

甜瓜苗期耐低温弱光评价体系构建及综合评价

曾诗涵¹, 商 桑^{1*}, 田丽波^{2*}, 陈菲帆², 李许真²

1. 海南大学生命健康学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学三亚南繁研究院/热带农林学院, 海南儋州 571737

摘 要: 为建立甜瓜种质资源苗期耐低温弱光性的高效鉴定体系, 本研究模拟低温弱光环境处理 10 份甜瓜种质, 测定株高、茎粗、叶面积等 8 个生长指标和叶绿素含量、根系活力、相对电导率等 10 个生理指标的相对变化值, 并计算伤害指数, 初步评价各种质的耐低温弱光性。基于模糊数学中的隶属函数法对 19 个鉴定指标进行标准化处理, 并通过主成分分析降维, 提取出与耐低温弱光指数、过氧化物酶活性、根长、根系活力和可溶性蛋白含量关系较大的 5 个主成分(累积贡献率为 87.026%)。对 10 份甜瓜种质进行聚类分析, 第 I 类包括 Vdrantais 和 M18, 属于强耐低温弱光型; 第 II 类包括 IranH、Topmark、M4 和 Nantais oblong, 属于中等耐低温弱光型; 第 III 类包括 PI124111、MR1、M76 和 PMR5, 属于弱耐低温弱光型。最后进行逐步线性回归, 建立甜瓜苗期耐低温弱光性的预测模型: $D = -0.058 + 0.008X_{15} + 0.442X_9 + 0.058X_1 - 0.017X_{19}$ ($R^2 = 0.998$, $P < 0.001$), X_{15} 为脯氨酸含量; X_9 为根长; X_1 为耐低温弱光指数; X_{19} 为过氧化物酶活性。为验证上述鉴定结果的可靠性, 分析了 M4、PI124111 和 PMR5 在低温弱光处理后不同时间点的响应低温弱光胁迫的关键基因 *CmADF1* 和 *CmCYP195* 的表达模式, 结果表明, *CmADF1* 和 *CmCYP195* 的表达特征与鉴定出的种质耐低温弱光类型一致, 这进一步证实了该鉴定体系的可靠性。这些结果可作为鉴定不同甜瓜种质耐低温弱光性的鉴定标准, 为后续甜瓜耐低温弱光品种改良提供育种材料。

关键词: 甜瓜; 耐低温; 耐弱光性; 评价; 主成分分析; 隶属函数分析; 聚类分析

中图分类号: S338

文献标志码: A

Construction and Comprehensive Evaluation of an Evaluation System for Low-temperature and Weak-light Tolerance in Melon at the Seedling Stage

ZENG Shihan¹, SHANG Sang^{1*}, TIAN Libo^{2*}, CHEN Feifan², LI Xuzhen²

1. School of Life and Health Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Sanya Institute of Breeding and Multiplication / College of Tropical Crops, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: Ten melon germplasm accessions were treated under simulated low-temperature and weak-light conditions in this study to establish an efficient identification system for low-temperature and weak-light tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) germplasm at the seedling stage. The relative changes in 8 growth indicators (including plant height, stem diameter, leaf area, etc.) and 10 physiological indicators (including chlorophyll content, root activity, relative electrical conductivity, etc.) were determined, and the damage indexes were calculated to initially evaluate the low-temperature and weak-light tolerance of each germplasm. Based on the membership function method in fuzzy mathematics, 19 identification indicators were standardized. Dimensionality reduction was performed via principal component analysis (PCA), and 5 principal components with strong correlations to the low-temperature and weak-light tolerance index, peroxidase (POD) activity, root length, root activity, and soluble protein content were extracted (cumulative contribution rate: 87.026%). Cluster analysis was conducted on the 10 melon germplasm accessions, which were classified into three

收稿日期 2025-11-17; 接受日期 2025-12-06

基金项目 三亚崖州湾科技城“崖州湾”菁英人才科技专项(No. SCKJ-JYRC-2023-12); 海南省蔬菜生物学重点实验室开放课题(No. HAAS2023PT0208); 海南省冬季瓜菜产业技术体系-种质创新岗专项(No. HNARS-05-G01)。

作者简介 曾诗涵(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甜瓜耐低温弱光相关基因挖掘。*通信作者(Corresponding author): 商 桑(SHANG Sang), E-mail: shangsang@hainanu.edu.cn; 田丽波(TIAN Libo), E-mail: 990917@hainanu.edu.cn。

groups. Group I including Vedrantaïs and M18, was classified as strong low-temperature and weak-light tolerant. Group II including IranH, Topmark, M4 and Nantaïs oblong, was classified as moderate low-temperature and weak-light tolerant. Group III including PI124111, MR1, M76 and PMR5, was classified as weak low-temperature and weak-light tolerant. Finally, stepwise linear regression was used to establish a prediction model for low-temperature and weak-light tolerance of melon at the seedling stage, $D = -0.058 + 0.008X_{15} + 0.442X_9 + 0.058X_1 - 0.017X_{19}$ ($R^2 = 0.998$, $P < 0.001$), X_{15} is proline content; X_9 is root length; X_1 is low temperature and low light tolerance index; X_{19} is peroxidase activity. To verify the reliability of the above identification results, the expression patterns of *CmADF1* and *CmCYP195* (key genes responding to low-temperature and weak-light stress) were analyzed in germplasm accessions M4, PI124111 and PMR5 at different time points after low-temperature and weak-light treatment. The results showed that the expression characteristics of *CmADF1* and *CmCYP195* were consistent with the identified low-temperature and weak-light tolerance types of the germplasm, which further confirmed the reliability of the identification system. The results could serve as identification criteria for evaluating low-temperature and weak-light tolerance of different melon germplasm accessions and provide breeding materials for subsequent improvement of melon varieties with low-temperature and weak-light tolerance.

Keywords: *Cucumis melo* L.; low-temperature tolerance; weak-light tolerance; appraise; principal component analysis; membership function; clustering analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.015

甜瓜 (*Cucumis melo* L.) 为葫芦科 (Cucurbitaceae) 甜瓜属 (*Cucumis*) 一年生草本蔓生植物, 在世界范围内广泛种植^[1]。据 FAO 数据, 我国 2020 年甜瓜种植面积为 38.78 万 hm^2 , 占世界总面积的 36.30%, 是世界甜瓜生产与消费第一大国^[2]。甜瓜起源于热带、亚热带地区, 为典型的非冷驯化植物, 对低温敏感, 在其整个生育期尤其是苗期对温度和光照的要求很高^[3]。

甜瓜幼苗在 28~32 °C 的温度下生长良好, 在 13 °C 停止生长, 低于 7.4 °C 则发生冷害^[4]。其光饱和点为 55~60 klx, 光补偿点为 4 klx, 每天需要 10~12 h 的光照, 这比其他瓜类对温度和光照强度的要求更高, 并且在实际种植中, 低温和弱光往往是伴随发生的, 光照不足和低温会使授粉受精不良、落花化瓜、同化产物减少、发育不良、品质低劣^[5]。

设施栽培是提高蔬菜种植效益、保障蔬菜周年供应的有效途径。2016 年全国设施甜瓜栽培面积为 33.5 万 hm^2 , 占甜瓜总种植面积的 68.9%, 设施甜瓜总产量为 1280 万 t^[6]。在应季节露地栽培中, 光照和温度一般不会成为甜瓜生长的限制因子, 但在甜瓜反季节设施栽培中, 光照不足和低温是制约甜瓜发育的主要因子^[7-8]。目前, 甜瓜的耐低温和耐弱光鉴定主要以单一胁迫因子鉴定为主, 耐低温性鉴定时期集中在发芽期和苗期。黄超等^[9]发现相对发芽势、相对种芽质量、丙二醛含量和脯氨酸含量可作为甜瓜耐低温的鉴定指标。孙玉宏等^[10]认为 18 °C 时的种子活力指数、

