

詹鹏麟, 张 扬, 林建新, 等. 3 个优质甜玉米品种幼苗及田间耐寒性分析 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (3): 243–250.

ZHAN P L, ZHANG Y, LIN J X, et al. The Cold Tolerance Analysis of Three Sweet Maize Cultivars in Seedlings and Field [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (3): 243–250.

3 个优质甜玉米品种幼苗及田间耐寒性分析

詹鹏麟, 张 扬, 林建新, 卢和顶, 许 静, 庄 炜, 陈山虎, 廖长见*

(福建省农业科学院作物研究所/玉米研究中心, 福建 福州 3500013)

摘 要:【目的】为提升甜玉米产值, 生产上常需要促早和冬种栽培, 但两种栽培模式会经历低温危害过程, 因此鉴定耐寒性甜玉米品种在种植和推广具有重要应用价值。【方法】以闽甜 6855 及同生态应用品种萃甜 618 和广良甜 27 号 (简称广良 27) 为供试材料, 采用室内和大田低温表型鉴定, 对幼苗耐寒性生理指标及大田果穗外观品质性状进行比较分析。【结果】(1) 3 个品种幼苗进行 4 °C 处理 24、48、72 h 后, 表型性状结果发现闽甜 6855 耐寒性最强, 萃甜 618 次之, 广良 27 最弱。(2) 对低温处理下 5 个耐寒指标检测发现, 在 48 h 下闽甜 6855 中超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 酶活含量分别为 315.43 和 429.81 U·g⁻¹, 过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性为 771.97 μmol·min⁻¹·g⁻¹, 分别比萃甜 618 高 13.9%、109.1% 和 28.5%, 比广良 27 高 34.3%、86.4% 和 18.8%; 丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量在闽甜 6855 中积累最低; 而可溶性蛋白质 (Soluble protein, SP) 含量在闽甜 6855 中显著高于广良 27。(3) 耐寒指标相关性分析发现, SOD 酶活性与处理时间和 CAT 酶活性有极显著相关性, 与 SP 酶活性具有显著性相关。(4) 冬季大田种植, 采后比较果穗特性, 发现闽甜 6855 结实性最好, 外观好, 无缺粒现象; 穗行数达 15.6、出籽率 71.68%, 高于萃甜 618 和广良 27, 秃尖长最短。【结论】闽甜 6855 幼苗期在表型和生理上具有更明显的耐寒性, 低温下果穗外观品质优势强, 具有重要推广应用价值。

关键词: 甜玉米; 苗期; 耐寒性; 生理指标; 出籽率

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 03-0243-08

The Cold Tolerance Analysis of Three Sweet Maize Cultivars in Seedlings and Field

ZHAN Penglin, ZHANG Yang, LIN Jianxin, LU Heding, XU Jing, ZHUANG Wei,

CHEN Shanhu, LIAO Changjian*

(Maize Research Center/Institute of Crop Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences,

Fuzhou, Fujian 350013, China)

Abstract: 【Objective】 Three cold-tolerant sweet maize cultivars were tested at seedling stage as well as in the field to select the variety for extending growth season to increase productivity. 【Method】 An indoor experiment using seedlings of Mintian 6855, Cuitian 618, and Guangliangtian NO. 27 (named Guangliang 27) was conducted at 4 °C for varied durations. A field test was also carried out on the plants in cold weather. Phenotype identification was used to compare and analyze the physiological indices on the seedlings and the ear appearance in the field. 【Results】 (1) Phenotypic appearances of Mintian 6855 seedlings of the 3 cultivars showed the strongest cold tolerance after being treated at 4 °C for 24, 48, and 72 h, while Guangliang 27 seedlings were the weakest. (2) The activities of SOD, CAT, and POD of the Mintian 6855 seedlings in 48 h were respectively 315.43 U·g⁻¹, 771.97 μmol·min⁻¹·g⁻¹, and 429.81 U·g⁻¹; 13.9%, 28.5%, and 109.1% higher than those of Cuitian 618; and 34.3%, 18.8%, and 86.4% higher than those of Guangliang 27. Among the 3 cultivars, Mintian 6855 accumulated MDA in the least amount. The SP content in Mintian 6855 was significantly higher than that in Guangliang 27. (3) The SOD activity was extremely significant correlated with the treatment time. The CAT and SOD activities significantly correlated with the SP

收稿日期: 2023-12-18 修回日期: 2024-02-19

作者简介: 詹鹏麟 (1991—), 男, 助理研究员, 主要从事玉米遗传育种及生物技术研究, E-mail: 874751264@qq.com

* 通信作者: 廖长见 (1979—), 男, 副研究员, 主要从事玉米遗传育种及生物技术研究, E-mail: liaocj1978@163.com

基金项目: 福建省科技计划公益类专项 (2021R1031006、2022R1031001); 福建省种业创新与产业化工程项目 (zycxny2021006); 福建省农业科学院自由探索科技创新项目 (ZYT2023004)

content. (4) In the field test, the well-developed ears harvested from the winter crop of Mintian 6855 had an appealing appearance free of any missing kernels. On average, the plants produced significantly more rows of kernels at 15.6 and dry kernel yield at 71.68% per ear than did Cuitian 618 or Guangliang 27. 【Conclusion】 Mintian 6855 was significantly more tolerant to low temperatures as shown phenotypically and physiologically at seedling stage. As a mature plant in the field, it bore appealing ears under cold climate.

