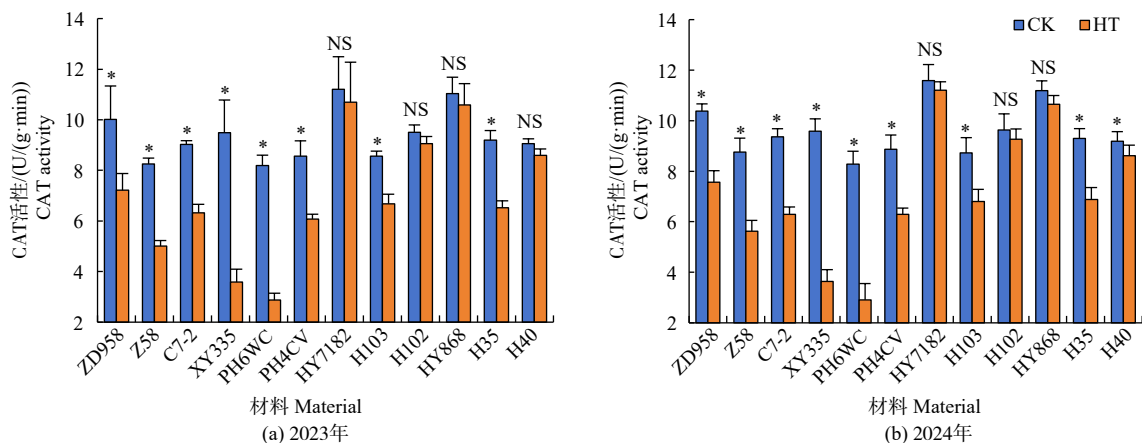


图6 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系CAT活性的变化

Fig. 6 Changes of CAT activity of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

37.50%和31.41% ($P < 0.05$)。可见,杂交种‘衡玉7182’和‘衡玉868’、自交系‘H102’和‘H40’在高温胁迫下均能保持较高的活性氧清除能力。

2.5 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系产量及产量构成要素的影响

由表4可知,高温胁迫(HT)的参试玉米杂交种产量均低于CK,其中‘衡玉7182’和‘衡玉868’的降低不显著,‘先玉335’和‘郑单958’的产量分别比CK低51.11%和10.62% ($P < 0.05$);‘衡玉7182’、‘衡玉868’、‘先玉335’和‘郑单958’穗粒数分别比CK低6.14%、8.01%、47.47%和22.67% ($P < 0.05$)。HT的百粒重也均低于CK,但4个杂交种与CK均无显著差异。HT的亲本自交系

‘H102’和‘H40’的产量、穗粒数均低于CK,但差异不显著;‘H103’、‘H35’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘郑58’和‘昌7-2’产量降幅分别为15.92%、15.22%、58.76%、44.74%、26.46%和34.82% ($P < 0.05$);穗粒数降幅分别为16.63%、18.85%、61.39%、38.58%、33.50%和20.59% ($P < 0.05$);所有亲本自交系百粒重降低均不显著。可见,杂交种‘衡玉7182’和‘衡玉868’、自交系‘H102’和‘H40’在高温胁迫下稳产效果较好,耐高温性好。高温胁迫可显著降低‘先玉335’、‘郑单958’、‘H103’、‘H35’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘郑58’和‘昌7-2’的穗粒数,从而导致产量下降。

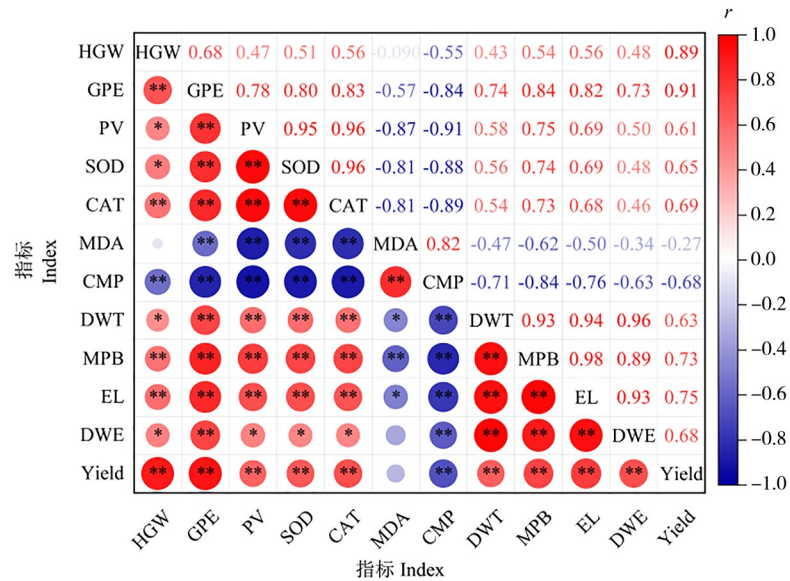
表 4 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系的产量及产量构成因素的变化

