

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0652

西瓜苗期耐低温综合评价体系构建及指标筛选

海陶¹, 史骏², 张华峰², 张蕾琛², 胡紫蔚², 应泉盛², 何勇¹, 王毓洪²

(1. 浙江农林大学园艺科学学院 杭州 311300; 2. 宁波市特色园艺作物品质调控和抗性育种重点实验室·宁波市农业科学研究院 浙江宁波 315040)

摘要: 本文旨在构建西瓜苗期耐低温性的综合评价体系并筛选关键指标, 通过该体系能有效、准确地评价西瓜苗期的耐低温性, 为耐低温品种选育和早春栽培提供理论与技术支持。以 16 份遗传背景不同的西瓜材料为研究对象, 通过设置 4、6、8、10 °C 低温胁迫处理, 以 25 °C 常温处理为对照。以冷害指数为筛选指标确定最佳胁迫条件 (6 °C 处理 3 d), 测定该低温胁迫条件下幼苗的株高、叶长、叶宽、茎粗 4 项形态指标以及超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (CAT) 活性、丙二醛 (MDA) 含量、相对电导率 (EC) 和脯氨酸 (Pro) 含量 5 项生理指标的变化率。采用主成分分析 (PCA) 对指标进行降维和赋权, 结合隶属函数法和聚类分析对供试材料的耐低温性进行综合评价与等级划分, 并通过回归分析建立预测模型以筛选关键指标。通过主成分分析提取出 4 个主成分, 累计贡献率达 83.411%。通过综合评价 (D 值) 将 16 份材料划分为 3 类, 其中 WMN009、WMN016 和 WMN003 为强耐低温型; WMN010、WMN002 等 9 份材料为中等耐低温型; WMN014、WMN005 等 4 份材料为低温敏感型。回归分析进一步筛选出 5 个关键指标 (CAT 活性、SOD 活性、株高、叶长、相对电导率), 并建立了可靠的耐低温性预测模型 ($Y=1.012-0.108X3+0.017X4+0.195X5+0.749X6-0.072X9, R^2=0.983$)。本研究建立的综合评价体系与预测模型对提升西瓜苗期耐低温性评价的准确性与实用性具有重要实践价值。

关键词: 西瓜; 低温胁迫; 耐低温评价; 预测模型

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)05-038-10

Construction of a comprehensive evaluation system and screening of indicators for low-temperature tolerance of watermelon seedlings

HAI Tao¹, SHI Jun², ZHANG Huafeng², ZHANG Leichen², HU Ziwei², YING Quansheng², HE Yong¹, WANG Yuhong²

(1. College of Horticulture Science, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Ningbo Key Laboratory of Characteristic Horticultural Crops in Quality Adjustment and Resistance Breeding/Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, Zhejiang, China)

Abstract: This study aims to establish a comprehensive evaluation system for the low-temperature tolerance of watermelon seedlings and screen key indicators. Through this system, the low-temperature tolerance of watermelon seedlings can be effectively and accurately evaluated, providing theoretical and technical support for the breeding of low-temperature tolerant varieties and early spring cultivation. Taking 16 watermelon materials with different genetic backgrounds as the research objects, the control was achieved by setting up low-temperature stress treatment at 4, 6, 8 and 10 °C and normal temperature treatment at 25 °C. The cold damage index was used as the screening index to determine the optimal stress conditions (treatment at 6 °C for 3 days), and the change rate of four morphological indicators of seedlings, namely plant height, leaf length, leaf width and stem thickness, as well as five physiological indicators, namely superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA) content, relative electrical conductivity and proline (Pro) content, under this low-temperature stress condition were measured. Principal component analysis (PCA) was adopted to reduce the dimension and weight of the indicators. The low-temperature resistance of the test materials was compre-

收稿日期: 2025-09-11; 修回日期: 2026-01-08

基金项目: 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目 (2023Z115); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2021Z132); 国家西甜瓜产业技术体系 (CARS-26)

作者简介: 海陶, 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为西瓜育种与栽培。E-mail: 1259775539@qq.com

通信作者: 何勇, 男, 教授, 主要从事蔬菜栽培与品质调控等研究。E-mail: heyong@zafu.edu.cn

王毓洪, 男, 研究员, 主要从事瓜菜育种与栽培研究。E-mail: yhwangsc@163.com

hensively evaluated and classified by combining the membership function method and cluster analysis. A prediction model was established through regression analysis to screen the key indicators. Four principal components were extracted through principal component analysis, with a cumulative contribution rate of 83.411%. Through comprehensive evaluation (D value), 16 materials were classified into 3 categories: WMN009, WMN016 and WMN003 are of strong low-temperature resistance type; nine materials, including WMN010 and WMN002, are of medium low-temperature resistance type; four materials, namely WMN014 and WMN005, are of low-temperature sensitive type. Regression analysis further screened out five key indicators (CAT activity, SOD activity, plant height, leaf length, and relative electrical conductivity), and established a reliable low-temperature tolerance prediction model ($Y=1.012-0.108X3+0.017X4+0.195X5+0.749X6-0.072X9$, $R^2=0.983$). The comprehensive evaluation system and prediction model established in this study have important the value of practice in improving the accuracy and practicability of evaluating the low-temperature tolerance of watermelon seedlings.

Key words: Watermelon; Low-temperature stress; Low-temperature resistance evaluation; Predictive model

西瓜(*Citrullus lanatus* L.)为葫芦科西瓜属的一年生草本蔓生植物,是一种起源于热带的重要水果。作为一种重要的经济作物,西瓜生长周期短、产量高、营养丰富,深受种植户和消费者喜爱^[1-2]。然而,西瓜属于冷敏感作物,极不耐寒,其生长和发育的最适温度介于20~32℃,10℃以下时生长发育受限,甚至无法存活,在冬季和早春栽培时,低温是影响西瓜产量和品质的主要因素^[3-6]。因此,科学评价西瓜的耐低温性并选育耐低温西瓜品种,对提升冬季和早春栽培的稳定性、增加农户收益、推动西瓜产业可持续发展具有重要的生产实践意义。

在中国,低温是南方冬季和北方春季西瓜栽培最主要的非生物胁迫之一。目前,西瓜耐低温性的评价主要依赖于苗期的形态鉴定和生理生化指标。形态鉴定主要包括观察叶片颜色、形态变化等,而生理生化指标则涉及膜脂质变化、渗透物积累、抗氧化酶活性等^[7]。许勇等^[3]将西瓜低温下的形态变化进行了分级并确定了冷害指数,用于早期对西瓜耐低温性的判定,该方法具有快速、可行性强等优点,同时能反映品种间的耐低温性差异。王薇薇等^[4]利用低温处理将株高、叶面积、株鲜质量、根干质量、净光合速率、叶绿素a含量/叶绿素b含量、丙二醛含量等作为西瓜耐低温品种筛选的鉴定指标。Lu等^[8]通过测定冷胁迫下不同西瓜品种的叶绿素、脯氨酸和丙二醛(MDA)含量等确定了耐冷砧木能提高西瓜对非生物胁迫的抵抗能力。这些方法为早期判定西瓜耐低温性提供了重要依据,但存在人为误差大、不易测量等缺陷。其他作物耐低温性研究开始采用综合评价的方法,如主成分分析结合隶属函数法、聚类分析和回归分析等。黄超等^[9]运用主成分分析结合隶属函数和聚类分析对甜瓜耐低温性进行了综合评价,筛选出了与低温相关的关键指标。张蜀秋^[10]利用主成分分析及隶属函数法