人工模拟气候条件下的冷害指数、7 °C 时的电导百分率可作为甜瓜耐低温性鉴定指标。姚雪^[11]对甜瓜自然群体 247 份种质资源的耐低温性进行评价, 发现相对发芽势、相对发芽指数、丙二醛含量和可溶性糖含量可以作为评价甜瓜耐低温性的主要指标。甜瓜单一耐弱光性的鉴定研究较少, 周峰^[12]选用了 3 个甜瓜品种作为研究材料, 发现地上部干质量、丙二醛含量、茎粗、超氧阴离子自由基、叶片相对生长率均可作为甜瓜耐弱光性鉴定指标。苗永美等^[13]选用 32 份甜瓜材料对其苗期耐弱光进行评价, 发现叶长、叶宽、株粗、侧枝数和叶数与甜瓜耐弱光的综合评价存在显著相关。但在实际生产中, 低温和弱光相伴出现, 协同对植株的形态和生理生化特性产生影响, 甚至比单一因素胁迫的影响更大^[12]。但目前可参考的甜瓜的耐低温弱光的鉴定评价体系研究却较少。高青海等^[14]对 20 份薄皮甜瓜的耐低温弱光性进行了鉴定分析, 认为相对根系鲜质量、相对根长、相对根表面积、相对根投影面积和相对叶片数可作为甜瓜耐低温弱光鉴定指标。周峰^[12]比较了 7 种耐低温弱光鉴定指标间的相关性, 发现 10 °C、22 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理 7 d 的冷害指数, 20 °C/10 °C、33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下的茎长、叶片相对生长率、超氧阴离子自由基含量, 15 °C/5 °C、67 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下的茎粗等指标间的相关性较好, 在测定时可选其中一种或几种。前人的研究多集中在单一逆境因子或低温弱光复合逆境下幼苗的生长指标或生理指标的变化规律, 对于低温弱光互作胁迫的评

价体系构建及耐性鉴定指标筛选的研究较少。因此本研究将在低温弱光复合胁迫下,将生长指标和生理指标结合起来作为甜瓜耐性鉴定指标,并逐步建立完善的鉴定体系^[15]。值得关注的是,植物对逆境的耐受性往往有其内在的分子基础。近年来研究发现,肌动蛋白解聚因子(ADF)和细胞色素 P450(CYP450)基因家族在植物生长发育以及响应生物和非生物胁迫方面扮演着关键角色^[16-17]。其中,甜瓜中的 *CmADF1* 基因被证实能够通过调控细胞骨架的动态重组,直接参与低温应激响应,并且在胁迫和激素处理下显著上调^[18]。与此同时,细胞色素 P450 家族基因作为植物次生代谢和逆境响应的核心调控因子,受光照、温度、机械损伤以及病原菌侵染等多种因素的影响^[19]。最新研究表明,对鉴定到的甜瓜 *CmCYP450* 基因启动子区序列进行分析,发现了大量与次级代谢、光反应和激素响应相关的顺式作用元件,暗示其功能的复杂性,而其中 *CmCYP195* 的表达则受光辐射强度负调控。这意味着,在低温弱光胁迫下, *CmADF1* 和 *CmCYP195* 基因的表达水平变化可以作为反映甜瓜幼苗耐性强弱的内在分子指标。其表达模式具有明确的耐逆关联性—耐低温弱光品系中 2 个基因都出现早期瞬时高表达,不耐品系则表现为延迟或异常高表达的现象^[20-21]。将 *CmADF1* 和 *CmCYP195* 纳入鉴定体系进行验证,可弥补传统的生长和生理指标易受环境波动影响的不足,通过分子水平的表达特征与表型指标的关联性分析,进一步提升鉴定结果的准确性与可靠性,为甜瓜耐低温弱光性鉴定提供“表型-分子”双重支撑。

苗期作为植物对逆境胁迫响应敏感的早期阶段,其耐性评价对于早期育种材料筛选具有重要实践意义,因此,本研究以 10 份甜瓜种质资源为研究对象,研究了昼/夜 15 °C/8 °C、33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度下,甜瓜幼苗期的生长指标和生理指标,同时以鉴定指标的相对变化值作为评价指标,在主成分分析的基础上,利用隶属函数分析、聚类分析、相关性分析等多元统计分析策略对各评价方法和鉴定指标进行综合分析,获得耐低温弱光性鉴定体系和强、弱耐低温弱光种质,最后将 *CmADF1* 和 *CmCYP195* 作为靶基因,进一步验证评价结果的可靠性。本研究重点聚焦于甜瓜苗期鉴定体系的构建,以期对甜瓜耐低温弱光性鉴定指标的选择与综合评价提供指导,同时为耐低温

弱光品种选育筛选育种材料。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为 10 份甜瓜种质:PI124111、IranH、MR1、Nantais oblong、PMR5、Topmark、Vedrantais 由北京农林科学院蔬菜研究中心许勇赠与, M4、M18、M76 由淮北师范大学张慧君赠予。

1.2 方法

选取颗粒饱满、整齐一致、色泽正常的种子,经常规方法浸种后,在 28 °C 恒温箱中催芽,种子露白时单粒播种于花盆中,在人工气候箱中育苗,期间昼夜温度为 (27~30 °C)/(18~20 °C),光照强度为 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。基质以草炭、珍珠岩和蛭石按 2:1:1 体积比混合。当甜瓜幼苗长至 2 叶 1 心时,选取整齐一致的幼苗,将其分为 2 组,一组作为对照组(CK)在适宜条件下[昼/夜 27 °C/20 °C, 12 h/12 h, 光照强度 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]生长,另一组作为处理组在人工气候箱进行培养,培养条件:温度 15 °C/8 °C (昼/夜),光照强度为 33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光照时数 12 h^[12, 22]。用于处理的每份种质幼苗 12 株,每个处理重复 3 次。处理 15 d 后,根据伤害分级标准统计植株受害情况,并计算伤害指数,第 15 天进行生长指标的测定以及部分生理指标的测定,用液氮冻存样品保存于 -80 °C 冰箱,用于后续生理指标的测定。

1.2.1 生长指标的测定 用直尺测定幼苗的株高;用游标卡尺测定幼苗的茎粗;叶面积用 ImageJ 软件进行计算;用万分之一电子天平称量地上部分和地下部的干鲜质量;称量干质量时,用纸袋装材料在 105 °C 下杀青 15 min,然后在 80 °C 下烘干至恒重,再进行称量;根长利用 Epson Expression 10000XL 根系分析系统进行扫描测定。

1.2.2 生理指标的测定 采用 95%乙醇浸提法提取后用分光光度计测定叶绿素含量;根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定;相对电导率用 DDBJ-350 型便携式电导率仪测定;丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;超氧化物歧化酶活性采用氮蓝四唑法测定;过氧化氢酶活性采用紫外吸收法测定;过氧化物酶活性采用愈创木酚法测定。具体测定方法参照《现代植物生理学》^[23]。每个处理随机

选取 3 株，将幼苗的第一片真叶剪碎混匀后测定各项生理指标，重复 3 次。

1.2.3 伤害指数的统计 参考周亚峰等^[24]的分级标准，根据实际作适当修改，分级标准见表 1 和图 1，调查不同单株伤害级别，并计算伤害指数，耐低温弱光指数为伤害指数的倒数。计算公式如下：伤害指数=Σ(每级株数×级数)/(总株数×最高级别)。

1.2.4 RNA 提取和 cDNA 合成 在 0、1、3、6、9、12 d 时，分别收集 M4、PI124111 和 PMR5 品

表 1 甜瓜幼苗伤害症状分级标准
Tab. 1 Classification standard for chilling injury symptoms of melon seedlings

级别 Grade	伤害症状 Symptoms of chilling injury
0 级	幼苗完好，无明显伤害特征
1 级	真叶整体发黄，边缘微皱，无脱水斑
2 级	真叶整体发，黄边缘皱缩，脱水斑较少
3 级	真叶整体发，黄边缘皱缩，且至少 1 片真叶脱水斑面积为叶面 1/2
4 级	真叶整体发，黄边缘皱缩，且至少 1 片真叶脱水斑面积大于叶面的 1/2
5 级	2 片真叶脱水斑面积大于叶面的 1/2，或整株幼苗萎蔫死亡