Table 4 Changes of yield and yield component factors of maize hybrids and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period									
年份 Year	杂交种/亲本 自交系 Hybrid/parental inbred line	籽粒产量/(g/株) Grain yield		百粒重/g 100-grain weight		穗粒数 Grains per ear			
		CK	HT	CK	HT	CK	HT		
2023	ZD958	242.11±8.49 ^{ab}	217.02±5.20 ^{a*}	39.36±2.05 ^{ab}	37.09±1.31 ^{abcNS}	639.82±25.32 ^a	455.18±14.40 ^{a*}		
	Z58	103.07±5.41 ^{defg}	80.33±3.05 ^{hij*}	33.44±2.87 ^{bcd}	31.30±1.13 ^{cdNS}	317.10±15.27 ^b	213.70±23.09 ^{a*}		
	C7-2	86.37±5.37 ^{ghi}	56.96±3.94 ^{k*}	20.42±1.86 ^{hi}	16.94±1.72 ^{NS}	403.70±20.72 ^c	316.67±15.25 ^{a*}		
	XY335	216.63±10.12 ^c	114.86±5.57 ^{a*}	33.64±2.23 ^{bcd}	30.58±1.93 ^{cdefNS}	637.56±28.30 ^a	330.32±26.63 ^{a*}		
	PH6WC	90.50±7.15 ^{efgh}	40.73±6.92 [*]	22.71±1.53 ^{ghi}	20.89±10.55 ^{ghNS}	402.56±16.12 ^e	155.05±21.86 ^{k*}		
	PH4CV	107.99±5.84 ^{defg}	60.50±8.04 ^{ijl*}	24.32±1.26 ^{efghi}	22.88±2.12 ^{ghNS}	442.63±17.86 ^d	273.45±20.44 [*]		
	HY7182	246.58±9.81 ^a	237.01±8.75 ^{abcNS}	44.00±1.38 ^a	43.11±2.27 ^{aNS}	602.20±20.63 ^b	552.69±30.87 ^{a*}		
	H103	109.84±10.43 ^{gdef}	98.62±7.15 ^{defghNS}	27.50±1.45 ^{degh}	26.92±1.49 ^{deghNS}	400.01±21.46 ^e	325.25±22.86 ^{b*}		
	H102	116.85±5.01 ^d	112.32±11.61 ^{deNS}	34.12±1.35 ^{bcd}	33.56±1.61 ^{bedNS}	412.09±20.39 ^e	390.54±15.96 ^{cNS}		
	HY868	230.43±7.25 ^{abc}	223.08±7.57 ^{bcdNS}	43.21±1.19 ^a	42.35±2.25 ^{aNS}	602.53±25.34 ^b	565.78±13.39 ^{a*}		
	H35	105.26±5.51 ^{defg}	92.01±9.39 ^{efghNS}	28.22±1.77 ^{degh}	26.71±2.25 ^{deghNS}	440.65±16.68 ^d	362.37±14.40 ^{a*}		
	H40	88.25±7.40 ^{ghi}	67.00±9.14 ^{ijkNS}	18.15±1.51 ⁱ	17.61±1.57 ^{NS}	389.03±19.98 ^{fg}	363.15±14.78 ^{fgNS}		
2024	ZD958	225.01±9.97 ^{ab}	200.54±11.71 ^{c*}	35.15±1.89 ^{abcd}	34.64±1.69 ^{abcNS}	625.65±23.16 ^a	522.51±23.46 ^{a*}		
	Z58	105.05±6.12 ^d	72.64±13.42 ^{fg*}	31.45±2.75 ^{abcdef}	30.15±1.80 ^{bedefNS}	320.15±23.27 ⁱ	210.04±20.56 ^{a*}		
	C7-2	90.28±4.83 ^{de}	58.15±7.92 ^{gh*}	20.14±3.04 ^{kl}	16.96±1.21 ^{NS}	435.56±30.52 ^{ef}	350.06±16.24 ^{h*}		
	XY335	212.54±5.67 ^{bc}	95.15±9.67 ^{de*}	32.05±1.47 ^{abcde}	30.04±3.09 ^{bedefNS}	620.65±26.19 ^{ab}	330.56±22.32 [*]		
	PH6WC	90.66±5.78 ^{de}	33.97±5.67 [*]	22.35±1.81 ^{ijkl}	20.64±10.10 ^{klNS}	415.05±22.20 ^{fg}	160.65±15.59 [*]		
	PH4CV	102.35±5.55 ^d	55.78±6.13 [*]	23.26±2.55 ^{ghijkl}	22.78±2.75 ^{hijklNS}	450.52±26.00 ^e	275.12±13.50 [*]		
	HY7182	237.10±5.91 ^a	222.33±7.57 ^{abNS}	37.87±2.06 ^a	36.75±2.71 ^{abNS}	580.33±25.55 ^{bc}	535.12±27.24 ^{a*}		
	H103	102.32±5.38 ^d	80.20±5.47 ^{de*}	25.54±1.24 ^{efghjk}	24.15±2.90 ^{ghijkNS}	410.00±27.01 ^{efg}	350.25±13.25 ^{h*}		
	H102	100.33±4.43 ^d	96.45±5.31 ^{deNS}	29.52±2.27 ^{defgh}	28.54±1.11 ^{defghNS}	412.53±25.52 ^{efg}	390.87±17.90 ^{ghNS}		
	HY868	224.12±5.71 ^{ab}	218.25±4.40 ^{bNS}	36.98±1.46 ^{ab}	35.84±2.70 ^{abcNS}	586.36±31.77 ^{abc}	550.12±17.12 ^{aNS}		
	H35	100.44±5.11 ^d	82.51±3.26 ^{de*}	25.31±2.01 ^{efghjk}	24.52±2.10 ^{efghjNS}	400.25±30.83 ^{fg}	320.46±29.76 [*]		
	H40	95.33±3.53 ^{de}	90.05±5.19 ^{deNS}	28.15±1.37 ^{defghi}	27.45±2.14 ^{efghijNS}	405.14±33.41 ^{fg}	383.08±22.98 ^{ghNS}		