对芝麻苗期耐热性进行了综合评价,从14个指标中筛选出9个关键指标,可以快速鉴定芝麻的耐热性能。但目前采用多元分析方法对西瓜耐低温性进行综合评价的研究较少。

鉴于此,笔者以16份遗传背景不同的西瓜材料为研究对象,在低温胁迫下,较为全面地筛选了适用于西瓜耐低温性的胁迫时间及温度,利用多元分析方法对西瓜耐低温性进行综合评价,旨在建立一套科学、准确性高且适用于西瓜耐低温评价的模型,以期对西瓜耐低温性评价提供一种可靠、全面的方法,也可为其他植物耐低温性研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

16份遗传背景差异明显的西瓜资源均由宁波市农业科学研究院提供。材料信息见表1。试验于2024年10月开始进行胁迫条件筛选,2024年11月开始进行评价体系构建。两次试验的16份西瓜材料从播种到幼苗培养均在宁波市农业科学研究所园艺作物品质调控和抗性育种重点实验室的人工气候箱(品牌:扬辉;型号:LEDR-1000)中进行。

1.2 方法

本试验采用完全随机设计。所有处理均在人工气候箱中独立随机布置。

1.2.1 胁迫条件筛选试验 挑选籽粒饱满的西瓜种子,参考李严曼等^[11]的方法,经55℃温水浸种2h后,置于28℃恒温箱中催芽至露白(24~48h),随后播种于50孔穴盘。将穴盘移入人工气候箱中,在光周期12h/12h(昼/夜)、昼温25℃(光照度30000lx)/夜温20℃(无光照)、空气相对湿度85%的条件下培养。待幼苗生长至3叶1心期,筛选长势基本一致的50株幼苗进行低温胁迫处理。设4、6、8和10℃等4个低温处理组,并以25℃为对照,连续处

表1 供试西瓜材料信息

| 编号 No. | 材料 Material | 来源地 Source | 编号 No. | 材料 Material | 来源地 Source |
|-----------|----------------|----------------------|-----------|----------------|-------------------------|
| 1 | WMN001 | 中国河南 Henan, China | 9 | WMN009 | 中国河南 Henan, China |
| 2 | WMN002 | 日本 Japan | 10 | WMN010 | 中国安徽 Anhui, China |
| 3 | WMN003 | 中国安徽 Anhui, China | 11 | WMN011 | 中国新疆 Xinjiang, China |
| 4 | WMN004 | 中国安徽 Anhui, China | 12 | WMN012 | 中国浙江 Zhejiang, China |
| 5 | WMN005 | 中国甘肃 Gansu, China | 13 | WMN013 | 中国河南 Henan, China |
| 6 | WMN006 | 中国河南 Henan, China | 14 | WMN014 | 日本 Japan |
| 7 | WMN007 | 日本 Japan | 15 | WMN015 | 日本 Japan |
| 8 | WMN008 | 中国安徽 Anhui, China | 16 | WMN016 | 中国山东 Shandong, China |

表2 冷害症状分级标准

| 分级 Classified | 冷害症状 Chilling injury symptoms |
|------------------|---|
| 0 | 无症状 Asymptomatic |
| 1 | 老叶边缘黄化或皱缩,花叶变形 The edges of the old leaves turn yellow or shriveled, and the flowers and leaves are deformed |
| 2 | 少数功能叶边缘黄化或皱缩,花叶变形,其他部分完好 The edges of a few functional leaves are yellowed or shriveled, and the mosaic leaves are deformed, while the rest of the parts remain intact |
| 3 | 功能叶缘以至全部皱缩或失绿,心叶完好 The edges of the functional leaves are all wrinkled or lose their green color, while the heart leaves remain intact |
| 4 | 功能叶完全变黄,失绿,萎蔫,心叶受伤害 The functional leaves turned completely yellow, lost their green color, wilted, and the heart leaves were damaged |
| 5 | 心叶受害严重,植株受冷害而全部萎蔫或死亡 The heart leaves were severely damaged, and the plants were completely wilted or died due to cold damage |

理9 d。分别于处理第3、6、9天调查冷害指数,冷害指数的调查以每10株为1组,每份材料在同一处理下设5次重复。

1.2.2 评价体系构建试验 育苗与培养方法同1.2.1。于幼苗3叶1心期,根据前期冷害指数筛选结果确定最佳胁迫条件为6℃处理3 d,并以此进行低温胁迫处理(6℃,光照度30 000 lx),每份材料另设25℃为对照。每份材料每处理设3次重复,每次重复10株。于处理第3天分别测定表型性状和生理指标。

1.3 测定项目和方法

冷害指数调查:参照许勇等^[3]的冷害分级方法(表2)统计各材料的冷害情况,以每10株为1个重复进行冷害症状调查并计算冷害指数,每份材料在同一处理下5次重复。冷害指数=Σ[(各级株数×级数)]/总株数。

生长指标测定:采用毫米刻度尺测量对照组和试验组的株高,幼苗的株高为茎基部到顶部生长点的距离,采用游标卡尺测量对照组和试验组的茎粗(茎粗均选择茎基部往上约2 cm处),叶长、叶宽用毫米刻度尺测量第一片功能叶平铺后的最长最宽数据,每份材料随机测定6株,取平均值。

叶片相对电导率测定:参照《植物生理学实验技术教程》中的电导仪法^[10],利用LE703型电导仪进行对照组和试验组相对电导率的测定,每份材料随机测定6株,取平均值。

生理指标的测定:选取从上往下数第3片功能

叶叶片组织0.1 g,采样后迅速放入液氮速冻再转入-80℃冰箱保存,供后续生理指标的测定。采用苏州格锐思生物技术有限公司的试剂盒,按照试剂盒使用说明测定超氧化物歧化酶(SOD)活性(货号:G0102W)、过氧化氢酶(CAT)活性(货号:G0106W)、丙二醛(MDA)含量(货号:G0110W)和脯氨酸(Pro)含量(货号:G0111W)。每个处理测定6株,取平均值。