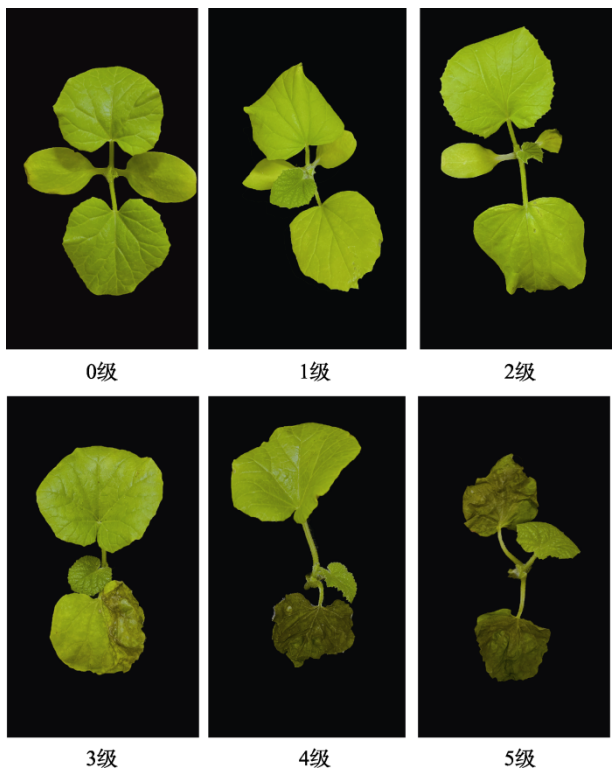


图 1 伤害指数分级标准
Fig. 1 Standard of chilling injury index

系的叶片，液氮速冻后充分研磨，使用植物总 RNA 提取试剂盒（FOREGENE，China）提取样品 RNA，用超微量分光光度计（Thermo Scientific）测定 RNA 浓度及纯度，以 1%琼脂糖凝胶电泳检测；使用反转录试剂盒（NOVA）进行反转录合成 cDNA，用 nuclease-free water 稀释至 100 μL，置于-20 ℃保存，备用。

1.2.5 内参基因与目的基因 qRT-PCR 扩增 在 AriaMx 上进行 qRT-PCR。反应体系（10 μL）：正向和反向引物各 0.2 μL，cDNA 2 μL，Taq SYBR® Green qPCR Premix（Universal 2×）5 μL（NOVA，China）；nuclease-free water 2.6 μL。所用程序：95 ℃变性 30 s，95 ℃变性 10 s，55~65 ℃退火 10 s，72 ℃延伸 30 s，40 个循环。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据整理和分析。参照杨鸿基等^[25]的方法，用 SPSS 27 软件进行统计分析。为了消除不同种质基础性状间的差异，采用性状的相对变化值对耐低温弱光性进行评价。计算公式如下：

相对变化值=低温弱光处理值/对照值^[26]。

各综合指标的隶属函数值 $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) (j=1,2,\cdots,n)$ ，式中， $\mu(X_j)$ 是第 j 个综合指标的隶属函数值， X_j 为第 j 个综合指标， $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别表示第 j 个综合指标的最小值和最大值^[27]。

各综合指标的权重 $W_j = p_j / \sum p_j (j=1,2,\cdots,n)$ ， W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度，即权重； p_j 为各种质的第 j 个综合指标的贡献率^[13]。

各种质的综合耐冷值 $D = \sum [\mu(x_j) \times W_j] (j=1,2,\cdots,n)$ ， D 为各种质的耐低温弱光性综合评价^[9, 24]。

2 结果与分析

2.1 低温弱光胁迫下受害症状及耐低温弱光指数

甜瓜幼苗在低温弱光胁迫后，会出现叶片黄化、皱缩和脱水斑，甚至整个植株干枯死亡等症状（图 2），但随着持续的低温弱光处理，不同种质植株分别出现不同的表型差异，说明不同种质对低温弱光胁迫的耐受能力存在明显差异。根据伤害分级标准，对不同甜瓜种质在低温弱光胁

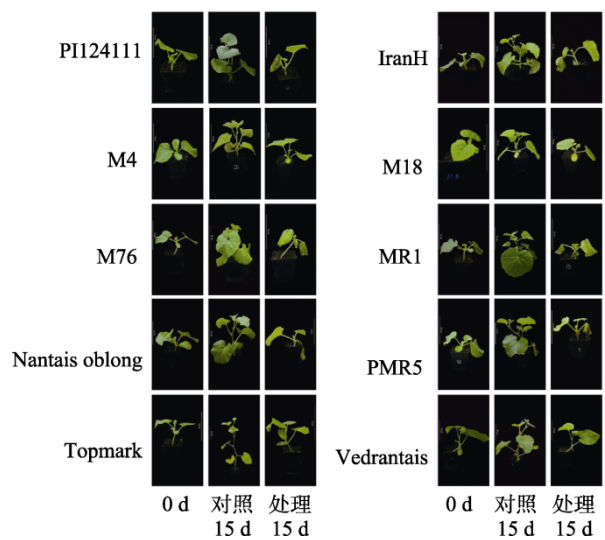


图 2 低温弱光胁迫下 10 份甜瓜种质幼苗的形态变化
Fig. 2 Morphological changes in 10 genotypes of melon seedlings under low-temperature and weak-light tolerance

胁迫后的耐低温弱光情况进行观察。通过表型统计耐低温弱光指数 (X_1) 可知, 其耐性大小为 M4=Topmark>M18>Vedrantaïs>Nantais oblong>IranH>PI124111>PMR5>M76>MR1 (表 2)。

2.2 低温弱光胁迫处理对甜瓜种质生长指标的影响

如表 2 所示, 在低温弱光胁迫下, 所有参试材料的生长指标相对变化值均小于 1, 表明胁迫对株高、茎粗、叶面积、生物量积累及根系扩展均产生抑制作用。在低温弱光胁迫下, 10 个甜瓜

种质的茎粗的相对变化值在 0.080~0.426 之间, 叶面积的相对变化值在 0.034~0.605 之间, 地下鲜质量的相对变化值在 0.071~0.802 之间, 根长的相对变化值在 0.231~0.963 之间, 其中 M76 的相对变化值最小, M18 的相对变化值最大, 说明 M76 受低温弱光的影响较大, 而 M18 受到的影响较小; 株高的相对变化值在 0.007~0.230 之间, 其中 Topmark 的相对变化值最小, M4 的相对变化值最大; 地上鲜质量的相对变化值在 0.150~0.628 之间, 其中 M76 的相对变化值最小, M4 的相对变化值最大; 地上干质量的相对变化值在 0.082~0.259 之间, 其中 M76 的相对变化值最小, Vedrantaïs 的相对变化值最大; 地下干质量的相对变化值在 0.070~0.616 之间, 其中 PMR5 的相对变化值最小, M18 的相对变化值最大; 在生长指标中, 地下鲜质量的相对变化值在各种质之间的差异幅度较大, 说明处理后的甜瓜种质的地下鲜质量对胁迫敏感性更高, 且不同种质间表型差异显著。以上结果表明, M18、M4 和 Vedrantaïs 的生长可能受低温弱光的影响较小, 而 M76、Topmark 和 PMR5 的生长可能受到的影响较大。

2.3 低温弱光胁迫对甜瓜种质生理指标的影响

如表 3 所示, 在低温弱光处理后, 供试甜瓜种质幼苗真叶的叶绿素含量和根系活力较对照均有所下降, 相对电导率、丙二醛含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量和过氧化物

表 2 低温弱光胁迫下不同甜瓜种质的耐低温弱光指数及生长指标的相对变化值
Tab. 2 Relative changes value in growth indicators and low temperature and low light tolerance index of different melon germplasms under low temperature and weak-light tolerance