2.6 玉米生理指标、穗发育与产量的相关性分析

丙二醛(MDA)含量和细胞膜透性(CMP)均与玉米籽粒产量呈负相关;CMP与产量达到极显著负相关($P<0.01$),相关系数(r)为-0.62;其他指标

与产量均呈极显著正相关($P<0.01$),其中HGW、GPE、CAT、MPB、EL和DWE与产量的 r 分别为0.89、0.89、0.66、0.71、0.73和0.67,其次为PV、SOD、DWT, r 为0.61、0.62、0.61(图7)。



Yield, 产量; HGW, 百粒重; GPE, 穗粒数; PV, 花粉活力; SOD, 超氧化物歧化酶; CAT, 过氧化氢酶; MDA, 丙二醛; CMP, 细胞膜透性; DWT, 雄穗干重; MPB, 雄穗分枝数; EL, 雌穗长度; DWE, 雌穗干重。下同。
Y, yield; HGW, hundred-grain weight; GPE, grains per ear; PV, pollen viability; SOD, superoxide dismutase; CAT, catalase; MDA, malondialdehyde; CMP, cell membrane permeability; DWT, dry weight of tassel; MPB, number of tassel branches; EL, ear length; DWE, dry weight of ear. The same below.

图7 花期高温胁迫下玉米杂交种及其亲本自交系各指标的皮尔逊相关分析

Fig. 7 Pearson correlation matrix of various indicators of maize hybrid varieties and their parental inbred lines under high temperature stress during the flowering period

2.7 灰色关联度分析

相关性状的灰色关联度分析表明,籽粒产量和各性状之间的灰色关联度在0.269 8~0.404 6(表5)。雄穗分枝数、百粒重、穗粒数与产量的关

系最为密切,雌穗长度、雌穗干重与产量的关系次之;其中4个性状为雌穗的性状,因此,高温处理可能主要是通过改变雌穗的生长发育来影响最终产量。

表5 花期高温胁迫下玉米籽粒产量与相关性状的灰色关联度分析

Table 5 Grey relational analysis of corn kernel yield and related traits under high temperature stress during flowering stage

指标 Index	关联度 Correlation degree	排序 Rank	指标 Index	关联度 Correlation degree	排序 Rank
雄穗分枝数 MPB	0.404 6	1	丙二醛 MDA	0.334 3	7
百粒重 HGW	0.392 5	2	过氧化氢酶 CAT	0.305 7	8
穗粒数 GPE	0.390 7	3	细胞膜透性 CMP	0.286 5	9
雌穗长度 EL	0.383 1	4	花粉活力 PV	0.271 7	10
雌穗干重 DWE	0.374 2	5	超氧化物歧化酶 SOD	0.269 8	11
雄穗干重 DWT	0.355 3	6			