Key words: sweet maize; seedling stage; cold tolerance; physiological indices; Kernel rate

0 引言

【研究意义】玉米 (*Zea mays* L.) 是世界上最重要的粮食作物之一, 原产于热带地区, 对低温敏感, 进而限制了玉米在高纬度地区的生长。其中甜玉米是一种深受人们喜爱的水果蔬菜, 其营养丰富, 风味独特、适口, 越来越受人们的喜爱^[1-2]。由于全球的气候持续变化, 作物经常面对不利的生长环境, 如低温、干旱、盐碱和水淹等^[3]。低温冷害早期影响幼苗的生长和发育、灌浆期影响籽粒发育等问题, 导致玉米产量严重下降; 为了错期上市, 提升种植甜玉米的产值, 生产上常常需要促早和冬种栽培, 但是两种栽培模式可能在苗期和开花授粉期遭遇低温危害。因此, 培育出耐寒性好的品种是目前生产上亟待解决的问题^[4]。【前人研究进展】低温胁迫导致植物细胞光合效率降低、膜硬化和活性氧水平改变^[5]。细胞膜是对环境胁迫最敏感的植物器官, 当植物受到低温胁迫, 细胞膜内电解质和其他小分子物质的渗透性改变, 导致离子交换不平衡, 出现脱水、萎蔫和发黄等症状^[6]。当温度降至 6~8 ℃ 时, 玉米种子不发芽, 幼苗死亡。在生殖生长过程中, 冷胁迫会导致玉米的雄穗变长、吐丝异常, 直接影响玉米的品质和产量^[7-8]。低温胁迫导致玉米 SOD 活性急剧降低, 耐寒性强的品种其 SOD 活性下降速率较耐寒性弱的品种缓慢, 耐寒性强的品种 POD 活性增加幅度小; 低温胁迫下玉米幼苗叶片 SOD、CAT 活性变化随着温度降低先上升后下降, 就同一温度而言, 耐寒品种下降幅度明显小于不耐寒品种^[9-11]。截至目前, 已报道一些玉米耐寒性研究, 王腾飞等^[12]利用玉米品种青农 8 号、郑单 958 和农大 108 进行苗期耐寒性生理生化分析, 测定了 10 ℃ 和 4 ℃ 处理下 MDA、CAT 和 SOD 等耐寒指标, 确定了新品种青农 8 号具有较好耐寒性。张海艳^[13]利用京科糯 2000、鲁糯 6 号和东方甜 1 号进行低温种子发芽和幼苗耐寒性评价, 表明低温下甜玉米种子萌发受抑程度大于糯玉米, 苗比根对低温更敏感。【本研究切入点】甜玉米易受低温胁迫影响, 严重导致甜玉米的产量及外观品质下降^[5, 14]。

关于甜玉米品种苗期耐寒性及冬种地区玉米产量性状和外观品质的研究有待深入进行。本研究以自育的优质耐寒甜玉米品种闽甜 6855 为材料基础, 与同生态应用品种广良 27 和萃甜 618 玉米进行苗期耐寒性生理生化比较, 结合大田种植, 鉴定产量和品质【拟解决的关键问题】本研究将系统阐明闽甜 6855 在幼苗期耐寒性生理生化指标的动态变化, 确定闽甜 6855 耐寒性与生理指标的关系; 鉴定冬种期间闽甜 6855 耐寒性在产量和品质性状的特点, 一方面为甜玉米耐寒评价指标提供理论依据, 另一方面为耐寒品种选育和推广提供重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为闽甜 6855、广良甜 27 号 (简称广良 27) 和萃甜 618, 闽甜 6855 为福建省农业科学院作物研究所选育, 广良 27 和萃甜 618 材料由福州立信种苗有限公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 冷胁迫处理

采用育苗方式播种, 盆直径 3 cm, 高 4.5 cm。室外正常培养玉米至两叶一心时, 选择无病、健壮、生长势均匀的幼苗置于 KBW240 型低温培养箱 (德国 Binder 公司) 中 4 ℃ 冷处理 (除了温度外, 其他培养条件均相同), 光照时间为 12 h, 光照强度为 3 级 (约 10 000 lx), 每个处理 20 株, 3 次重复。每隔 24 h 取样 1 次, 共处理 72 h。每次取样随机选取 5 株, 剪取相同部位叶片。以未经冷处理的样品为对照 (即温度 25 ℃), 进行抗冷性相关指标测定。

1.2.2 生理指标测定

超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量、可溶性蛋白质 (Soluble protein, SP) 含量测定均采用微量法^[15]。在 4 ℃ 恒温培养箱中对样品进行处理, 每隔 24 h 取样 1 次, 测定各项生理生化指标, 共处理 72 h, 各项生理生化指标的 3 次取样的平均值作为各温度下的测量值。

1.2.3 田间试验

对闽甜 6855、广良 27 和萃甜 618 进行田间试验比较，小区面积为 20 m²，2020 年 11 月 5 日播种于广东湛江徐闻县迈陈镇讨墩村。每份材料种植 6 行，最外 2 行为保护行，中间 4 行用于玉米果穗性状考察。选取中部位置随机采收 10 个玉米穗，考察穗部性状，包括穗长、穗粗、秃尖、行粒数、穗行数、轴重、籽粒重、鲜重甜度等。