种质 Germplasm	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
PI124111	1.294±0.038 ^c	0.023±0.007 ^{de}	0.327±0.202 ^{ab}	0.115±0.102 ^c	0.179±0.036 ^{ef}	0.175±0.039 ^c	0.085±0.004 ^{cd}	0.157±0.037 ^{de}	0.618±0.125 ^{abc}
IranH	2.377±0.438 ^d	0.025±0.021 ^{cde}	0.106±0.058 ^{cd}	0.095±0.051 ^c	0.361±0.002 ^{cd}	0.155±0.065 ^{ef}	0.177±0.019 ^{abc}	0.200±0.050 ^{cd}	0.677±0.293 ^{ab}
M4	5.000 ^a	0.230±0.077 ^a	0.289±0.154 ^{ab}	0.368±0.111 ^b	0.628±0.094 ^a	0.424±0.041 ^c	0.247±0.024 ^a	0.420±0.043 ^b	0.617±0.183 ^{abc}
M18	4.333±1.155 ^{ab}	0.095±0.063 ^b	0.426±0.425 ^a	0.605±0.317 ^a	0.512±0.114 ^{ab}	0.802±0.052 ^a	0.231±0.052 ^a	0.616±0.087 ^a	0.963±0.274 ^a
M76	1.275±0.170 ^c	0.059±0.061 ^{bcd}	0.080±0.126 ^d	0.034±0.044 ^c	0.150±0.028 ^f	0.071±0.024 ^f	0.082±0.021 ^d	0.104±0.015 ^{ef}	0.231±0.054 ^c
MR1	1.230±0.034 ^c	0.054±0.025 ^{bcd}	0.106±0.057 ^{cd}	0.114±0.117 ^c	0.200±0.049 ^{ef}	0.289±0.056 ^d	0.131±0.049 ^{bcd}	0.243±0.062 ^c	0.666±0.395 ^{ab}
Nantais oblong	3.333±0.412 ^c	0.041±0.022 ^{cde}	0.182±0.128 ^{bcd}	0.157±0.123 ^c	0.308±0.031 ^{de}	0.190±0.016 ^e	0.116±0.019 ^{bcd}	0.195±0.022 ^{cd}	0.613±0.083 ^{abc}
PMR5	1.294±0.038 ^c	0.062±0.017 ^{bcd}	0.080±0.035 ^d	0.081±0.036 ^c	0.281±0.013 ^{def}	0.073±0.004 ^f	0.096±0.019 ^{cd}	0.070±0.013 ^f	0.445±0.058 ^{bc}
Topmark	5.000 ^a	0.007±0.008 ^c	0.276±0.093 ^{abc}	0.090±0.114 ^c	0.342±0.172 ^d	0.231±0.119 ^{de}	0.197±0.128 ^{ab}	0.147±0.013 ^{def}	0.405±0.229 ^{bc}
Vedrantaïs	3.730±1.125 ^{bc}	0.069±0.048 ^{bc}	0.091±0.101 ^d	0.151±0.152 ^c	0.481±0.021 ^{bc}	0.639±0.042 ^b	0.259±0.024 ^a	0.438±0.024 ^b	0.899±0.114 ^a

注: X_1 为耐低温弱光指数; X_2 为株高; X_3 为茎粗; X_4 为叶面积; X_5 为地上鲜质量; X_6 为地下鲜质量; X_7 为地上干质量; X_8 为地下干质量; X_9 为根长。不同小写字母表示不同种质间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: X_1 is low temperature and low light tolerance index; X_2 is plant height; X_3 is stem diameter; X_4 is leaf area; X_5 is shoot fresh mass; X_6 is root fresh mass; X_7 is shoot drought mass; X_8 is root drought mass; X_9 is root length. Different lowercase letters indicate significant difference among different germplasms ($P<0.05$).

表 3 低温弱光胁迫下不同甜瓜种质生理指标的相对变化值
Tab. 3 Relative change value of physiological indicators of different melon germplasms under low-temperature and weak-light tolerance

种质 Germplasm	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
PI124111	0.694±0.046 ^a	0.088±0.016 ^g	1.671±0.062 ^d	2.646±0.053 ^{bc}	1.312±0.100 ^g
IranH	0.692±0.024 ^a	0.093±0.008 ^g	1.669±0.177 ^d	2.384±0.246 ^c	4.523±0.304 ^c
M4	0.796±0.097 ^a	0.223±0.022 ^{de}	1.087±0.050 ^e	1.799±0.123 ^d	9.761±0.299 ^a
M18	0.792±0.116 ^a	0.389±0.050 ^b	1.976±0.110 ^c	2.045±0.267 ^d	3.279±0.097 ^d
M76	0.746±0.114 ^a	0.221±0.007 ^{de}	2.046±0.127 ^c	5.434±0.254 ^a	2.212±0.115 ^e
MR1	0.495±0.028 ^b	0.136±0.012 ^{fg}	2.352±0.047 ^b	2.816±0.175 ^b	1.809±0.055 ^f
Nantais oblong	0.781±0.040 ^a	0.319±0.004 ^c	2.049±0.103 ^c	2.760±0.193 ^b	6.772±0.328 ^b
PMR5	0.450±0.031 ^b	0.251±0.036 ^{cd}	2.731±0.158 ^a	2.961±0.141 ^b	1.954±0.114 ^{ef}
Topmark	0.808±0.073 ^a	0.493±0.092 ^a	1.544±0.102 ^d	1.898±0.193 ^d	3.365±0.030 ^d
Vedrantaish	0.810±0.080 ^a	0.168±0.057 ^{ef}	1.937±0.133 ^c	1.270±0.056 ^e	1.771±0.140 ^f

种质 Germplasm	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}
PI124111	5.639±0.420 ^f	1.647±0.117 ^{def}	0.771±0.050 ^f	0.851±0.028 ^d	2.600±0.130 ^c
IranH	12.227±0.622 ^b	3.494±0.059 ^a	1.672±0.148 ^d	1.246±0.072 ^c	2.539±0.085 ^c
M4	8.455±0.039 ^c	1.949±0.020 ^c	1.304±0.041 ^e	1.704±0.046 ^b	2.093±0.197 ^d
M18	9.785±0.531 ^{cd}	3.091±0.252 ^b	1.456±0.074 ^{de}	1.305±0.100 ^c	1.631±0.054 ^c
M76	5.703±0.109 ^f	1.884±0.056 ^{cd}	0.850±0.065 ^f	1.005±0.107 ^d	1.347±0.068 ^{ef}
MR1	3.296±0.279 ^g	1.707±0.071 ^{cde}	0.723±0.075 ^f	0.964±0.018 ^d	1.318±0.088 ^f
Nantais oblong	20.075±1.115 ^a	1.546±0.061 ^{ef}	4.835±0.376 ^a	2.562±0.210 ^a	4.384±0.288 ^a
PMR5	2.565±0.154 ^g	1.389±0.081 ^f	0.372±0.067 ^g	0.527±0.086 ^e	1.422±0.092 ^{ef}
Topmark	9.305±0.465 ^{de}	1.766±0.254 ^{cde}	3.490±0.109 ^b	1.249±0.118 ^c	3.650±0.306 ^b
Vedrantaish	10.297±0.428 ^c	1.531±0.198 ^{ef}	2.207±0.280 ^c	1.253±0.084 ^c	1.265±0.085 ^f

注： X_{10} 为叶绿素含量； X_{11} 为根系活力； X_{12} 为相对电导率； X_{13} 为丙二醛含量； X_{14} 为可溶性糖含量； X_{15} 为脯氨酸含量； X_{16} 为可溶性蛋白含量； X_{17} 为超氧化物歧化酶活性； X_{18} 为过氧化氢酶活性； X_{19} 为过氧化物酶活性。不同小写字母表示不同种质间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: X_{10} is chlorophyll content; X_{11} is root vitality; X_{12} is relative conductivity; X_{13} is malondialdehyde content; X_{14} is soluble solids content; X_{15} is proline content; X_{16} is soluble protein content; X_{17} is superoxide dismutase activity; X_{18} is catalase activity; X_{19} is peroxidase activity. Different lowercase letters indicate significant difference among different germplasms ($P<0.05$).

酶活性有所增加，而超氧化物歧化酶活性和过氧化氢酶活性因不同种质而表现出不同的趋势。叶绿素含量（0.450~0.810）相对变化值较小的为 MR1 和 PMR5，相对变化值较大的为 Vedrantaish 和 Topmark；根系活力（0.088~0.493）相对变化值较小的为 PI124111 和 IranH，下降幅度较小的为 Topmark 和 M18；相对电导率（1.087~2.731）相对变化值较小的为 M4 和 Topmark，相对变化值较大的为 PMR5 和 MR1；丙二醛含量（1.270~5.434）相对变化值较小的为 Vedrantaish 和 M4，相对变化值较大的为 M76 和 PMR5；可溶性糖含量（1.312~9.761）相对变化值较小的为 PI124111 和 Vedrantaish，相对变化值较大的为 M4 和 Nantais oblong；脯氨酸含量（2.565~20.075）相对变化值较小的为 MR1 和 PMR5，相对变化值较大的为 Nantais oblong 和 IranH；可溶性蛋白含量（1.389~3.494）相对变化值较小的为 PMR5 和 Vedrantaish，相对变化值较大的为 IranH 和 M18；超氧化物歧化酶活性相对变化值为 0.372~4.835，其中 IranH、M4、M18、Nantais oblong、Topmark 和 Vedrantaish 相对变化值均大于 1，出现上升的趋势，Nantais oblong 和 Topmark 较大，而 PI124111、M76、MR1 和 PMR5 相对变化值均小于 1，出现下降的趋势，PMR5 和 MR1 较小；过氧化氢酶活性相对变化值为 0.527~2.562，其中 IranH、M4、M18、M76、Nantais oblong、Topmark 和 Vedrantaish 相对变化值均大于 1，出现上升的趋势，Nantais oblong 和 M4 较大，而 PI124111、MR1 和 PMR5 相对变化值均小于 1，出现下降的趋势，PMR5 和 PI124111 较小；过氧化物酶活性的相对变化值范围为 1.265~4.384，