1.4 数据分析

采用Excel 2010软件整理试验数据,采用R 4.5.2数据分析软件进行主成分分析、隶属函数分析、聚类分析和回归分析。

1.4.1 相对变化率的计算 为避免被试材料间基础性状不同对结果造成的影响,采用各指标的相对变化率进行评价体系的构建。相对变化率计算公式为:

$$R/\% = (Q_T - Q_{CK}) / Q_{CK} \times 100. \quad (1)$$

式中:R为相对变化率,Q_T为处理组各项指标的测定值,Q_{CK}为对照组各项指标的测定值。

1.4.2 主成分分析及多元分析方法 通过SPSS主成分分析得到所提取的各主成分得分,再利用隶属函数将16份西瓜材料的各主成分得分进行归一化,最后结合各主成分的权重和隶属函数值得到综合评价价值(D)。采用聚类分析法,利用综合评价价值(D)将16份西瓜材料的耐冷程度进行等级划分。以综合评价价值(D)作为因变量,按照Joseph等^[12]的

因子分析方法中以载荷绝对值大于 0.7 为强相关的起点条件,且互相之间不存在共线性进行关键指标的筛选,将所筛选到的关键指标变化率作为自变量,进行线性回归分析,并建立西瓜苗期耐低温预测模型。隶属函数方程:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (2)$$

$$\mu(X_j) = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})。 \quad (3)$$

式中: X_j 为每个品种对应的主成分得分, X_{\max} 为各主成分中的最大值, X_{\min} 为各主成分中的最小值, $\mu(X_j)$ 为隶属函数值。当测定指标的变化率与耐低温性呈正相关时,则采用公式(2);当测定指标的变化率与耐低温性呈负相关时,则采用公式(3)计算隶属函数值^[1]。

权重计算公式为:

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j。 \quad (4)$$

式中, W_j 表示提取的第 j 个主成分在所有成分中的权重, P_j 为提取的主成分所对应的贡献率^[9]。

综合评价价值(D)计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) W_j]。 \quad (5)$$

预测模型方程:

$$Y = a + bX_1 + cX_2 \dots + nX_k。 \quad (6)$$

式中, Y 为因变量,表示所预测品种耐低温性的综合得分, a 为预测模型中的截距, b, c, \dots, n 为对应指标的回归系数, $X(1, 2, 3, \dots, k)$ 为自变量,表示与西瓜耐低温相关的关键指标。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫下西瓜苗期耐低温条件筛选

为筛选到更适合西瓜耐低温评价的胁迫条件,以 4、6、8 和 10 °C 作为胁迫温度,以冷害指数作为低温条件筛选指标,确定评价西瓜苗期耐低温性的胁迫温度及时间。由表 3 可知,低温胁迫后,16 份西瓜材料苗期在不同胁迫条件下受到的冷害程度不同,其中各材料间冷害指数差异最显著的胁迫条件分别有 4 °C 3 d、6 °C 3 d、6 °C 6 d、6 °C 9 d、8 °C 3 d、8 °C 6 d 和 10 °C 9 d。结合表 4 可知,各胁迫条件下冷害指数的 F 值反映了每个胁迫条件下各材料之间冷害指数的离散程度,其中 F 值越大代表各材料之间所受到的冷害程度差距越大,反之所受到的冷害差距越小。在 6 °C 3 d 条件下,各材料之间的冷害指数差距最大且存在极显著差异,冷害指数范围为 1.02~2.68。综上,6 °C 低温处理 3 d 可作为西瓜苗期耐低温性鉴定的胁迫条件。不同耐低温

型材料在此条件下的表型对比见图 1。

2.2 低温胁迫对西瓜苗期表观性状的影响

由表 5 可知,在低温胁迫下,16 份西瓜材料的生长受到抑制,各指标相对变化率呈负增长,且各材料之间的相对变化率存在不同程度的极显著差异。株高和叶长的相对变化率范围分别为 -58.63%~-2.13% 和 -55.30%~-20.68%,不同品种之间存在极显著差异,其中 WMN003(-2.13%)、WMN007(-9.40%) 和 WMN009(-9.65%) 3 份材料的株高相对变化率幅度较小,WMN009(-20.68%)、WMN016(-28.52%) 和 WMN002(-32.54%) 的叶长相对变化率幅度在 16 份材料中较小。在叶宽和茎粗方面,不同材料间也存在极显著差异,相对变化率范围分别为 -59.11%~-30.16% 和 -41.02%~-8.67%,其中 WMN016(-30.16%)、WMN015(-34.43%) 和 WMN009(-36.22%) 的叶宽相对变化率幅度在 16 份材料中较小,WMN005(-8.67%)、WMN004(-14.53%) 和 WMN003(-16.43%) 的茎粗相对变化率幅度在 16 份材料中较小。在生长指标中相对变化率幅度越小的材料表明受低温胁迫后生长受到的抑制越轻,耐低温性越强。

2.3 低温胁迫对西瓜苗期生理指标的影响

2.3.1 低温胁迫对西瓜苗期 SOD 和 CAT 活性的影响 由表 6 可知,16 份西瓜材料在受到低温胁迫后,SOD 和 CAT 活性均呈不同程度的变化且不同材料之间存在极显著差异。低温胁迫后,除 WMN008 外,其他材料的 SOD 活性均呈较为明显的增长,其中 WMN002 增幅最大(574.20%)。低温胁迫后,16 份西瓜材料的 CAT 活性均呈不同程度的增长,相对变化率以 WMN004(242.99%)、WMN014(213.36%) 和 WMN005(189.14%) 上升最为明显。

2.3.2 低温胁迫对西瓜苗期 MDA 含量、相对电导率和 Pro 含量的影响 由表 7 可知,在 6 °C 3 d 低温胁迫后,16 份西瓜材料的 3 个指标均表现出明显的耐低温性差异。在低温胁迫后,大部分材料的 MDA 含量表现为负增长,其中 WMN008、WMN009、WMN007 和 WMN001 等材料下降明显(相对变化率均低于 -45%),说明其膜系统稳定性较好;而 WMN003 的 MDA 含量出现明显上升(56.26%),表明其细胞膜受损严重。在低温胁迫后,大部分材料的相对电导率都有所升高,WMN001 和 WMN008 的相对电导率明显上升(106.94% 和 99.36%),表明其细胞膜受损严重;而