1.3 数据处理

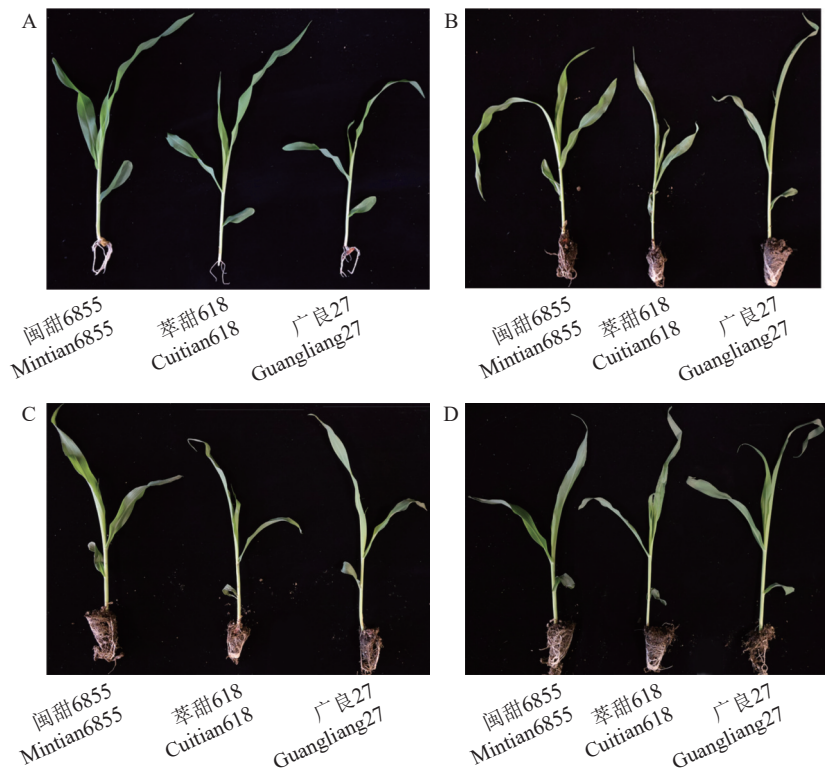
利用软件 IBM SPASS statistic 20，两个群体之间的比较使用的是独立样本 *t* 测验，多重比较使用的是 Duncan's 多重测验，*P* < 0.05。运用 Origin 2021 进

行相关性分析和图片绘制，PS6.0 进行图组拼合。

2 结果与分析

2.1 低温处理下玉米幼苗表型变化

如图 1 所示，当 4 ℃ 处理 24 h 后，广良 27 叶尖部表现出脱水的表型（图 1B）；处理 48 h 后，3 份材料叶尖部分均有不同程度的脱水特点，其中广良 27 最明显（图 1C）；处理 72 h 后，广良 27 叶片萎蔫，萃甜 618 大部分叶片脱水，而闽甜 6855 脱水存在叶片上部（图 1D）；综合低温处理表型，闽甜 6855 抗寒最强，萃甜 618 次之，广良 27 对低温最敏感。



A~D 分别为 4 ℃ 处理 0、24、48、72 h。

A~D: treated at 4℃ for 0, 24, 48, and 72 h, respectively.

图 1 低温处理不同时间下甜玉米幼苗表型比较

Fig. 1 Phenotypic appearances of sweet maize seedlings grown at 4 °C for varied durations

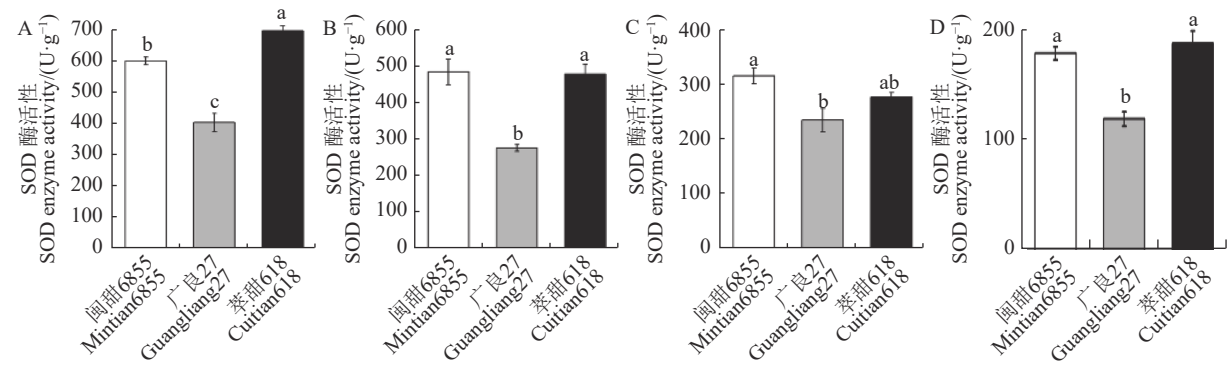
2.2 低温胁迫下玉米幼苗 SOD 活性分析

在植物正常生长状态下，ROS 的生成和去除处于动态平衡状态，当植物受到低温胁迫，打破了 ROS 平衡，促使 ROS 含量的升高引起各种有害的细胞学效应^[16]。植物为清除 ROS 产生的活性氧，一系列活性氧清除酶产生，如 SOD、CAT 和 POD 等^[17]。本研究分别对 3 份材料不同时间低温处理下 SOD 酶活性进行检测。如图 2 所示，SOD 酶活性随着低温处理时间增长表现出逐渐下降的趋势；其中，广良 27 的 SOD 酶活性在 4 个时期均表现出显著低于闽甜

6855 和萃甜 618，而闽甜 6855 和萃甜 618 两者之间在低温处理下 SOD 酶活性差异显著性不明显。这些结果表明 3 份材料中广良 27 对低温更敏感。

2.3 低温胁迫下玉米幼苗 CAT 活性分析

为进一步了解清除活性氧的酶含量，对闽甜 6855、广良 27 和萃甜 618 幼苗低温胁迫下过氧化氢酶（CAT）活性进行测定。如图 3 所示，在未处理的情况下，萃甜 618 品种中 CAT 酶活性显著高于闽甜 6855 和广良 27，含量达 1011.02 μmol·min⁻¹·g⁻¹。当 4 ℃ 处理 24 h，闽甜 6855 中 CAT 活性表现出上升的



A~D 分别表示低温处理 0、24、48、72 h。不同的小写字母表示具有显著性差异， $P < 0.05$ 。下同。

A~D were treated at 4 °C for 0, 24, 48, 72 h, respectively. Data with different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$. Same for below.