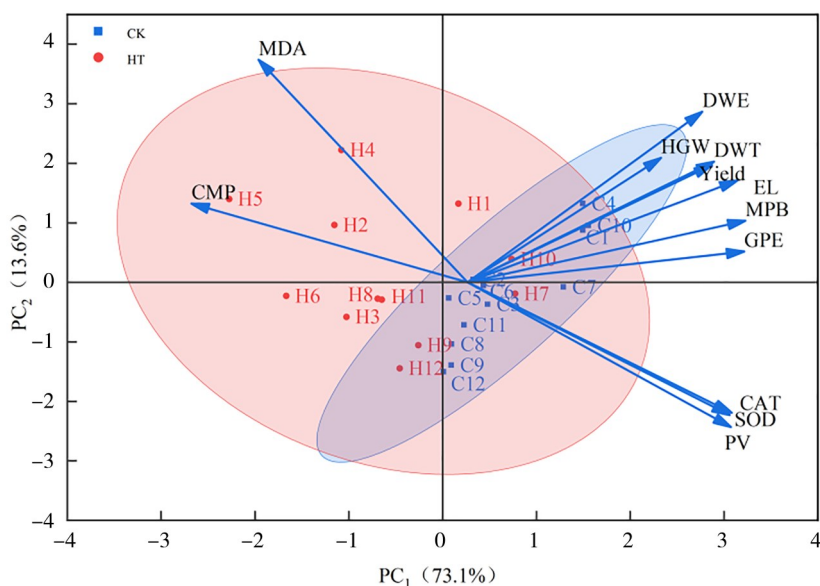
2.8 主成分分析

对玉米产量及产量构成因素、穗发育特征、抗

氧化酶和膜脂过氧化物等指标进行主成分分析发现,有2个主成分的特征值>1,第一主成分的贡献

率为73.1%，第二主成分的贡献率为13.6%，第一、第二主成分的累积贡献率达到了86.7%，即2个主成分涵盖了这12个指标86%以上的数据信息，因此提取2个主成分(图8)。第一主成分中穗粒数(GPE)、细胞膜透性(CMP)、雄穗分枝数(MPB)有较大的得分系数，第二主成分中丙二醛(MDA)、雌穗干重(DWE)有较大的得分系数。因

此，可以将穗粒数、细胞膜透性和雄穗分枝数作为玉米耐热评价的主要指标，将丙二醛和雌穗干重作为玉米耐热评价的二级指标。结果显示，玉米杂交种‘衡玉7182’、‘衡玉868’、‘郑单958’耐热性较好，且耐热性均优于‘先玉335’。玉米自交系‘H102’和‘H40’的耐热性均显著优于‘昌7-2’和‘PH4CV’。



C1~C12、H1~H12 分别为对照(CK)和高温(HT)胁迫下试验材料代号，依次为‘郑单958’、‘郑58’、‘昌7-2’、‘先玉335’、‘PH6WC’、‘PH4CV’、‘衡玉7182’、‘H103’、‘H102’、‘衡玉868’、‘H35’和‘H40’。

C1~C12 and H1~H12 represent the codes for experimental materials under control (CK) and high temperature stress (HT) conditions, respectively. They are ‘Zhengdan 958’, ‘Zheng 58’, ‘Chang 7-2’, ‘Xianyu 335’, ‘PH6WC’, ‘PH4CV’, ‘Hengyu 7182’, ‘H103’, ‘H102’, ‘Hengyu 868’, ‘H35’, ‘H40’, respectively.

图8 12个杂交种/自交系的12个性状的主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis (PCA) of 12 traits in 12 maize hybrids/inbred lines

3 讨论

3.1 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系产量和穗发育的影响

玉米产量的高低与单位面积穗数、穗粒数、粒重密切相关，三者之间的相互协调是获得高产的基础^[17]。高温是导致玉米减产最主要的非生物逆境胁迫因子之一，花期高温会严重影响玉米生长发育，造成玉米严重减产^[18-19]。已有研究表明，玉米开花期高温胁迫下穗粒数减少是导致玉米籽粒产量降低的主要原因^[20-21]。本研究结果表明，与正常大田条件(CK)相比，花期高温胁迫(HT)处理的‘衡玉7182’和‘衡玉868’及其父本自交系单株籽粒产量、穗粒数未出现显著变化，‘衡玉7182’和‘衡玉868’的耐热性应

该与父本自交系‘H102’和‘H40’有关，这与徐田军等^[6]研究结果一致。‘先玉335’和‘郑单958’及其亲本自交系单株籽粒产量、穗粒数均显著低于CK，籽粒产量降低主要是由穗粒数减少所致(表4)。

雌雄穗的发育对玉米产量的形成起着关键作用^[22]。开花期是影响雌雄穗发育的关键阶段，该阶段遭遇高温逆境会导致花粉活力降低，雄穗分枝减少，雌穗变短变细，结实性差^[23-25]。本研究结果表明，HT的参试玉米杂交种及其亲本自交系的穗发育与CK的差异较大，4个杂交种雄穗分枝数、雌穗长度均显著低于CK，‘XY335’、‘HY7182’和‘HY868’的雄穗干重也均显著低于CK(表2)，‘XY335’的雌穗干重显著低于CK(表3)。HT的自交系‘H103’、‘H102’、‘H35’和‘H40’的雄穗干重及‘H