相对变化值较小的为 Vedrantaïs 和 MR1, 相对变化值较大的为 Nantais oblong 和 Topmark。

2.4 低温弱光胁迫下不同甜瓜种质的耐低温弱光指数与相对变化值的相关性

从表 4 中可以看出, 低温弱光胁迫处理后不同甜瓜种质各生长和生理指标与耐低温弱光指数间存在不同程度的相关性, 如生长指标的地上鲜质量和地上干质量与耐低温弱光指数呈极显著正相关关系。生理指标的叶绿素含量、根系活力、相对电导率和丙二醛含量与耐低温弱光指数呈显著相关关系, 其中叶绿素含量和根系活力呈显著正相关, 而相对电导率和丙二醛含量呈显著负相关。此外, 由于各生长和生理指标之间也存在一定程度的相关性, 它们之间可能存在着不同的信息重叠现象, 因此难以用某一个鉴定指标来评价不同种质甜瓜的耐低温弱光性。为了弥补单一指标评价耐低温弱光性的不足, 在此基础上进一步利用多元统计分析方法来进行分析。

2.5 主成分分析

利用 SPSS 27 软件对 19 个单项指标进行主成分分析, 前 5 个鉴定指标的贡献率 (表 5) 分别为 43.658%、20.945%、9.079%、7.087%和 6.258%, 累计贡献率达 87.026%, 根据特征值 > 1.000 且累积贡献率 > 85.000% 的原则, 即可解释 87.026% 的总变异, 其余成分可忽略不计。说明这 5 个独立综合指标 (PC₁~PC₅) 能代表 19 个单项指标的大部分信息, 其各综合指标对应的特征向量如下所示:

$$PC_1 = 0.910X_1 + 0.521X_2 + 0.623X_3 + 0.779X_4 + 0.895X_5 + 0.773X_6 + 0.857X_7 + 0.824X_8 + 0.633X_9 + 0.723X_{10} + 0.401X_{11} - 0.623X_{12} - 0.691X_{13} + 0.620X_{14} + 0.555X_{15} + 0.358X_{16} + 0.440X_{17} + 0.604X_{18} + 0.246X_{19};$$

$$PC_2 = 0.178X_1 - 0.364X_2 - 0.068X_3 - 0.400X_4 - 0.235X_5 - 0.498X_6 - 0.279X_7 - 0.492X_8 - 0.444X_9 + 0.344X_{10} + 0.356X_{11} - 0.193X_{12} + 0.144X_{13} + 0.353X_{14} + 0.675X_{15} - 0.212X_{16} + 0.821X_{17} + 0.646X_{18} + 0.900X_{19};$$

$$PC_3 = -0.055X_1 - 0.707X_2 + 0.057X_3 + 0.024X_4 - 0.196X_5 + 0.303X_6 + 0.021X_7 + 0.139X_8 + 0.473X_9 - 0.025X_{10} + 0.189X_{11} + 0.448X_{12} - 0.269X_{13} - 0.608X_{14} + 0.220X_{15} + 0.107X_{16} + 0.299X_{17} - 0.057X_{18} + 0.113X_{19};$$

$$PC_4 = 0.224X_1 - 0.042X_2 + 0.536X_3 + 0.212X_4 - 0.089X_5 + 0.035X_6 - 0.082X_7 - 0.051X_8 - 0.361X_9 + 0.105X_{10} + 0.709X_{11} - 0.028X_{12} + 0.156X_{13} - 0.190X_{14} - 0.355X_{15} - 0.163X_{16} - 0.066X_{17} - 0.282X_{18} + 0.052X_{19};$$

$$PC_5 = -0.186X_1 - 0.191X_2 + 0.355X_3 + 0.177X_4 - 0.189X_5 - 0.092X_6 - 0.199X_7 + 0.022X_8 + 0.029X_9 + 0.192X_{10} - 0.221X_{11} - 0.303X_{12} + 0.299X_{13} - 0.011X_{14} + 0.109X_{15} +$$

$$0.743X_{16} - 0.176X_{17} - 0.032X_{18} + 0.112X_{19}$$

PC₁ 中主要是耐低温弱光指数 (0.910) 和地上鲜质量 (0.895), 其中, 特征向量最大的是耐低温弱光指数。PC₂ 中主要是过氧化物酶活性 (0.900) 和超氧化物歧化酶活性 (0.821), 其中, 特征向量最大的是过氧化物酶活性。PC₃ 中主要是根长 (0.473) 和相对电导率 (0.448), 其中, 特征向量最大的是根长。PC₄ 中主要是根系活力 (0.709) 和茎粗 (0.536), 其中, 特征向量最大的是根系活力。PC₅ 中主要是可溶性蛋白含量 (0.743) 和茎粗 (0.355), 其中, 特征向量最大的是可溶性蛋白含量。因此, 5 个主成分主要与耐低温弱光指数、过氧化物酶活性、根长、根系活力和可溶性蛋白含量关系较大。

2.6 耐低温弱光性综合评价

2.6.1 隶属函数分析 根据隶属函数公式计算出各综合指标值的隶属函数值 (μ), 结果见表 6。针对某一综合指标, 其 μ 值越大, 表明该种质在此综合指标中耐低温弱光性越强。Vedrantaïs、Nantais oblong、M4、Topmark 和 IranH 这 5 个种质在综合指标 PC₁~PC₅ 中各有最大 μ 值, 为 1.000, 而 M76、PMR5、MR1 和 IranH 这 4 个种质在综合指标 PC₁~PC₅ 中各有最小 μ 值, 其中 PMR5 在 PC₂ 和 PC₅ 中有最小 μ 值。此外 IranH 在 PC₅ 中有最大 μ 值, 在 PC₄ 中有最小值, 这可能源于遗传背景差异, 反映该种质性状的不均衡性, 因此无法凭单个主成分的 μ 值来判定种质的整体耐性。

2.6.2 权重计算 根据各综合指标的贡献率, PC₁ 为 43.658%, PC₂ 为 20.945%, PC₃ 为 9.079%, PC₄ 为 7.087%, PC₅ 为 6.258%。利用权重计算公式计算各综合指标的权重 (表 6)。各综合指标的 W_j 分别为 0.502、0.241、0.104、0.081 和 0.072。

2.6.3 综合评价及聚类分析 根据公式计算出每份甜瓜种质的 D 值, 即耐低温弱光性综合评价值 (表 6), 并根据 D 值大小对各甜瓜种质的耐低温弱光性强弱进行排序, 顺序为 M18 > Vedrantaïs > M4 > Nantais oblong > IranH > Topmark > MR1 > P1124111 > PMR5 > M76。 D 值越大, 表明其耐低温弱光性越强; D 值越小, 其耐低温弱光性越弱。为进一步确认不同甜瓜种质的耐低温弱光性, 采用组间联接法对 D 值进行聚类分析, 建立聚类树状图 (图 3)。结果表明, 10 份甜瓜种质可分为 3 类。第 I 类包括 Vedrantaïs 和 M18, 属于强耐低温弱光型; 第 II 类包括 IranH、Topmark、M4 和 Nantais oblong,

表 4 低温弱光胁迫下不同甜瓜种质生长和生理指标相对变化值与耐低温弱光指数的相关关系
Tab. 4 Correlation between relative changes value in growth and physiological indicators of different melon germplasms under low-temperature and low-light stress and their low-temperature and low-light tolerance index