图 2 低温处理下甜玉米幼苗 SOD 酶活性比较
Fig. 2 SOD activity of sweet maize seedlings at 4 °C

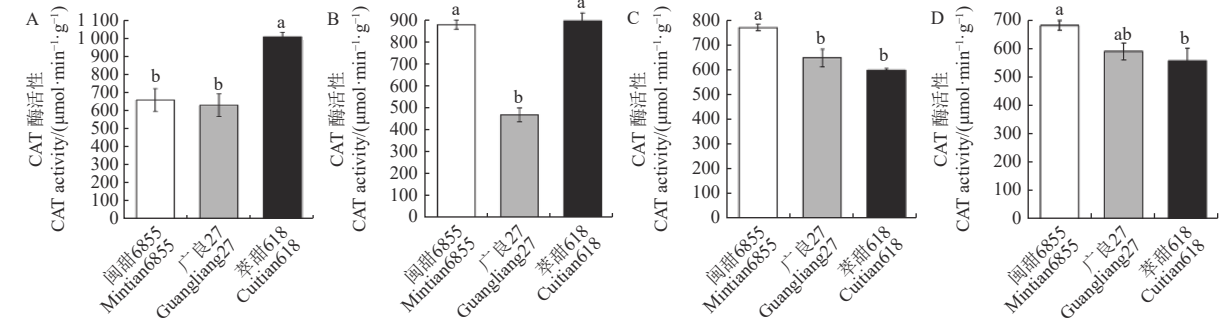


图 3 低温处理下甜玉米幼苗 CAT 酶活性比较
Fig. 3 CAT activity of sweet maize seedlings at 4 °C

趋势，而广良 27 和萃甜 618 呈现出下降的特点；当处理 48 h 和 72 h，闽甜 6855 中 CAT 活性显著高于广良 27 和萃甜 618，而萃甜 618 中 CAT 活性下降最快，这些结果表明闽甜 6855 表现抗寒性可能与 CAT 活性密不可分。

2.4 低温胁迫下玉米幼苗 POD 活性分析

为进一步确定闽甜 6855 耐寒性，检测 POD 酶在不同低温处理时间下活性变化。如图 4 所示，在处理 0 h 下，广良 27 中 POD 酶活性显著高于闽甜 6855 和萃甜 618；当低温处理 24 h 后，广良 27 中

POD 酶活性迅速下降，而闽甜 6855 和萃甜 618 却表现出活性增加，且达显著性差异。随着处理时间的增长，广良 27 和萃甜 618 中 POD 酶活性呈现逐渐下降的趋势，与闽甜 6855 相比均达到显著性差异，这些结果进一步说明闽甜 6855 具有更好的耐寒性。

2.5 低温胁迫下玉米幼苗 MDA 含量测定

细胞膜通透性增加和电解质不平衡通过与膜蛋白等物质交联影响 MDA 含量。此外，MDA 含量可作为植物体内活性氧（ROS）累积损伤的指标，MDA 含量较高则植物细胞损伤较为严重^[18]。如图 5 所示，