表3 低温胁迫下西瓜苗期的冷害指数
Table 3 Cold damage index of watermelon seedlings under low temperature stress

| 编号 No. | 4 °C | | | 6 °C | | | 8 °C | | | 10 °C | | | 25 °C | | |
|-----------|----------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|------------|----------|----------|---------|---------|----------|-------|-----|-----|
| | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d |
| WMN001 | 3.28 DE | 4.14 ABCD | 4.46 BCD | 2.34 BC | 2.58 DE | 3.26 ABC | 1.80 ABC | 2.52 ABC | 2.80 ABC | 0.22 AB | 0.34 AB | 0.84 F | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN002 | 3.40 CDE | 4.00 D | 4.36 CD | 1.62 EF | 2.50 DE | 2.80 DE | 1.60 CDEFG | 2.00 DEF | 2.44 D | 0.16 AB | 0.24 AB | 0.94 EF | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN003 | 2.95 F | 4.04 D | 4.40 BCD | 1.30 GH | 2.70 CD | 2.98 CDE | 1.40 GH | 2.16 D | 2.70 BCD | 0.25 AB | 0.28 AB | 1.65 A | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN004 | 3.54 BCD | 4.22 AB | 4.60 AB | 2.34 BC | 3.10 AB | 3.12 BCDE | 1.56 DEFG | 2.60 AB | 3.04 A | 0.24 AB | 0.30 AB | 1.28 BC | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN005 | 3.94 A | 4.11 BCD | 4.49 BCD | 2.68 A | 3.21 A | 3.68 A | 2.00 A | 2.57 AB | 3.09 A | 0.19 AB | 0.34 AB | 1.64 AB | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN006 | 3.16 EF | 4.25 AB | 4.50 BCD | 1.84 E | 2.53 DE | 3.20 BCD | 1.74 BCD | 2.30 BCD | 2.90 AB | 0.20 AB | 0.38 A | 1.28 BC | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN007 | 3.70 AB | 4.10 BCD | 4.48 BCD | 2.26 BC | 2.40 D | 2.94 CDE | 1.66 BCDEF | 2.50 ABC | 2.88 AB | 0.16 AB | 0.28 AB | 1.28 BC | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN008 | 3.60 BC | 4.20 ABC | 4.60 ABCD | 1.50 FG | 3.00 ABC | 3.46 AB | 1.70 BCDE | 2.06 DE | 2.92 AB | 0.18 AB | 0.36 A | 0.96 DEF | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN009 | 3.22 EF | 4.00 D | 4.30 D | 1.02 H | 2.00 F | 2.72 E | 1.02 I | 1.68 F | 2.48 CD | 0.20 AB | 0.20 B | 0.74 F | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN010 | 3.68 AB | 4.00 D | 4.40 BCD | 1.46 FG | 2.68 CDE | 2.88 CDE | 1.50 EFG | 1.82 EF | 2.80 ABC | 0.18 AB | 0.30 AB | 1.18 CD | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN011 | 3.24 E | 4.24 AB | 4.40 BCD | 2.18 CD | 2.10 F | 2.84 CDE | 1.42 GH | 2.20 CD | 2.88 AB | 0.20 AB | 0.32 AB | 0.94 EF | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN012 | 2.92 F | 4.04 D | 4.52 BCD | 1.62 EF | 2.32 EF | 3.00 CDE | 1.24 HI | 1.74 EF | 2.42 D | 0.22 AB | 0.28 AB | 1.24 BC | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN013 | 3.32 DE | 4.27 A | 4.81 A | 1.92 DE | 3.03 ABC | 3.16 BCD | 1.86 AB | 2.22 CD | 2.95 AB | 0.27 A | 0.32 AB | 1.16 CD | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN014 | 3.28 DE | 4.32 A | 4.58 BC | 2.56 AB | 2.74 BCD | 3.00 CDE | 2.00 A | 2.72 A | 2.90 AB | 0.22 AB | 0.32 AB | 0.86 F | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN015 | 3.20 EF | 4.06 CD | 4.54 BC | 1.36 FG | 2.50 DE | 2.86 CDE | 1.46 FGH | 2.24 CD | 2.84 AB | 0.20 AB | 0.26 AB | 1.12 CDE | 0 A | 0 A | 0 A |
| WMN016 | 3.30 DE | 4.04 D | 4.56 BC | 1.26 GH | 2.00 F | 2.72 E | 1.00 I | 2.00 D | 2.68 BCD | 0.14 B | 0.30 AB | 0.90 EF | 0 A | 0 A | 0 A |

注: 同列不同大写字母表示材料间差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

Note: Different capital letters in the same column indicate extremely significant difference between materials ($P < 0.01$). The same below.

表4 低温胁迫下16份西瓜材料苗期的冷害指数差异及其显著性
Table 4 The differences and significance of cold damage index of 16 watermelon materials at seedling stage under low temperature stress

| 胁迫条件 Stress condition | 4 °C | | | 6 °C | | | 8 °C | | | 10 °C | | |
|--------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d | 3 d | 6 d | 9 d |
| F值 F value | 34.25** | 18.42** | 9.22** | 93.73** | 36.43** | 13.01** | 59.23** | 34.06** | 13.76** | 2.52** | 2.78** | 45.77** |

注: **表示在0.01水平差异极显著。

Note: ** indicates extremely significant difference at 0.01 level.