指标 Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉
X ₁	1.000																		
X ₂	0.426	1.000																	
X ₃	0.541	0.251	1.000																
X ₄	0.578	0.583	0.744*	1.000															
X ₅	0.829**	0.710*	0.404	0.718*	1.000														
X ₆	0.601	0.409	0.503	0.815**	0.723*	1.000													
X ₇	0.831**	0.493	0.329	0.598	0.908**	0.803**	1.000												
X ₈	0.605	0.548	0.528	0.884**	0.785**	0.970**	0.803**	1.000											
X ₉	0.344	0.193	0.360	0.653*	0.577	0.837**	0.633*	0.831**	1.000										
X ₁₀	0.733*	0.189	0.464	0.366	0.500	0.447	0.552	0.461	0.212	1.000									
X ₁₁	0.638*	-0.023	0.430	0.335	0.259	0.227	0.254	0.150	-0.122	0.375	1.000								
X ₁₂	-0.634*	-0.407	-0.505	-0.271	-0.520	-0.208	-0.521	-0.304	-0.089	-0.721*	-0.052	1.000							
X ₁₃	-0.651*	-0.205	-0.383	-0.416	-0.708*	-0.605	-0.759*	-0.561	-0.711*	-0.255	-0.140	0.366	1.000						
X ₁₄	0.596	0.674*	0.251	0.374	0.623	0.086	0.380	0.261	0.037	0.412	0.182	-0.604	-0.251	1.000					
X ₁₅	0.490	-0.079	0.137	0.171	0.314	0.159	0.257	0.207	0.282	0.625	0.268	-0.304	-0.270	0.531	1.000				
X ₁₆	0.181	0.019	0.269	0.444	0.310	0.285	0.334	0.393	0.375	0.215	-0.045	-0.278	-0.111	0.157	0.222	1.000			
X ₁₇	0.550	-0.240	0.111	-0.020	0.173	0.050	0.200	0.015	0.063	0.566	0.535	-0.228	-0.288	0.393	0.875**	-0.094	1.000		
X ₁₈	0.543	0.219	0.197	0.267	0.375	0.175	0.260	0.263	0.202	0.590	0.295	-0.375	-0.217	0.736*	0.904**	0.037	0.819**	1.000	
X ₁₉	0.355	-0.309	0.276	-0.125	-0.036	-0.284	-0.101	-0.269	-0.158	0.391	0.404	-0.347	-0.179	0.430	0.726*	-0.045	0.834**	0.678*	1.000

注：X₁ 为耐低温弱光指数；X₂ 为株高；X₃ 为茎粗；X₄ 为叶面积；X₅ 为地上鲜质量；X₆ 为地下鲜质量；X₇ 为地上干质量；X₈ 为地下干质量；X₉ 为根长；X₁₀ 为叶绿素含量；X₁₁ 为根系活力；X₁₂ 为相对电导率；X₁₃ 为丙二醛含量；X₁₄ 为可溶性糖含量；X₁₅ 为脯氨酸含量；X₁₆ 为可溶性蛋白含量；X₁₇ 为超氧化物歧化酶活性；X₁₈ 为过氧化氢酶活性；X₁₉ 为过氧化物酶活性。
*表示极显著相关 (P<0.01)。
**表示极显著相关 (P<0.05)。
Note: X₁ is low temperature and low light tolerance index; X₂ is plant height; X₃ is stem diameter; X₄ is leaf area; X₅ is shoot fresh mass; X₆ is root fresh mass; X₇ is shoot drought mass; X₈ is root drought mass; X₉ is root length; X₁₀ is chlorophyll content; X₁₁ is root vitality; X₁₂ is relative conductivity; X₁₃ is malondialdehyde content; X₁₄ is soluble solids content; X₁₅ is proline content; X₁₆ is soluble protein content; X₁₇ is superoxide dismutase activity; X₁₈ is catalase activity; X₁₉ is peroxidase activity. * indicates significant correlation (P<0.05); ** indicates extremely significant correlation (P<0.01).

表 5 19 个单项指标的主成分分析
Tab. 5 Principal component analysis of 19 single indexes

指标 Index	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅
X ₁	0.910	0.178	-0.055	0.224	-0.186
X ₂	0.521	-0.364	-0.707	-0.042	-0.191
X ₃	0.623	-0.068	0.057	0.536	0.355
X ₄	0.779	-0.400	0.024	0.212	0.177
X ₅	0.895	-0.235	-0.196	-0.089	-0.189
X ₆	0.773	-0.498	0.303	0.035	-0.092
X ₇	0.857	-0.279	0.021	-0.082	-0.199
X ₈	0.824	-0.492	0.139	-0.051	0.022
X ₉	0.633	-0.444	0.473	-0.361	0.029
X ₁₀	0.723	0.344	-0.025	0.105	0.192
X ₁₁	0.401	0.356	0.189	0.709	-0.221
X ₁₂	-0.623	-0.193	0.448	-0.028	-0.303
X ₁₃	-0.691	0.144	-0.269	0.156	0.299
X ₁₄	0.620	0.353	-0.608	-0.190	-0.011
X ₁₅	0.555	0.675	0.220	-0.355	0.109
X ₁₆	0.358	-0.212	0.107	-0.163	0.743
X ₁₇	0.440	0.821	0.299	-0.066	-0.176
X ₁₈	0.604	0.646	-0.057	-0.282	-0.032
X ₁₉	0.246	0.900	0.113	0.052	0.112
特征值	7.941	4.034	1.710	1.421	1.151
贡献率/%	43.658	20.945	9.079	7.087	6.258
累积贡献率/%	43.658	64.603	73.681	80.769	87.026

注: X₁为耐低温弱光指数; X₂为株高; X₃为茎粗; X₄为叶面积; X₅为地上鲜质量; X₆为地下鲜质量; X₇为地上干质量; X₈为地下干质量; X₉为根长; X₁₀为叶绿素含量; X₁₁为根系活力; X₁₂为相对电导率; X₁₃为丙二醛含量; X₁₄为可溶性糖含量; X₁₅为脯氨酸含量; X₁₆为可溶性蛋白含量; X₁₇为超氧化物歧化酶活性; X₁₈为过氧化氢酶活性; X₁₉为过氧化物酶活性。

Note: X₁ is low temperature and low light tolerance index; X₂ is plant height; X₃ is stem diameter; X₄ is leaf area; X₅ is shoot fresh mass; X₆ is root fresh mass; X₇ is shoot drought mass; X₈ is root drought mass; X₉ is root length; X₁₀ is chlorophyll content; X₁₁ is root vitality; X₁₂ is relative conductivity; X₁₃ is malondialdehyde content; X₁₄ is soluble solids content; X₁₅ is proline content; X₁₆ is soluble protein content; X₁₇ is superoxide dismutase activity; X₁₈ is catalase activity; X₁₉ is peroxidase activity.

表 6 不同甜瓜种质评价指标、综合排名及预测值
Tab. 6 Evaluation indexes, comprehensive ranking and prediction values of different melon germplasms

种质 Germplasm	综合指标值 Integrated indexes value					隶属函数值 Membership function value					综合评价值 D	排序 Rank	预测值 P
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅	μ ₁	μ ₂	μ ₃	μ ₄	μ ₅			
PI124111	-0.704	-0.404	-0.521	0.096	0.878	0.275	0.218	0.030	0.454	0.759	0.285	8	0.291
IranH	-0.188	0.581	-0.056	-1.411	1.587	0.430	0.506	0.167	0.000	1.000	0.427	5	0.434
M4	0.375	-0.229	2.755	0.055	-0.197	0.601	0.269	1.000	0.442	0.395	0.535	3	0.537
M18	1.530	-0.492	-0.426	1.362	1.379	0.949	0.192	0.058	0.836	0.929	0.663	1	0.670
M76	-1.614	-0.665	0.226	0.086	0.282	0.000	0.141	0.251	0.451	0.558	0.137	10	0.141
MR1	0.108	-0.826	-0.621	-0.817	-0.459	0.520	0.094	0.000	0.179	0.306	0.320	7	0.312
Nantais oblong	-0.343	2.271	-0.153	-0.258	-0.453	0.384	1.000	0.139	0.348	0.308	0.498	4	0.492
PMR5	-0.449	-1.148	-0.464	-0.164	-1.363	0.352	0.000	0.047	0.376	0.000	0.212	9	0.210
Topmark	-0.411	0.761	-0.317	1.908	-0.676	0.363	0.558	0.090	1.000	0.233	0.424	6	0.423
Vedrantaish	1.698	0.151	-0.422	-0.856	-0.978	1.000	0.380	0.059	0.167	0.130	0.622	2	0.617
指标权重						0.502	0.241	0.104	0.081	0.072			