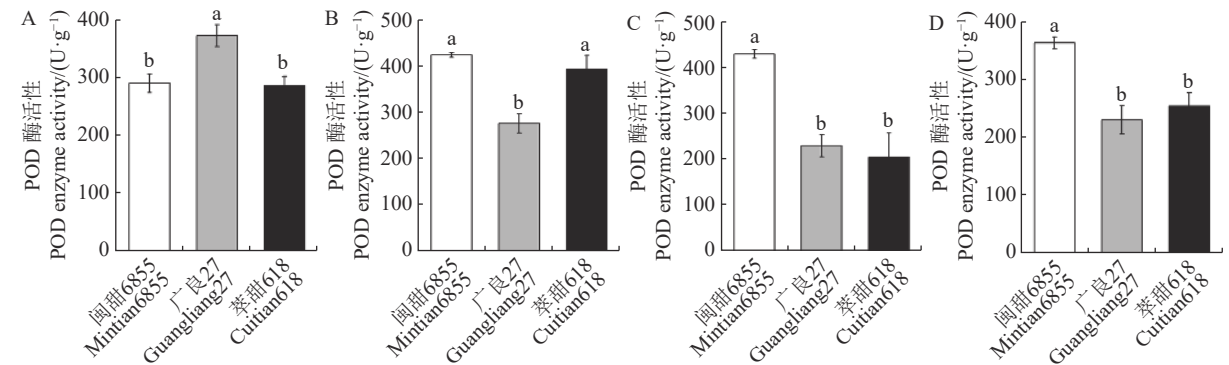


图 4 低温处理下甜玉米幼苗 POD 酶活性比较
Fig. 4 POD activity of sweet maize seedlings at 4 °C

广良 27 在低温处理的各个时期均表现出 MDA 含量显著高于闽甜 6855 和萃甜 618；而闽甜 6855 各个时

期的 MDA 含量均低于萃甜 618，说明了广良 27 相较于其余 2 个品种耐寒性较弱，而闽甜 6855 耐寒性更好。

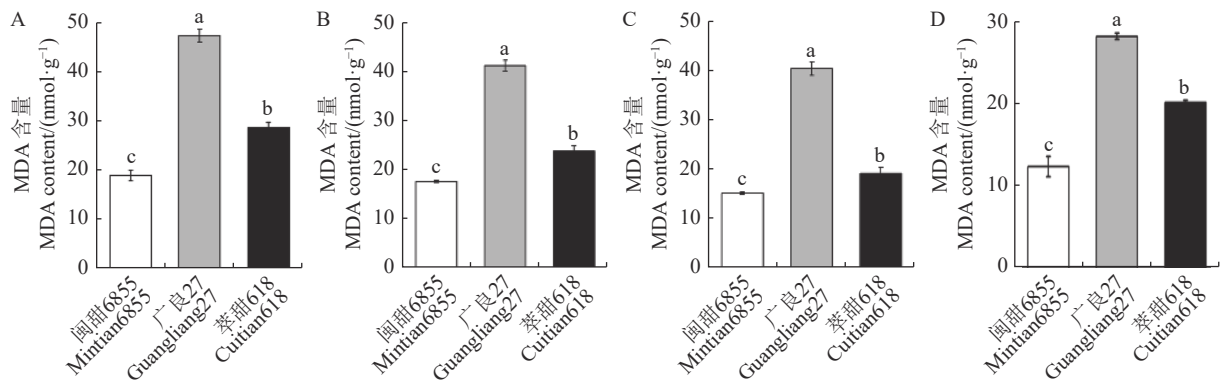


图 5 低温处理下甜玉米幼苗 MDA 含量比较
Fig. 5 MDA content of sweet maize seedlings at 4 °C

2.6 低温胁迫下 SP 含量变化

不仅仅 SOD、CAT、POD 和 MDA 是反映植物耐寒性的重要生理指标，可溶性蛋白（SP）也参与了植物耐寒性响应，SP 含量高则植物表现出较好的

耐寒性^[8]。如图 6 所示，在低温处理 0、24、72 h 下 3 个品种之间 SP 含量无显著差异，仅只有 48 h 处理下，闽甜 6855 和萃甜 618 表现出 SP 显著高于广良 27。

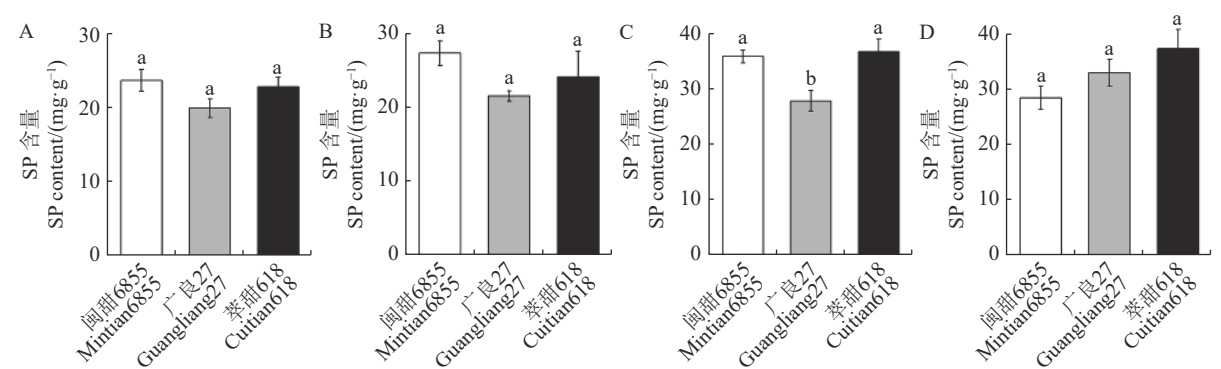


图 6 低温处理下甜玉米幼苗 SP 含量比较
Fig. 6 SP content of sweet maize seedlings at 4 °C

2.7 不同时间低温处理下 5 个生理指标的相关分析

基于对 3 个甜玉米品种闽甜 6855、广良 27 和萃甜 618 不同低温处理时间的耐寒生理指标测定，对 SOD、CAT、POD、MDA、SP 和处理时间（Time）之间进行相关性分析。如图 7 所示，不同低温处理时间与 SOD 酶活性呈极显著负相关，与 SP 含量呈极显著正相关，而与其它指标无相关性。SOD 酶活性与 CAT 酶活性呈极显著正相关，与 SP 含量呈显著负相关。而 POD 酶活性和 MDA 含量与其他指标均不存在相关性。

2.8 冬季田间种植 3 份材料的产量及品质分析

玉米籽粒在灌浆期的生长发育过程受低温影响较大，表现在低温显著延长了灌浆时间，降低灌浆的平均灌浆速率和最大灌浆速率^[19]。因此，灌浆速率和籽粒饱满度也是反映玉米品种耐寒性的一个重要指标。为进一步了解闽甜 6855、萃甜 618 和广良

27 材料在授粉期后灌浆特点，将 3 份材料冬季种植于湛江徐闻地区，了解低温下 3 份材料授粉后籽粒

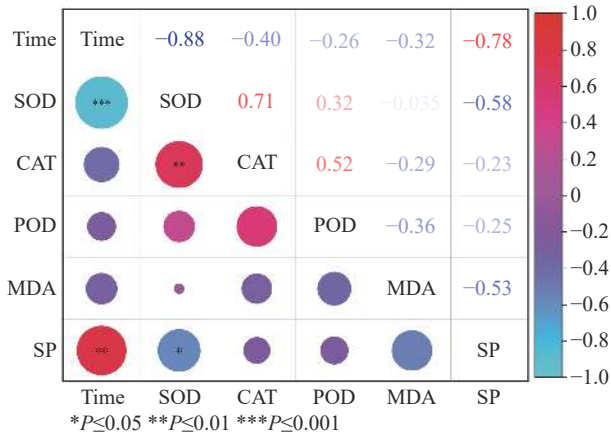


图 7 不同时间低温处理下生理指标相关性
Fig. 7 Correlation between physiological indices of maize and treatment conditions