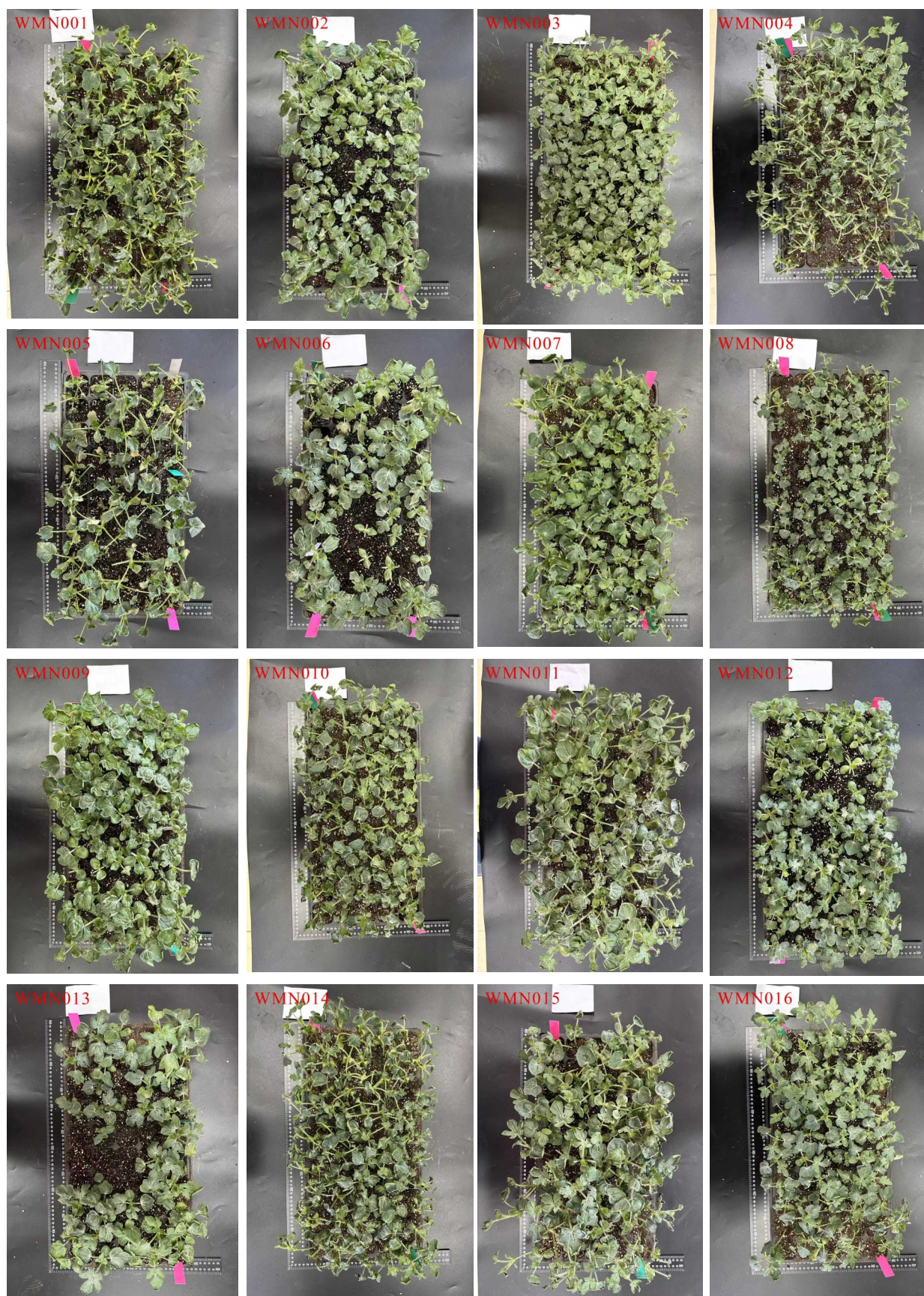


图 1 16 份西瓜材料苗期在 6 °C 胁迫 3 d 的表型对比

Fig. 1 Phenotypic comparison of 16 watermelon materials at the seedling stage under 6 °C for 3 days

表5 6 °C胁迫3 d不同西瓜材料
苗期表现性状的相对变化率

Table 5 Relative change rate of apparent traits at the seedling stage of different watermelon materials under 6 °C stress for 3 days %

| 材料 Material | 株高 Plant height | 叶长 Leaf length | 叶宽 Leaf width | 茎粗 Stem thickness |
|----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| WMN001 | -14.53 B | -54.86 FG | -59.11 C | -39.54 CD |
| WMN002 | -27.91 D | -32.54 BC | -39.41 ABC | -20.71 ABCD |
| WMN003 | -2.13 A | -35.08 BCD | -40.56 ABC | -16.43 AB |
| WMN004 | -26.76 CD | -41.70 DEF | -39.17 ABC | -14.53 AB |
| WMN005 | -57.98 F | -48.13 EFG | -50.12 ABC | -8.67 A |
| WMN006 | -44.28 E | -48.24 EFG | -49.13 ABC | -33.01 ABCD |
| WMN007 | -9.40 AB | -45.98 EF | -39.29 ABC | -27.20 ABCD |
| WMN008 | -14.66 B | -42.68 DE | -39.69 ABC | -32.65 ABCD |
| WMN009 | -9.65 AB | -20.68 A | -36.22 AB | -28.37 ABCD |
| WMN010 | -16.85 BC | -40.00 CDE | -44.25 ABC | -41.02 D |
| WMN011 | -58.63 F | -46.46 EFG | -43.02 ABC | -26.10 ABCD |
| WMN012 | -36.16 DE | -41.67 DE | -39.72 ABC | -20.10 ABCD |
| WMN013 | -42.08 E | -39.27 CDE | -42.46 ABC | -26.61 ABCD |
| WMN014 | -40.45 E | -55.30 G | -53.21 BC | -38.08 BCD |
| WMN015 | -40.95 E | -34.70 BCD | -34.43 AB | -18.11 ABC |
| WMN016 | -12.50 AB | -28.52 B | -30.16 A | -33.24 ABCD |

表6 6 °C胁迫3 d不同西瓜材料苗期
SOD、CAT活性的相对变化率

Table 6 Relative change rate of SOD and CAT activity at the seedling stage of different watermelon materials under 6 °C stress for 3 days %

| 材料 Material | SOD活性 SOD activity | CAT活性 CAT activity |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| WMN001 | 53.86 F | 97.53 BC |
| WMN002 | 574.20 A | 106.55 BC |
| WMN003 | 113.92 DEF | 32.79 DE |
| WMN004 | 22.83 F | 242.99 A |
| WMN005 | 10.16 F | 189.14 A |
| WMN006 | 309.35 BCDE | 53.18 D |
| WMN007 | 96.97 EF | 42.41 D |
| WMN008 | -1.85 F | 1.38 F |
| WMN009 | 359.26 ABCD | 42.05 D |
| WMN010 | 95.85 EF | 17.58 EF |
| WMN011 | 395.62 ABC | 133.54 B |
| WMN012 | 22.99 F | 101.97 BC |
| WMN013 | 473.81 AB | 90.46 BC |
| WMN014 | 134.98 DEF | 213.36 A |
| WMN015 | 210.99 CDEF | 88.70 C |
| WMN016 | 30.34 F | 50.88 D |

WMN003和WMN011的相对电导率(-1.48%和11.11%)明显低于其他材料,说明其细胞膜完整性较好。Pro含量可以直接反映植物对逆境的响应和

适应能力。Pro含量的变化在3个指标中最为明显,且所有材料相比对照组均出现了明显增长,其中WMN013(1 254.08%)和WMN006(1 168.53%)的积累量较高,WMN003和WMN007的脯氨酸积累相对较少,相对变化率分别为163.12%和74.89%。

表7 6 °C胁迫3 d不同西瓜材料苗期MDA含量、
相对电导率和Pro含量的相对变化率

Table 7 Relative change rate of MDA content, relative electrical conductivity and Pro content at the seedling stage of different watermelon materials under 6 °C stress for 3 days %

| 材料 Material | MDA含量 MDA content | 相对电导率 EC | Pro含量 Pro content |
|----------------|----------------------|-------------|----------------------|
| WMN001 | -49.54 GH | 106.94 A | 569.72 BCDE |
| WMN002 | -9.36 CDE | 80.23 B | 898.64 ABC |
| WMN003 | 56.26 A | -1.48 J | 163.12 E |
| WMN004 | -28.42 F | 43.93 CD | 546.32 BCDE |
| WMN005 | 20.33 B | 18.97 GHI | 583.28 BCDE |
| WMN006 | -10.99 CDE | 33.15 EF | 1 168.53 AB |
| WMN007 | -49.34 GH | 82.05 B | 74.89 E |
| WMN008 | -56.02 H | 99.36 A | 213.97 DE |
| WMN009 | -56.28 H | 14.41 HI | 255.04 DE |
| WMN010 | -18.95 EF | 34.18 DE | 466.85 CDE |
| WMN011 | -6.03 CD | 11.11 I | 491.39 CDE |
| WMN012 | -11.40 CDE | 73.42 B | 812.07 ABCD |
| WMN013 | -3.79 C | 26.15 EFG | 1 254.08 A |
| WMN014 | -42.43 G | 53.61 C | 350.24 CDE |
| WMN015 | -15.96 DE | 27.66 EFG | 339.74 CDE |
| WMN016 | -43.49 G | 23.26 FGH | 424.47 CDE |