102'的雄穗分枝数与CK未出现显著差异(表2), 'H 40'的雌穗长度及'H 103'、'H 102'、'H 35'和'H 40'的雌穗干重与CK也无显著差异(表3)。

3.2 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系保护酶活性和膜脂过氧化物的影响

高温胁迫会影响植物各种生理生化代谢,而植物也形成了多种抵御方式减轻逆境胁迫带来的伤害^[26]。逆境胁迫下,植物体内会产生超氧阴离子、过氧化氢等活性氧的大量积累,破坏细胞结构、加速叶片衰老,甚至造成植物死亡。植物可通过增强自身的抗氧化酶(SOD、POD、CAT)的活性清除多余的活性氧^[27-28]。MDA是膜质过氧化产生的物质,其含量多少可直接反映作物遭受胁迫伤害的程度。本研究结果表明,HT的玉米杂交种及其亲本自交系的穗位叶SOD和CAT的活性均低于CK,但降幅差异较大(图5和图6),MDA含量、细胞膜透性均高于CK(图3和图4)。高温胁迫对玉米叶片抗氧化酶及膜脂过氧化的影响存在品种/品系间的差异,不同品种叶片中酶活性也存在差异,受高温伤害影响程度不同;其中,'衡玉7182'的叶片SOD和CAT活性低于CK,但不显著(图5和图6);'衡玉868'的CAT活性下降幅度显著低于'郑单958'和'先玉335';亲本自交系中,'H 102'叶片SOD和CAT活性低于CK,但差异不显著,'H 40'叶片SOD活性也低于CK,但不显著。可见,'衡玉7182'、'衡玉868'、'H 102'和'H 40'在高温胁迫下仍保持较高的活性氧清除能力,能够较好地清除高温胁迫所产生的过多氧自由基,维护细胞内自由基产生与清除的平衡,使细胞免受自由基的伤害,减缓衰老进程。

3.3 花期高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系相关性状的综合评价

相关性分析可以对2个以上相关性的变量元素进行分析,从而衡量变量间的密切程度^[29]。本试验通过皮尔逊相关性分析得出,与产量显著正相关的性状包括百粒重、穗粒数、花粉活力、SOD、CAT、雄穗干重、雄穗分枝数、雌穗长度和雌穗干重,与产量显著负相关的性状为细胞膜透性(图7)。灰色关联度分析结果反映了构成该系统的各性状组成的比较数列和参考数列间的密切程度,关联度越大,关系则越密切^[30]。本研究结果表明,相关性分析和灰色关联度分析结果相似,雄穗分枝数、百粒重、穗粒数与产量的关系最为密切,雌穗长度、雌穗干重与

产量的关系次之(表5)。主成分分析结果表明,雄穗分枝数、穗粒数、细胞膜透性、雌穗干重、丙二醛可作为玉米耐热评价的主要评价指标(图8)。综合3种评价方法,可将雄穗分枝数、穗粒数、雌穗干重作为评价玉米品种/品系耐热性效果的主要评价指标。同时,主成分分析结果显示,玉米杂交种'衡玉7182'、'衡玉868'、'郑单958'耐热性都较好,且耐热性均优于'先玉335'。玉米自交系'H 102'和'H 40'的耐热性均显著优于'昌7-2'和'PH4CV',具有较好的耐热性。

4 结 论

与正常大田条件(CK)相比,高温胁迫处理的玉米杂交种'衡玉7182'和'衡玉868'的单株籽粒产量与穗粒数未发生显著降低,'郑单958'和'先玉335'的产量则显著下降;自交系'H 102'和'H 40'耐热性较突出,表现为在高温胁迫下其单株籽粒产量与穗粒数未发生显著降低,'H102'产量降幅<4%, 'H 40'穗粒数降幅<7%,且叶片的保护酶SOD和CAT活性保持稳定。基于相关性分析、灰色关联度分析和主成分分析等统计方法对花期高温胁迫处理下玉米杂交种及其亲本自交系进行耐热性评价结果显示,雄穗分枝数、穗粒数、雌穗干重可作为耐热性评价的主要指标。玉米自交系'H 102'和'H 40'的耐热性均显著优于'昌7-2'和'PH4CV',在高温胁迫下仍能维持较好的产量形成与代谢的稳定。因此,玉米自交系'H 102'和'H 40'可作为优良的耐热种质在育种中加以利用。