的发育情况。如图 8A 和 8B 所示，闽甜 6855 果实饱满度最好，未出现缺粒特点；而萃甜 618 和广良 27 不同程度上有缺粒现象，这些结果表明闽甜 6855

具有更好的耐寒性。经产量农艺性状比较发现，广良 27 的果穗长、穗粗和果穗重最高，闽甜 6855 次之，萃甜 618 最低（图 8C-E）；穗行数性状闽甜

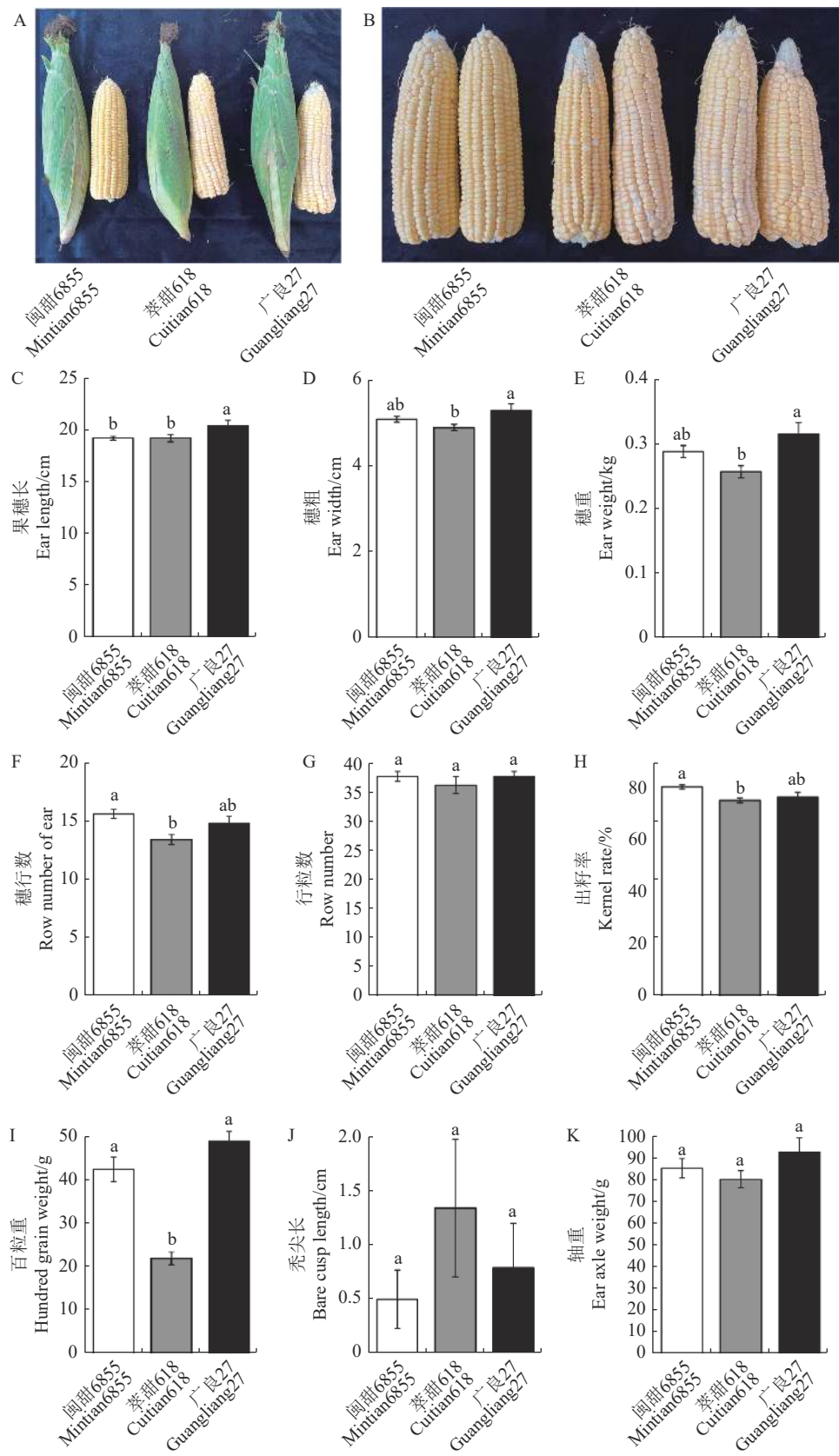


图 8 冬季种植下产量性状比较
Fig. 8 Yield traits of winter season sweet maize

6855达到15.6, 高于广良27和萃甜618(图8F); 行粒数性状三者之间无显著性差异(图8G)出籽率闽甜6855最高, 达71.68%(图8H); 百粒重闽甜6855和广良27显著高于萃甜618(图8I); 秃尖长和轴重2个性状在材料间均未达显著性差异(图8J-K)。综合外观表现和产量性状的特点, 表明闽甜6855在生育期具有更好的抗寒性, 冬种区种植具有更强的生产潜力。