2.4 西瓜耐低温综合评价体系建立

2.4.1 主成分分析 对低温胁迫下西瓜4个形态指标(株高、叶长、叶宽、茎粗)和5个生理指标(SOD活性、CAT活性、MDA含量、相对电导率、Pro含量)进行主成分分析,结果如表8所示。第一主成分(CI1)的贡献率为29.945%,主要包含了株高和CAT活性2个指标的数据信息,其中载荷绝对值最高的是株高(-0.871);第二主成分(CI2)的贡献率为27.900%,主要包含了叶长、叶宽和相对电导率3个指标的数据信息,其中载荷绝对值最高的是叶长(0.772);第三主成分(CI3)的贡献率为16.070%,主要包含了SOD活性和Pro含量2个指标的数据信息,其中载荷绝对值最高的是SOD活性(0.765);第四主成分(CI4)的贡献率为9.496%,主要包含了MDA含量的数据信息。前4个综合指标的累计贡献率达83.411%,表明这4个主成分包含了原始性状所表达的大部分信息,因此可将原来的9个独立

指标转化为4个新的综合指标,利用这4个综合指标可较为可靠地进行西瓜苗期耐低温性的鉴定与评价。

表8 各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 8 Eigenvector and contribution rate of the principal components of each index

| 指标 Index | CI1 | CI2 | CI3 | CI4 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Pro 含量 Pro content(X1) | 0.604 | 0.062 | 0.628 | 0.024 |
| MDA 含量 MDA content(X2) | 0.512 | 0.555 | -0.221 | -0.540 |
| CAT 活性 CAT activity(X3) | 0.707 | -0.129 | -0.355 | 0.469 |
| SOD 活性 SOD activity(X4) | 0.247 | 0.402 | 0.765 | 0.101 |
| 株高 Plant height(X5) | -0.871 | -0.051 | -0.093 | -0.184 |
| 叶长 Leaf length(X6) | -0.529 | 0.772 | 0.171 | 0.175 |
| 叶宽 Leaf width(X7) | -0.522 | 0.703 | -0.034 | 0.357 |
| 茎粗 Stem thickness(X8) | 0.387 | 0.619 | -0.491 | 0.228 |
| 相对电导率 Relative electrical conductivity(X9) | -0.218 | -0.738 | 0.107 | 0.297 |
| 特征值 Eigenvalue | 2.695 | 2.511 | 1.446 | 0.855 |
| 贡献率 Contribution rate/% | 29.945 | 27.900 | 16.070 | 9.496 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution rate/% | 29.945 | 57.845 | 73.915 | 83.411 |

2.4.2 西瓜苗期耐低温性综合评价 根据主成分分析结果及公式(2)和(3)分别得出不同西瓜材料的各综合指标值的主成分得分 CI_x 和隶属函数值 $\mu(x)$ 。根据各综合指标的贡献率,利用公式(4)求得各综合指标的权重,再根据公式(5)分别计算出16份西瓜材料苗期耐低温性综合评价价值(D 值)(表

9)。根据 D 值大小对西瓜耐低温性进行评价, D 值越大,表明耐低温性越强,反之越弱。因此,16份西瓜材料耐低温性强弱依次为:WMN009>WMN016>WMN003 > WMN010 > WMN002 > WMN013>WMN008 > WMN015 > WMN007 > WMN006>WMN011 > WMN012 > WMN001 > WMN004>WMN014>WMN005。采用欧式距离法对 D 值进行聚类分析(图2),在欧式距离7的位置可将16份西瓜材料分为3类:第一类包括 WMN009、WMN016和 WMN003,为强耐低温型;第二类包括 WMN010、WMN002、WMN013、WMN008、WMN015、WMN007、WMN006、WMN011 和 WMN012,为中等耐低温型;第三类包括 WMN001、WMN004、WMN014 和 WMN005,为低温敏感型。

2.4.3 回归模型建立与耐低温指标筛选 为进一步筛选西瓜苗期耐低温的关键指标,以 D 值作为因变量,按照公式(6)筛选出5个单项指标(株高、叶长、SOD活性、CAT活性和相对电导率),将其相对变化率作为自变量,进行线性回归分析,建立回归方程: $Y=1.012 - 0.108X3 + 0.017X4 + 0.195X5 + 0.749X6 - 0.072X9$,方程决定系数 $R^2=0.983$,5个指标与 D 值的相关系数 $P<0.05$ 达显著水平;式中 $X3$ 、 $X4$ 、 $X5$ 、 $X6$ 和 $X9$ 分别代表 CAT 活性、SOD 活性、株高、叶长和相对电导率这5个性状指标,说明这5个指标与综合评价价值之间存在极强的相关性,可作为西瓜

表9 16份西瓜材料主成分得分、隶属函数值、综合评价价值、权重、排序及预测值

Table 9 The principal component score, membership function value, comprehensive evaluation value, weight, ranking and predicted value of 16 watermelon materials