参考文献 Reference

- [1] 张天宇. 517份玉米种质籽粒容重鉴定及全基因组关联分析(GWAS)[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023
Zhang T Y. Determination and genome-wide association analysis for kernel test weight of 517 maize germplasms [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2023 (in Chinese)
- [2] 任寒, 刘鹏, 董树亭, 张吉旺, 赵斌. 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, Zhang J W, Zhao B. Research advancements of effect of high temperature stress on growth and development of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 109-115 (in Chinese)
- [3] 王群, 赵向阳, 刘东尧, 闫振华, 李鸿萍, 董朋飞, 李潮海. 淹水弱光复合胁迫对夏玉米根形态结构、生理特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3479-3495
Wang Q, Zhao X Y, Liu D Y, Yan Z H, Li H P, Dong P F, Li C H. Root morphological, physiological traits and yield of maize under waterlogging and

- low light stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17): 3479-3495 (in Chinese)
- [4] 高英波, 张慧, 单晶, 薛艳芳, 钱欣, 代红翠, 刘开昌, 李宗新. 吐丝前高温胁迫对不同耐热型夏玉米产量及穗发育特征的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3954-3963
- Gao Y B, Zhang H, Shan J, Xue Y F, Qian X, Dai H C, Liu K C, Li Z X. Effects of pre-silking high temperature stress on yield and ear development characteristics of different heat-resistant summer maize cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19): 3954-3963 (in Chinese)
- [5] 贾良良, 黄少辉, 刘学彤, 杨云马, 孙彦铭. 花期高温对不同夏玉米品种花粉活力和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 92-95
- Jia L L, Huang S H, Liu X T, Yang Y M, Sun Y M. Effect of high temperature during the flowering period on pollen vigor and yield of different summer maize cultivars[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(18): 92-95 (in Chinese)
- [6] 徐田军, 吕天放, 张勇, 刘宏伟, 刘月娥, 蔡万涛, 张如养, 宋伟, 邢锦丰, 赵久然, 王荣焕. 高温胁迫对玉米杂交种及其亲本自交系光合特性、保护酶活性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1470-1480
- Xu T J, Lyu T F, Zhang Y, Liu H W, Liu Y E, Cai W T, Zhang R Y, Song W, Xing J F, Zhao J R, Wang R H. Effects of high-temperature stress on photosynthetic characteristics, protective enzyme activity, and yield of maize hybrids along with their parental inbred lines[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(9): 1470-1480 (in Chinese)
- [7] 张川, 刘栋, 王洪章, 任昊, 赵斌, 张吉旺, 任佰朝, 刘存辉, 刘鹏. 不同时期高温胁迫对夏玉米物质生产性能及籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(19): 3710-3722
- Zhang C, Liu D, Wang H Z, Ren H, Zhao B, Zhang J W, Ren B Z, Liu C H, Liu P. Effects of high temperature stress in different periods on dry matter production and grain yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(19): 3710-3722 (in Chinese)
- [8] 吴伟华, 王秋岭, 张运栋, 闫海霞, 袁刘正, 付家锋, 李腾, 王蕊, 刘康, 柳家友. 拔节至大喇叭口期高温胁迫对夏玉米穗粒形状的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(4): 62-69
- Wu W H, Wang Q L, Zhang Y D, Yan H X, Yuan L Z, Fu J F, Li T, Wang R, Liu K, Liu J Y. Effects of high temperature stress on ear and grain morphology of summer maize during jointing to big trumpet stage[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(4): 62-69 (in Chinese)
- [9] 李淑君, 张丕辉, 付忠军, 祁志云, 杨华, 金川, 董昕. 玉米花期不同种质资源耐热性鉴定与分析[J]. 玉米科学, 2019, 27(4): 22-31
- Li S J, Zhang P H, Fu Z J, Qi Z Y, Yang H, Jin C, Dong X. Identification and analysis for the thermotolerance of different germplasm in maize at anthesis[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(4): 22-31 (in Chinese)
- [10] 赵文明, 崔亚坤, 孔令杰, 张美景, 孟庆长, 刘瑞响, 袁建华, 陈艳萍. 花期高温对不同耐热性鲜食糯玉米杂交种的影响[J]. 江西农业学报, 2025, 37(7): 28-31
- Zhao W M, Cui Y K, Kong L J, Zhang M J, Meng Q C, Liu R X, Yuan J H, Chen Y P. Effects of high temperature during anthesis period on different heat-resistant fresh waxy maize hybrids[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2025, 37(7): 28-31 (in Chinese)