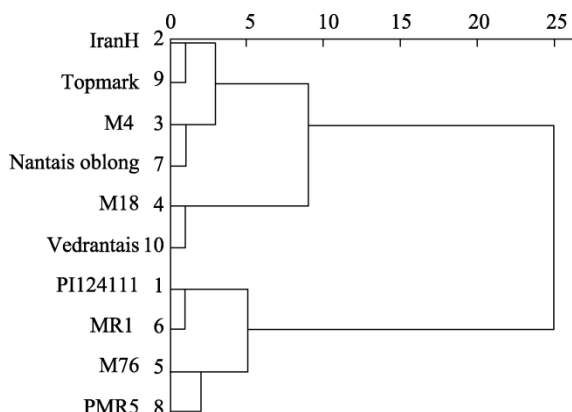


图3 10份甜瓜种质耐低温弱光性的聚类分析
Fig. 3 Cluster analysis of low-temperature and weak-light tolerance of 10 melon germplasms

属于中等耐低温弱光型;第Ⅲ类包括 PI124111、MR1、M76 和 PMR5,属于弱耐低温弱光型。

2.7 耐低温弱光性回归模型的建立

为了更精确地分析甜瓜品种耐低温弱光性与各鉴定指标之间的关系,建立可靠的耐低温弱光性评价数学模型,以综合评价 10 份甜瓜材料耐低温弱光性的 D 值作为因变量,各单项指标的相对变化值作为自变量进行逐步回归分析,建立最优回归方程: $D = -0.058 + 0.008X_{15} + 0.442X_9 + 0.058X_1 - 0.017X_{19}$,方程决定系数 $R^2 = 0.998$, $P < 0.001$ 。由方程可知,19 个单项指标中有 4 个指标对甜瓜耐低温弱光性有显著影响,分别是脯氨酸含量(X_{15})、根长(X_9)、耐低温弱光指数(X_1)和过氧化物酶活性(X_{19})。利用回归方程得出 10 个甜瓜种质的耐低温弱光性预测值(P),将其与耐低温弱光性的综合评价值(D)进行相关分析(图 4),得出二者相关系数 $R^2 = 0.999$,达极显著水平,证明方程可用于评价甜瓜耐低温弱光性,且具有较高的准确性,因此该数学模型可用于甜瓜幼苗耐

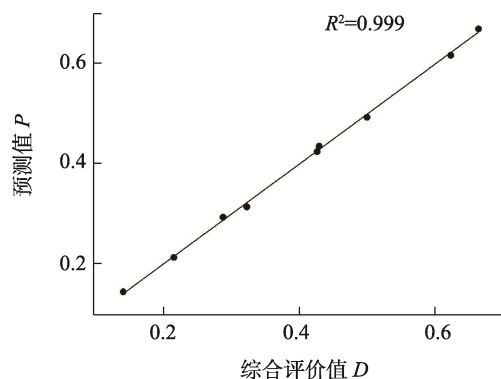


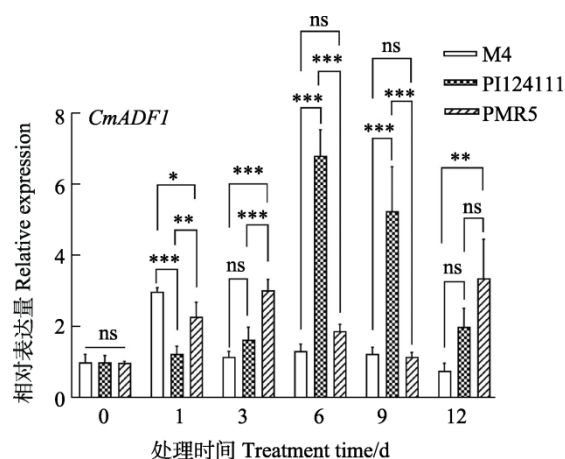
图4 综合评价值(D)与预测值(P)的相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis between comprehensive evaluation value (D) and predicted value (P)

低温弱光性评价。

2.8 评价体系可靠性验证

为了验证评价体系鉴定结果的正确性和可靠性,本研究分析了中等耐低温弱光品系 M4 和弱耐品系 PI124111、PMR5 低温弱光胁迫下 $CmADF1$ 和 $CmCYP195$ 基因的相对表达模式。如图 5 所示,在胁迫处理前(0 d),3 个品系的 $CmADF1$ 相对表达量无显著差异,均维持在较低水平,表明胁迫前该基因在不同耐逆性品系中的基础表达水平一致。而在低温弱光处理后, $CmADF1$ 的表达呈现出明显的时间动态和品系特异性差异。耐低温弱光品系 M4 在胁迫早期(1 d)出现表达峰值,相对表达量约为 3.0,之后迅速回落,在 3、6、9、12 d 时表达量维持在 1.0~1.5 之间。这种早期瞬时高表达模式体现了 M4 对低温弱光胁迫的快速响应机制,可能是通过在胁迫初期快速激活 $CmADF1$,调控肌动蛋白细胞骨架动态以适应逆境。

弱耐低温弱光品系 PI124111 的 $CmADF1$ 表达在 6 d 时达到最高值,相对表达量约为 6.8,显著高于其他时间点和品系;而 PMR5 的 $CmADF1$ 表达则在 3 d 和 12 d 呈现较高水平,3 d 时相对表达量约为 3.0,12 d 时约为 3.3。二者均表现出延迟且持续的高表达特征,说明弱耐逆品系在低温弱光胁迫下, $CmADF1$ 的表达调控存在紊乱,无法像耐逆品系那样通过早期瞬时表达实现高效的逆境适应。



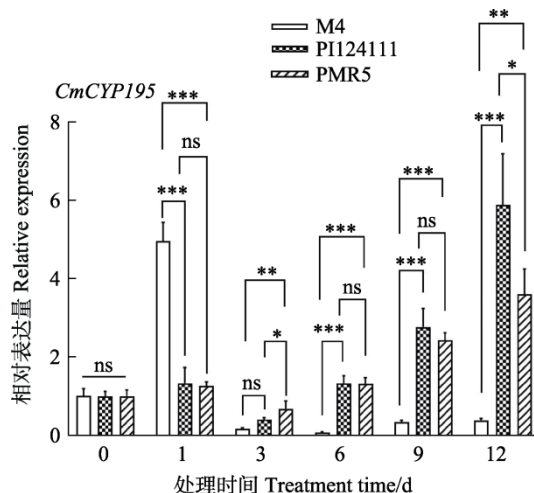
ns 表示差异不显著; *表示差异显著 ($P < 0.05$); **表示差异极显著 ($P < 0.01$); ***表示差异极显著 ($P < 0.001$)。
ns indicates no significant difference; * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$); *** indicates extremely significant difference ($P < 0.001$).

图5 低温弱光处理不同时间点下 M4、PI124111 和 PMR5 中 $CmADF1$ 的相对表达量

Fig. 5 Relative expression levels of $CmADF1$ in M4, PI124111 and PMR5 under low temperature and weak light treatment at different time points

CmCYP195 的相对表达模式与 *CmADF1* 相似。如图 6 所示, 低温弱光处理后, M4 在 1 d 出现表达峰值 (约 5.0), 显著高于同期其他品系, 之后快速回落并维持低水平, 通过早期瞬时高表达参与逆境代谢调控以适应环境; PI124111 在 9 d 达较高水平 (约 2.8), 12 d 升至 5.9, PMR5 在 9 d 和 12 d 分别约为 2.4 和 3.6, 二者均呈延迟持续高表达, 基因表达调控存在滞后性, 难以有效应对胁迫。

综上, *CmADF1* 和 *CmCYP195* 基因的表达模式均与甜瓜品系的耐低温弱光性密切相关: 耐逆品系 M4 通过 2 个基因的早期瞬时高表达快速启动耐逆机制, 而弱耐品系因基因异常表达 (延迟或持续高表达) 难以高效应对胁迫。这一结果不仅验证了 2 个基因在甜瓜低温胁迫响应中的重要作用, 为解析相关基因功能提供依据, 也为甜瓜幼苗耐低温弱光评价体系的建立补充了分子水平鉴定指标, 佐证该评价体系的准确性。



ns 表示差异不显著; *表示差异显著 ($P < 0.05$); **表示差异极显著 ($P < 0.01$); ***表示差异极显著 ($P < 0.001$)。

ns indicates no significant difference; * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$); *** indicates extremely significant difference ($P < 0.001$).