| 材料 Material | CI1 | CI2 | CI3 | CI4 | $\mu(X1)$ | $\mu(X2)$ | $\mu(X3)$ | $\mu(X4)$ | 综合评价价值 D value | 排名 Rank | 预测值 P value |
|----------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|------------|------------------|
| WMN001 | -0.128 | -3.677 | 0.284 | -0.545 | 0.583 | 0.000 | 0.559 | 0.554 | 0.380 | 13 | 0.400 |
| WMN002 | 0.460 | 1.080 | 1.748 | 0.957 | 0.470 | 0.799 | 0.923 | 0.161 | 0.632 | 5 | 0.639 |
| WMN003 | -0.677 | 2.278 | -1.606 | -2.254 | 0.688 | 1.000 | 0.088 | 1.000 | 0.712 | 3 | 0.730 |
| WMN004 | 0.840 | 0.192 | -1.662 | 1.575 | 0.397 | 0.650 | 0.074 | 0.000 | 0.374 | 14 | 0.357 |
| WMN005 | 2.919 | 0.450 | -1.960 | -0.210 | 0.000 | 0.693 | 0.000 | 0.466 | 0.285 | 16 | 0.322 |
| WMN006 | 1.531 | -0.448 | 1.748 | -0.960 | 0.265 | 0.542 | 0.923 | 0.662 | 0.530 | 10 | 0.536 |
| WMN007 | -1.878 | -1.091 | -0.653 | 0.293 | 0.917 | 0.434 | 0.325 | 0.335 | 0.575 | 9 | 0.561 |
| WMN008 | -2.275 | -1.549 | -0.213 | 0.210 | 0.993 | 0.357 | 0.435 | 0.357 | 0.600 | 7 | 0.590 |
| WMN009 | -2.311 | 1.633 | 0.823 | 0.596 | 1.000 | 0.892 | 0.693 | 0.256 | 0.820 | 1 | 0.844 |
| WMN010 | -1.218 | -0.536 | 0.473 | -1.322 | 0.791 | 0.527 | 0.606 | 0.756 | 0.663 | 4 | 0.652 |
| WMN011 | 1.774 | 0.643 | 0.355 | 0.009 | 0.219 | 0.725 | 0.576 | 0.409 | 0.479 | 11 | 0.465 |
| WMN012 | 0.487 | -0.074 | -0.407 | 0.467 | 0.465 | 0.605 | 0.387 | 0.289 | 0.477 | 12 | 0.507 |
| WMN013 | 1.579 | 1.065 | 2.056 | -0.115 | 0.256 | 0.796 | 1.000 | 0.441 | 0.601 | 6 | 0.600 |
| WMN014 | 1.264 | -2.453 | -0.422 | 0.298 | 0.316 | 0.205 | 0.383 | 0.334 | 0.294 | 15 | 0.273 |
| WMN015 | -0.094 | 1.513 | -0.495 | 0.621 | 0.576 | 0.872 | 0.365 | 0.249 | 0.597 | 8 | 0.592 |
| WMN016 | -2.273 | 0.972 | -0.069 | 0.379 | 0.993 | 0.781 | 0.471 | 0.312 | 0.744 | 2 | 0.708 |

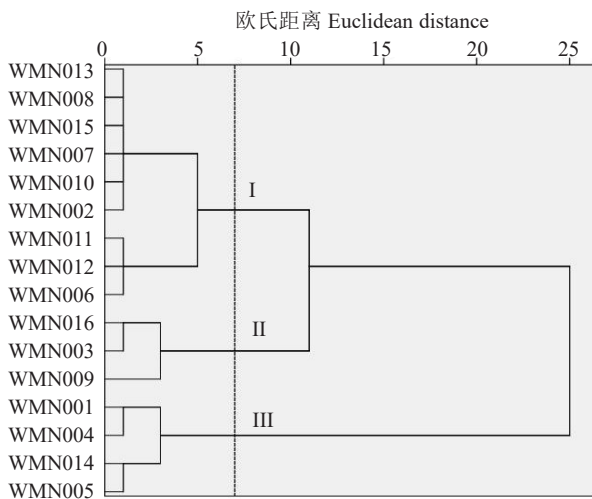


图2 16份西瓜材料耐低温性聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of low temperature resistance of 16 watermelon materials

苗期种质耐低温性鉴定的可靠指标。将16份西瓜材料的5个高影响力指标变化率代入公式(6),得到耐低温性预测值(P)。将 D 值与 P 值进行相关性分析,二者的相关系数(r)=0.991, $P < 0.01$,表明该方程可用于西瓜苗期耐低温性的预测,具有较高的准确性。

3 讨论与结论

植物的耐低温性是由多种生理生化机制共同构成的复杂性状,而耐低温性西瓜品种的筛选对西瓜的育种和改良尤为重要。研究表明,西瓜在10℃低温下即表现出对冷害敏感,该温度是多数喜温作物受冷害的临界温度^[13]。李冰等^[1]以10℃处理6d的低温条件进行耐低温西瓜的筛选;王薇薇等^[4]以10℃处理7d对西瓜进行耐低温指标的筛选;李严曼等^[11]以8℃处理10d进行西瓜苗期的耐低温品种筛选。在本研究中,通过对比4、6、8和10℃4个胁迫温度下各3个处理时长后的冷害指数,发现在6℃处理3d时,不同西瓜材料间的耐低温性差异最明显,可作为西瓜耐低温评价体系构建的低温胁迫条件。

研究表明,西瓜受冷害后,植株外观会出现明显变化,主要表现在叶片颜色黄化退绿,叶片形态卷曲、皱缩以及生长停滞、枯萎甚至死亡^[5、14]。在本研究中,通过对比西瓜幼苗在不同低温下处理以后与常温对照组植株的生长指标变化,发现西瓜在胁迫后生长受到了明显抑制,株高、茎粗和叶面积都出现了停止增大甚至明显降低的趋势,与前人研究的结果一致^[3-4、15]。除表观形态以外,低温胁迫直接

导致植物体内活性氧(ROS)大量积累,进而破坏细胞结构与功能,严重时可导致植株死亡。为抵御低温胁迫,植物体内的抗氧化酶系统包括CAT、SOD和APX等发挥主要作用,清除ROS并维持氧化还原平衡^[16]。SOD和CAT作为抗氧化酶活性系统中极为重要的两种抗氧化酶,与植物的耐低温性具有一定的相关性^[17]。SOD是参与抗氧化作用的第一酶,主要作用是清除超氧阴离子,同时产生 H_2O_2 ^[15]。CAT是植物体内清除多余 H_2O_2 的重要角色,通过保持 H_2O_2 稳态以增强植物耐逆性^[15]。在本研究中,低温胁迫后几乎所有西瓜材料的抗氧化酶活性均表现出不同程度的升高,这是一种积极的响应策略以清除多余的ROS,且两种不同的抗氧化酶并非简单的同时升高或降低,证明两者在维持西瓜苗期的氧化还原平衡方面可能存在着某种复杂的协同关系。在低温胁迫后,除了抗氧化酶系统被激活以外,持续的低温还会导致植物细胞膜发生改变,包括膜质过氧化、渗透调节物质的积累和电解质泄露等^[15]。MDA含量、相对电导率和Pro含量是逆境胁迫下植物膜系统稳定性和细胞渗透调节能力的重要指标。研究表明,正常植物体内脯氨酸含量很低,但在遭受逆境胁迫时体内会大量积累Pro,来降低植物细胞水势,增强植物吸水 and 保水能力,从而来维持细胞渗透平衡,但超过一定阈值后会表现出明显的毒害效应^[18]。MDA是膜脂过氧化产物,可以根据MDA含量变化来了解膜脂过氧化程度、膜系统受损程度以及植物抗逆性^[19]。当植物体内活性氧不能被有效清除时,就会形成膜脂过氧化,而引起过氧化产物MDA含量的相应提高^[20-22]。相对电导率反映细胞膜透性,能够直观反映出生物膜在低温下受伤害的程度,膜损伤越严重,电解质外渗越多,相对电导率越高^[23-24]。在本研究中,脯氨酸在低温胁迫后变化率最高,且不同西瓜材料之间差异明显,表明在低温胁迫后西瓜幼苗的脯氨酸较敏感,通过一定量的脯氨酸积累以维持胁迫后的细胞内渗透压平衡,但是过量的脯氨酸积累可能又会导致渗透压失衡;而在本研究中,大部分西瓜材料在受到低温胁迫后MDA含量表现为降低,这可能与前期SOD和CAT等抗氧化系统被有效激活,成功清除了大部分ROS,从而抑制了膜脂过氧化有关,同时可能与MDA含量具有一定的滞后性有关;相对电导率在胁迫后出现一定量的升高,说明低温胁迫后大部分西瓜材料会发生一定程度的电解质外渗,而变化越小的材料说明其细胞膜损伤越轻,可