- [11] 穆心愿, 宋森, 马智艳, 魏骏坤, 刘天学, 胡秀丽, 赵亚丽, 黄收兵, 李春苗, 夏来坤. 夏玉米光合特性及产量对花期高温胁迫的响应[J]. 南方农业学报, 2025, 56(5): 1361-1378, 1343
- Mu X Y, Song M, Ma Z Y, Kui J K, Liu T X, Hu X L, Zhao Y L, Huang S B, Li C M, Xia L K. Responses of photosynthetic characteristics and yield of summer maize to high temperature stress during flowering[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2025, 56(5): 1361-1378, 1343 (in Chinese)
- [12] 宋旭东, 朱广龙, 张舒钰, 章慧敏, 周广飞, 张振良, 冒宇翔, 陆虎华, 陈国清, 石明亮, 薛林, 周桂生, 郝德荣. 长江中下游地区糯玉米花期耐热性鉴定及评价指标筛选[J]. 作物学报, 2024, 50(1): 172-186
- Song X D, Zhu G L, Zhang S Y, Zhang H M, Zhou G F, Zhang Z L, Mao Y X, Lu H H, Chen G Q, Shi M L, Xue L, Zhou G S, Hao D R. Identification of heat tolerance of waxy maizes at flowering stage and screening of evaluation indexes in the middle and lower reaches of Yangtze River region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(1): 172-186 (in Chinese)
- [13] 陈静, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 叶面喷施甜菜碱对不同播期夏玉米产量形成及抗氧化能力的调控[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1502-1515
- Chen J, Ren B Z, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Regulation of leaf-spraying *Glycine* betaine on yield formation and antioxidation of summer maize sowed in different dates[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1502-1515 (in Chinese)
- [14] 王慧丽, 钟苑宁, 杨晗, 马玉诏, 乔匀周, 张小帅, 黄欣莉, 董宝娣. 水分和温度对藜麦种子萌发出苗及籽粒产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 95-103
- Wang H L, Zhong Y N, Yang H, Ma Y Z, Qiao Y Z, Zhang X S, Huang X L, Dong B D. Effects of water and temperature on seed germination and grain yield of quinoa[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(1): 95-103 (in Chinese)
- [15] 齐学礼, 王永霞, 陈鹏, 杜习军, 王信, 赵明忠, 张煜, 董海滨. 不同胁迫下郑麦0943的耐低氮高温特性研究[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(2): 187-194
- Qi X L, Wang Y X, Chen P, Du X J, Wang X, Zhao M Z, Zhang Y, Dong H B. Study on physiological characters of a wheat variety named Zhengmai 0943 to low nitrogen and high temperature stresses[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2024, 58(2): 187-194 (in Chinese)
- [16] 杨娅坤, 赵艳, 李亮锴, 吴秀茹, 赵飞, 刘建, 张欣, 李萍, 施利利, 郭超, 唐占兵. 盐胁迫对水稻幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2024, 22(23): 7803-7810
- Yang Y K, Zhao Y, Li L K, Wu X R, Zhao F, Liu J, Zhang X, Li P, Shi L L, Guo C, Tang Z B. Effects of salt stress on the growth, development and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(23): 7803-7810 (in Chinese)
- [17] 魏廷邦, 胡发龙, 赵财, 冯福学, 于爱忠, 刘畅, 柴强. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2916-2927
- Wei T B, Hu F L, Zhao C, Feng F X, Yu A Z, Liu C, Chai Q. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing application in Oasis irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2916-2927 (in Chinese)
- [18] 闫振华, 刘东尧, 贾绪存, 杨琴, 陈艺博, 董鹏飞, 王群. 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
- Yan Z H, Liu D Y, Jia X C, Yang Q, Chen Y B, Dong P F, Wang Q. Maize tassel development, physiological traits and yield under heat and drought stress during flowering stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3592-3608 (in Chinese)
- [19] 张志方, 张守林, 徐国举, 王良发, 刘桂珍. 夏玉米对花期高温逆境的响应与耐热性分析[J]. 玉米科学, 2024, 32(5): 40-49, 59
- Zhang Z F, Zhang S L, Xu G J, Wang L F, Liu G Z. Analysis of response and resistance of summer maize to high temperature stress during anthesis[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(5): 40-49, 59 (in Chinese)
- [20] Wang Y Y, Tao H B, Tian B J, Sheng D C, Xu C C, Zhou H M, Huang S B, Wang P. Flowering dynamics, pollen, and pistil contribution to grain yield in response to high temperature during maize flowering[J]. *Environmental*