3 讨论

玉米作为热带作物, 相较于其他粮食作物对冷胁迫更为敏感。苗期受到低温的胁迫, 将导致幼苗不同程度的损伤, 严重制约了玉米后续的发育和产量^[20-21]。低温胁迫影响玉米细胞内光合速率的下降、细胞膜硬化及活性氧水平的变化。活性氧(ROS)是植物细胞氧化还原反应或O₂活化的代谢物。此外, 它们的过度积累导致细胞膜脂质过氧化和细胞结构破坏, 使细胞内的蛋白质、糖和遗传物质等大分子中毒, 从而破坏植物的正常生长^[8]。然而, MDA含量可作为植物体内活性氧(ROS)累积损伤的指标, MDA含量高则说明植物细胞受ROS损伤越严重; 为了防止ROS积累过多, 植物细胞进化出一系列清除ROS的酶系统, 包括SOD、POD和CAT等^[8,22]。关于玉米品种耐寒性鉴定和比较, 大部分研究均进行了MDA、SOD、POD、CAT和SP等生理指标测定^[23-25]。本研究比较3个品种在低温处理下MDA、SOD、POD、CAT和SP含量变化, 发现SOD酶活性在3个品种中均随着处理时间的增长逐渐降低, 闽甜6855在24 h后SOD含量保持最高; CAT酶活性在闽甜6855中先升高, 随后逐渐下降, 而广良27和萃甜618却随着处理时间增加逐渐下降; POD酶活性表现出与CAT酶活性相似的变化趋势, 但3个酶活性在低温处理下均是闽甜6855活性最高。前人研究发现, 耐寒性强的玉米品种中SOD活性下降速率较耐寒性弱的品种缓慢, POD和CAT活性越高耐寒性越强, 我们的研究结果与前人研究结果趋势一致^[9-10]; 表明了闽甜6855相较于广良27和萃甜618在幼苗阶段具有更好的耐寒性。MDA含量在不同时间低温处理下均是闽甜6855含量最低, 表明了闽甜6855受到ROS的破坏最小, 进一步表明闽甜6855具有较好的耐寒性。SP含量在3个品种中多个时期差异不显著, 表明了闽甜6855具有较好耐寒性可能未涉及可溶性蛋白调控。综上所述表明闽甜6855可能主要通过调控SOD酶活性、POD酶活性、CAT酶活性和MDA含量来提高幼苗的耐寒性。

当玉米苗期、拔节期遭遇冷害植株将表现出矮壮, 雄穗生长缓慢等现象; 在抽雄期、吐丝期遭遇冷害的玉米植株导致雌穗发育、吐丝缓慢, 导致不育现象频发, 出现缺粒、空秆等特点^[26]。籽粒灌浆期、玉米成熟期遭受低温胁迫会抑制光合作用, 减缓籽粒灌浆速率, 导致玉米籽粒不能完成灌浆, 严重影响百粒重和籽粒品质, 最终影响产量^[27-28]。本研究开展冬季种植, 进行果穗表型考察, 发现闽甜6855相较于广良27和萃甜618具有更好的果穗外观品质和籽粒饱满度; 而广良27和萃甜618不同程度上存有缺粒和不饱满现象, 表明了闽甜6855在冬季田间种植具有更好的适应性。果穗性状比较发现果穗重、果穗长、果穗粗和百粒重均表现出广良27较高, 闽甜6855仅次于广良27, 出现这一现象原因主要是品种间差异。而穗行数和出籽率性状在闽甜6855中表现最高, 秃尖长性状在闽甜6855中最低, 这些结果表明了冬季田间种植闽甜6855相较于广良27和萃甜618具有更好的耐低温能力及授粉期后华南地区种植闽甜6855具有更强的优势性。

4 结论

本研究对闽甜6855、萃甜618和广良27等3个品种进行幼苗耐寒性分析, 表型和生理试验证实了闽甜6855在幼苗期具有较好的耐寒性。5个耐寒表征性指标相关分析表明SOD酶活性与处理时间和CAT酶活性有极显著相关, SP与SOD酶活性具有显著相关。3个品种在冬季种植的田间果穗性状比较表明, 闽甜6855具有更好的外观品质, 综合比较表明闽甜6855在幼苗期和灌浆期都具有更明显优势。

参考文献:

- [1] ALLEN D J, ORT D R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(1): 36-42.
- [2] 刘夫国, 牛丽影, 李大婧, 等. 鲜食玉米加工利用研究进展 [J]. *食品科学*, 2012, 33 (23): 375-379.
LIU F G, NIU L Y, LI D J, et al. Research progress in processing and utilization of fresh corn [J]. *Food Science*, 2012, 33(23): 375-379. (in Chinese)
- [3] RAY D K, GERBER J S, MACDONALD G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5989.
- [4] 李春艳, 毛笈华, 于永涛, 等. 甜玉米自交系萌芽期耐寒性的鉴定及筛选 [J]. *广东农业科学*, 2016, 43 (8): 22-26+2.
LI C Y, MAO J H, YU Y T, et al. Identification and screening of chilling tolerance of sweet corn inbred lines in seedling emergence stage [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(8): 22-26+2. (in Chinese)