能具有更强的耐低温性。综上,不同的胁迫指标在西瓜的耐低温性中可能存在一定的相关性并且在不同材料和胁迫条件下的敏感程度不同,通过相对变化率的比较能尽可能地降低品种之间的个体差异而导致的耐低温性判断误差;但是不同指标对西瓜耐低温性的影响力不同,如果通过某个单一指标来确定西瓜苗期的耐低温性会存在一定的局限性和不稳定性,因此采用多个指标利用多元分析方法综合评价西瓜苗期的耐低温性才较为科学。

笔者在本研究中通过主成分分析方法,将9个指标转化为4个综合指标,能更科学地评价不同西瓜材料的耐低温性;再利用隶属函数分析,将每份材料带有方向性的4个主成分得分进行归一化处理,可以更直观和准确地比较不同材料之间的耐低温性差异;运用聚类分析将不同西瓜材料进行耐低温性分级,综合了指标之间的相关性和影响力,可以更可靠地进行等级划分,将16份西瓜材料划分为3个类型,筛选出3份强耐低温材料(WMN009、WMN016和WMN003);通过主成分分析得到的各指标综合评价中的影响力筛选出5个影响西瓜耐低温性的关键独立指标,利用回归分析方法建立回归预测模型。该体系及预测模型可用于西瓜种质资源的大规模快速筛选,为耐低温西瓜新品种选育提供技术支撑。但是在本研究中,仅对西瓜苗期的耐低温性进行评价,无法代表西瓜全生育期的耐低温特性。且在大田生产中,因温度、光照、水分等环境因素的动态变化会对其耐低温性产生一定的影响。因此,未来还应结合田间观察,以及萌芽期、伸蔓期和结果期等性状进行更全面的综合评价,才能使结果更加科学、准确。

综上所述,笔者通过低温胁迫条件筛选,确定6℃处理3d为西瓜苗期耐低温性鉴定的适宜条件。在此条件下,综合运用主成分分析、隶属函数及回归分析等方法,从16份西瓜材料中筛选出苗期叶片CAT活性、SOD活性、株高、叶长和相对电导率5项关键指标,并鉴定出WMN009、WMN016和WMN003等3份强耐低温材料。本研究建立了高效的早期耐低温鉴定体系,为西瓜耐低温品种选育及早春栽培提供了理论依据与技术支撑。

参考文献

- [1] 李冰,张敬敬,高秀瑞,等.低温胁迫下不同基因型西瓜抗寒性综合评价[J].中国瓜菜,2019,32(4):16-19.
- [2] 吴梅梅,张显,郑俊鸷,等.西瓜甜瓜抗寒性研究进展[J].中国瓜菜,2014,27(增刊1):1-5.
- [3] 许勇,王永健,张峰,等.西瓜幼苗耐低温研究初报[J].华北农学报,1997,12(2):93-96.
- [4] 王薇薇,羊杏平,范淑英,等.西瓜耐冷性鉴定指标的筛选[J].华北农学报,2014,29(6):163-171.
- [5] YANG J H, GAO Y, LI Y M, et al. Salicylic acid-induced enhancement of cold tolerance through activation of antioxidative capacity in watermelon[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 118(3):200-205.
- [6] ELZBIETA U K, TODD C W. Tolerance of watermelon seedlings to low-temperature chilling injury[J]. HortScience, 2014, 49(3):240-243.
- [7] 刘聪,邓宇宏,刘选明,等.过氧化氢酶在植物生长发育和胁迫响应中的功能研究进展[J].生命科学研究,2023,27(2):128-138.
- [8] LU K X, SUN J T, LI Q P, et al. Effect of cold stress on growth, physiological characteristics, and calvin-cycle-related gene expression of grafted watermelon seedlings of different gourd rootstocks[J]. Horticulturae, 2021, 7(10):391.
- [9] 黄超,姚雪,王学征,等.甜瓜耐冷性综合评价体系的构建[J].北方园艺,2018(22):43-51.
- [10] 张蜀秋.植物生理学实验技术教程[M].北京:科学出版社,2011.
- [11] 李严曼,朱磊,朱华玉,等.不同西瓜品种苗期耐低温性差异研究[J].河南农业大学学报,2016,50(5):604-608.
- [12] JOSEPH F H J, WILLIAM C B, BARRY J. B., et al. Multivariate data analysis[M]. Englewood: Prentice Hall, 2009.
- [13] WANG J, WEI M H, WANG H Y, et al. A time-course transcriptome reveals the response of watermelon to low-temperature stress[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(5):1786-1799.
- [14] KORKMAZ A, DUFAULT R J. Short-term cyclic cold temperature stress on watermelon yield[J]. HortScience, 2002, 37(3):487-489.
- [15] 王芳,王淇,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.
- [16] ZHEN Y, FU S B, YANG Y P. Signaling and scavenging: Unraveling the complex network of antioxidant enzyme regulation in plant cold adaptation[J]. Plant Stress, 2025, 16:100833.
- [17] 李文明,辛建攀,魏驰宇,等.植物抗寒性研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(12):6-11.
- [18] 张林,陈翔,吴宇脯,等.脯氨酸在植物抗逆中的研究进展[J].江汉大学学报(自然科学版),2023,51(1):42-51.
- [19] 杜有新,何春林,张乐华,等.庐山若干常绿树种对冬季低温的生理生化响应[J].生态环境学报,2014,23(6):945-949.
- [20] 倪栋,杨洁,朱素英,等.低温弱光对西瓜光合生理特性的影响[J].中国瓜菜,2024,37(10):63-69.
- [21] 丁红映,王明,谢洁,等.植物低温胁迫响应及研究方法进展[J].江苏农业科学,2019,47(14):31-36.
- [22] RITONGA N F, CHEN S. Physiological and molecular mechanism involved in cold stress tolerance in plants[J]. Plants, 2020, 9(5):5600.
- [23] 崔芸瑜,何应会,杨日升,等.低温胁迫下不同品种油梨生理响应及耐寒性评价[J].中南林业科技大学学报,2024,44(12):97-105.
- [24] 杨宛钊,马娇,桑世叶,等.不同低温胁迫后木芙蓉叶片电导率测定[J].现代园艺,2025,48(4):1-3.