- and *Experimental Botany*, 2019, 158: 80-88
- [21] 穆心愿, 吕姗姗, 卢良涛, 刘天学, 李树岩, 薛昌颖, 王宏伟, 赵霞, 夏来坤, 唐保军. 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, Liu T X, Li S Y, Xue C Y, Wang H W, Zhao X, Xia L K, Tang B J. 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 (in Chinese)
- [22] 李曼非, 段奥, 蒋凤林, 黄敏, 杜何为, 张祖新. 玉米花序分枝和穗粒数发育的分子调控[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(1): 44-52
- Li M F, Duan A, Jiang F L, Huang M, Du H W, Zhang Z X. Molecular regulation on the development of reproductive branches and kernel number in maize inflorescences[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(1): 44-52 (in Chinese)
- [23] 于康珂, 孙宁宁, 詹静, 顾海靖, 刘刚, 潘利文, 刘天学. 高温胁迫对不同热敏型玉米品种雌雄穗生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(4): 84-91
- Yu K K, Sun N N, Zhan J, Gu H J, Liu G, Pan L W, Liu T X. Effect of high temperature stress on physiological characteristics of tassel and ear in different maize varieties[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(4): 84-91 (in Chinese)
- [24] Hatfield J L, Prueger J H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2015, 10: 4-10
- [25] Lizaso J I, Ruiz-Ramos M, Rodríguez L, Gabaldon-Leal C, Oliveira J A, Lorite I J, Sánchez D, García E, Rodríguez A. Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 129-140
- [26] Li Z G, Xu Y, Bai L K, Zhang S Y, Wang Y. Melatonin enhances thermotolerance of maize seedlings (*Zea mays* L.) by modulating antioxidant defense, methylglyoxal detoxification, and osmoregulation systems[J]. *Protoplasma*, 2019, 256(2): 471-490
- [27] 杨敏, 李向岭, 韩金玲, 杨晴, 王健. 烟噻磺隆胁迫对甜玉米幼苗活性氧积累、抗氧化系统及相关基因表达的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9): 2182-2193
- Yang M, Li X L, Han J L, Yang Q, Wang J. Nicosulfuron stress on active oxygen accumulation, antioxidant system and related gene expression in sweet maize seedlings[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(9): 2182-2193 (in Chinese)
- [28] 王志刚, 赵延蓉, 黄思麒, 王悦娟, 起金娥, 魏玉清. 外源海藻糖影响甜高粱幼苗抗旱性的生理生化机制[J]. 植物生理学报, 2022, 58(4): 654-666
- Wang Z H, Zhao Y R, Huang S Q, Wang Y J, Qi J E, Wei Y Q. Physiological and biochemical mechanism of exogenous trehalose on drought resistance in sweet sorghum seedlings[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(4): 654-666 (in Chinese)
- [29] 丁璐, 刘海学, 王聿双, 牟美睿, 杨仁杰. 26个玉米杂交组合农艺性状的相关性与主成分分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(3): 995-1002
- Ding L, Liu H X, Wang Y S, Mu M R, Yang R J. Correlation and principal component analysis of the agronomic traits of 26 corn hybrids combinations [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(3): 995-1002 (in Chinese)
- [30] 杨锦越, 任洪, 赵晓燕, 沈建华, 王安贵, 王竹. 灰色关联分析和聚类分析在玉米品种综合评判中的应用[J]. 种子, 2021, 40(12): 107-115
- Yang J Y, Ren H, Zhao X Y, Shen J H, Wang A G, Wang Z. Application of grey correlation analysis and cluster analysis in comprehensive evaluation of maize varieties[J]. *Seed*, 2021, 40(12): 107-115 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 刘朋程, 硕士, 河北省农林科学院旱作农业研究所副研究员, 主要研究方向是早熟、抗逆玉米新品种选育及配套栽培技术等工作。作为主研人培育出玉米品种‘衡玉 9186’和‘衡玉 878’; 以第一作者身份在《干旱地区农业研究》《西南农业学报》《江苏农业科学》等国内外专业期刊发表论文 7 篇, 其中 SCI 收录 1 篇, 参编著作 1 部; 授权发明专利 2 项, 实用新型专利 3 项; 参与制定河北省地方标准 1 项; 主持制定衡水市地方标准 1 项。



通讯作者简介: 卜俊周, 研究员, 河北省农林科学院旱作农业研究所玉米育种研究室主任, 主要从事早熟、耐密、宜粒收夏玉米新品种选育工作。河北省农作物品种审定委员会委员。先后培育出‘衡玉 321’‘中地 175’‘衡玉 7188’等 12 个玉米品种通过审定; 获得品种保护授权 10 项; 获发明专利 5 项, 实用新型专利 8 项; 获河北省科技进步奖 2 项, 河北省农科院科技进步奖 2 项, 河北省科技厅鉴定成果 2 项; 主笔发表论文 38 篇, 其中中文核心期刊 10 篇, SCI 8 篇, 参编专著 3 部; 主持制定河北省地方标准 1 项; 多次获河北省农科院优秀共产党员等荣誉称号。