- [5] ZENG R, LI Z Y, SHI Y T, et al. Natural variation in a type-a response regulator confers maize chilling tolerance [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4713.
- [6] TANG X D, AN B Y, CAO D M, et al. Improving photosynthetic capacity, alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress under low temperature stress with exogenous hydrogen sulfide in blueberry seedlings [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 108.
- [7] MA Y, TAN R X, ZHAO J R. Chilling tolerance in maize: Insights into advances-toward physio-biochemical responses' and QTL/genes' identification [J]. *Plants*, 2022, 11(16): 2082.
- [8] GUAN Y L, HWARARI D, KORBOE H M, et al. Low temperature stress-induced perception and molecular signaling pathways in plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 207: 105190.
- [9] 马延华, 王庆祥, 陈绍江. 玉米耐寒性生理生化机理与分子遗传研究进展 [J]. 玉米科学, 2013, 21 (3): 76-81.
MA Y H, WANG Q X, CHEN S J. Research progress on physio-biochemistry and molecular genetics of chilling tolerance in maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 76-81. (in Chinese)
- [10] AHMAD I. Effect of seed priming with ascorbic acid, salicylic acid and hydrogen peroxide on emergence, vigor and antioxidant activities of maize [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(5): 1127-1137.
- [11] 王瑞. 春玉米苗期抗冷性鉴定及其生理生化基础研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007
WANG R. Studies on cold resistance identification and its physiological and biochemical basis in spring maize seedling [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [12] 王腾飞, 裴玉贺, 郭新梅, 等. 3 个玉米品种苗期耐寒性鉴定 [J]. 核农学报, 2017, 31 (4): 803-808.
WANG T F, PEI Y H, GUO X M, et al. Identification of the cold tolerance of three maize varieties in the seedling stage [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(4): 803-808. (in Chinese)
- [13] 张海艳. 低温对鲜食玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 植物生理学报, 2013, 49 (4): 347-350.
ZHANG H Y. Effects of low temperature on seed germination and seedling growth of fresh corn [J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(4): 347-350. (in Chinese)
- [14] 王芳, 王洪, 赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展 [J]. 分子植物育种, 2019, 17 (15): 5144-5153.
WANG F, WANG Q, ZHAO X Y. Research progress of phenotype and physiological response mechanism of plants under low temperature stress [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(15): 5144-5153. (in Chinese)
- [15] 王成, 李月明, 郝楠, 等. 玉米自交系发芽期至苗期耐冷性鉴定 [J]. 种子, 2019, 38 (12): 6-12.
WANG C, LI Y M, HAO N, et al. Identification of Cold Tolerance of Maize Inbred lines from Germination to Seedling Stage [J]. *Seed*, 2019, 38(12): 6-12. (in Chinese)
- [16] DARVIZHEH H, ZAHEDI M, ABBASZADEH B, et al. Changes in some antioxidant enzymes and physiological indices of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) in response to water deficit and foliar application of salicylic acid and spermine under field condition [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 247: 390-399.
- [17] BUERGER P, ALVAREZ-ROA C, COPPIN C W, et al. Heat-evolved microalgal symbionts increase coral bleaching tolerance [J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): eaba2498.
- [18] SATO Y, MASUTA Y, SAITO K, et al. Enhanced chilling tolerance at the booting stage in rice by transgenic overexpression of the ascorbate peroxidase gene, OsAPXa [J]. *Plant Cell Reports*, 2011, 30(3): 399-406.
- [19] 张翼, 郝建平, 王璞, 等. 灌浆期低温对离体培养玉米强弱势粒发育的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (12): 2263-2273.
ZHANG X, HAO J P, WANG P, et al. Effects of low temperature on maize superior and inferior kernels development during grain filling *in vitro* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(12): 2263-2273. (in Chinese)
- [20] YI Q, ÁLVAREZ-IGLESIAS L, MALVAR R A, et al. A worldwide maize panel revealed new genetic variation for cold tolerance [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, 134(4): 1083-1094.
- [21] ZHAO J, LI K W, WANG R, et al. Yield data provide new insight into the dynamic evaluation of maize's climate suitability: A case study in Jilin Province, China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(6): 305.
- [22] SINGH S, KUMAR V, KAPOOR D, et al. Revealing on hydrogen sulfide and nitric oxide signals co-ordination for plant growth under stress conditions [J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 168(2): 301-317.
- [23] KIDOKORO S, SHINOZAKI K, YAMAGUCHI-SHINOZAKI K. Transcriptional regulatory network of plant cold-stress responses [J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(9): 922-935.
- [24] 杨德光, 马月, 蒋芳芳, 等. CaCl₂ 对低温胁迫及恢复后玉米自交系种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32 (S1): 147-152.
YANG D G, MA Y, JIANG F F, et al. Effects of CaCl₂ on seed germination and seedling physiological characteristics of maize inbred lines after low temperature stress and recovery [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(S1): 147-152. (in Chinese)
- [25] 杨小环, 赵维峰, 孙娜娜, 等. 外源水杨酸缓解低温胁迫对玉米种子萌发和早期幼苗生长伤害的生理机制 [J]. 核农学报, 2017, 31 (9): 1811-1817.
YANG X H, ZHAO W F, SUN N N, et al. Physiological mechanisms of exogenous salicylic acid-mediated low temperature tolerance in seed germination and early seedling growth of maize [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(9): 1811-1817. (in Chinese)
- [26] 张建国, 王振华, 曹靖生, 等. 不同来源国内外玉米自交系耐低温评价利用研究 [J]. 玉米科学, 2019, 27 (6): 7-12.
ZHANG J G, WANG Z H, CAO J S, et al. Evaluation and utilization of low temperature tolerance of maize inbred lines from different sources [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(6): 7-12. (in Chinese)
- [27] 胡宇, 梁烜赫, 赵鑫, 等. 低温冷凉区覆膜玉米籽粒灌浆速率和产量特征分析 [J]. 玉米科学, 2019, 27 (5): 95-100.
HU Y, LIANG X H, ZHAO X, et al. Analysis of grain filling rate and yield characteristics of film-covered maize in cold climate areas [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 95-100. (in Chinese)
- [28] 龚金龙, 张洪程, 胡雅杰, 等. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32 (2): 482-491.
GONG J L, ZHANG H C, HU Y J, et al. Effects of air temperature during rice grain-filling period on the formation of rice grain yield and its quality [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 482-491. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)