图 6 低温弱光处理不同时间点下 M4、PI124111 和 PMR5 中 *CmCYP195* 的相对表达量

Fig. 6 Relative expression levels of *CmCYP195* in M4, PI124111 and PMR5 under low temperature and weak light treatment at different time points

3 讨论

甜瓜 (*Cucumis melo* L.) 作为起源于热带非洲的葫芦科作物, 对温度和光照高度敏感, 低温弱光胁迫对甜瓜的影响贯穿其整个生育期。随着

全球设施农业的扩展, 反季节甜瓜栽培面积逐年增加, 但低温弱光逆境已成为制约设施甜瓜高产优质的核心障碍, 尤其在冬春设施栽培及露地提前播种时成为关键限制因子^[28-29]。选育耐低温弱光品种是解决这一问题的根本途径, 而建立科学、高效的评价体系则是抗逆育种和品种筛选的先决条件^[12]。

在对生长指标的研究中, 甜瓜、西葫芦、黄瓜、丝瓜、苦瓜和西瓜在低温弱光下, 都表现出株高降低, 下胚轴缩短, 鲜质量及叶面积减小, 生长速度减慢、高度矮化, 且耐性指数与茎粗、叶面积、株高、叶片数及植株干质量等形态学性状显著相关; 若是在催芽时期, 则会出现发芽时间推迟、种芽生长量减小的现象, 若是在低温弱光不利环境中种植, 则会出现花粉量少、畸形果增多的现象^[30-40]。本研究结果与上述研究发现一致, 低温弱光胁迫下显著抑制了甜瓜幼苗的生长, 所有参试材料的株高、茎粗、叶面积、生物量等生长指标相对变化值均小于 1, 说明生长抑制是瓜类作物响应低温弱光胁迫的普遍现象。并且, 本研究进一步揭示了不同甜瓜种质间存在显著的响应差异。例如, M18 和 Vedrantaïs 在多数生长指标上保持较高相对值, 而 M76 和 PMR5 的各项指标均处于较低水平。这种种质特异性响应与前人在苦瓜^[38]和西瓜^[39]中观察到的遗传背景依赖性相吻合。值得注意的是, 本研究发现地下部鲜质量是胁迫敏感度最高的指标, 这一现象在瓜类作物中鲜少报道, 可能是由于根系作为直接感知土壤环境变化的器官, 对地上部-地下部协调响应机制具有重要指示意义。

在生理指标方面, 本研究结果既验证了某些共性规律, 也发现了甜瓜特有的响应特征。与西葫芦和南瓜研究^[33, 41-45]中 SOD、CAT 活性受抑制的报道不同, 本研究发现甜瓜中 CAT 和 SOD 活性在不同种质间呈现分化现象。这种差异可能源于物种间抗氧化酶系统的调控机制不同导致的。在渗透调节物质方面, 所有种质的脯氨酸和可溶性糖含量均显著增加, 这与前人在甜瓜和苦瓜中的研究结果一致, 说明渗透调节是瓜类作物共有的保护机制^[25, 38]。然而, 本研究发现脯氨酸积累幅度在种质间差异极大, 暗示其可能具有更高效的脯氨酸合成通路。此外, 相对电导率和 MDA 含量作为膜脂过氧化指标, 在所有种质中均上升, 与黄瓜^[13]、苦瓜^[38]和西瓜^[44]报道相符, 证实了膜

系统损伤是共同的胁迫损伤特征。

在进行评价体系构建及耐性指标筛选时,虽然生长指标直观易测,但易受光照、水分等非目标因素干扰,且生长变化是逆境损伤的结果而非原因,通常在胁迫中后期才显现;生理指标测定复杂,但能提供更早期、更本质的抗逆机制信息^[15]。因此,本研究通过综合形态生理指标与分子标记,构建了一套高效的甜瓜幼苗耐低温弱光评价体系,采用了多指标综合评价法,将生长指标和生理指标结合起来作为甜瓜耐受性鉴定指标,可以消除单一指标片面性,实现抗逆性分级,并逐步建立完善的鉴定体系,从而将复杂性状降维为一个综合评价值(D),进而通过逐步回归筛选出脯氨酸含量、根长、耐低温弱光指数和过氧化物酶活性4个核心指标,建立了高度可靠的预测模型($R^2=0.998$)。特别值得注意的是,本研究发现的根长重要性与高青海等^[14]在甜瓜中的观点相呼应。且在本研究建立的甜瓜幼苗耐低温弱光评价体系中,*CmADF1*和*CmCYP450*基因的表达模式为耐逆性鉴定提供了重要的分子证据。聚类分析将M4划分为强耐低温弱光型,PI124111和PMR5划分为弱耐低温弱光型,这一结果与*CmADF1*和*CmCYP450*的表达特征高度吻合,印证了该评价体系的可靠性。

*CmADF1*作为肌动蛋白解聚因子家族成员,其在耐逆与不耐逆品系中的差异化表达,揭示了其在低温弱光胁迫响应中的调控机制^[18,46]。耐逆品系M4在胁迫初期时的瞬时高表达,可能是通过快速调控细胞骨架动态重构,从而维持细胞膜稳定性和细胞器功能,这与前人研究中*CmADF1*增强低温耐受性的结论一致^[20]。而PI124111在6d的峰值表达和PMR5的持续波动高表达,反映了不耐逆品系中细胞骨架修复机制的滞后或紊乱,导致逆境损伤累积。

*CmCYP450*具有广泛的催化活性,主要参与植物多种初生代谢和次级代谢产物的生物合成^[47]。前人的研究发现,其中有16个基因在叶片中表达水平较高,且其表达受不同强度光辐射差异调控^[21],其中*CmCYP195*在耐逆与不耐逆品系中的差异化表达,很可能就是通过参与次生代谢物合成、活性氧清除等过程来维持细胞稳态,PI124111和PMR5在9、12d的延迟高表达,反映了不耐逆品系中P450介导的代谢通路激活滞后,导致逆境损伤无法及时修复。

本研究将*CmADF1*和*CmCYP195*纳入评价体系后,弥补了传统形态、生理指标的局限性。例如,伤害指数等表型指标易受胁迫强度波动影响,而这2个基因的早期表达动态可作为更灵敏的预警信号。逐步回归模型中地下干质量和伤害指数的组合,与*CmADF1*和*CmCYP195*表达模式的协同性,表明分子指标与表型指标的结合能提升鉴定精度。本研究将*CmADF1*和*CmCYP195*表达特征与多元统计分析结合,为甜瓜耐逆种质筛选提供了“表型-分子”双重指标。后续可通过基因编辑技术验证*CmADF1*和*CmCYP195*的功能,进一步明确其在调控网络中的作用,为耐逆品种改良提供靶点。

参考文献

- [1] CHOMICKI G, SCHAEFER H, RENNER S S. Origin and domestication of Cucurbitaceae crops: insights from phylogenies, genomics and archaeology[J]. *The New Phytologist*, 2020, 226(5): 1240-1255.
- [2] 刘文革, 徐小利, 潘秀清, 张其安, 王军, 贺洪军, 孙建磊, 程志强, 张心宁, 周鹤飞. 黄河故道地区西瓜甜瓜产业分析和建议[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(8): 1-11.
LIU W G, XU X L, PAN X Q, ZHANG Q A, WANG J, HE H J, SUN J L, CHENG Z Q, ZHANG X N, ZHOU H F. Analysis and recommendation of commercial watermelon and melon production in the old course of the Yellow river[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(8): 1-11. (in Chinese)
- [3] 林德佩. 中国栽培甜瓜植物的起源、分类及进化[J]. *中国瓜菜*, 2010, 23(4): 34-36.
LIN D P. Origin classification and evolution for cultivated plants of Chinese melon[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2010, 23(4): 34-36. (in Chinese)
- [4] 吴梅梅, 张显, 郑俊骞, 杨小振. 西瓜甜瓜抗寒性研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2014, 27(增刊 1): 1-5.
WU M M, ZHANG X, ZHANG J X, YANG X Z. Research progress on cold resistance in watermelon and melon[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2014, 27(Suppl. 1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 李红丽, 于贤昌, 王华森, 刘银增, 于超. 果菜类蔬菜品质研究进展[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2007(2): 322-326.
LI H L, YU X C, WANG H S, LIU Y Z, YU C. The research progress of fruit vegetable quality[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2007(2): 322-326. (in Chinese)

- [6] 贾一凡. 设施甜瓜水肥优化的综合效应及品种特异性养分管理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
JIA Y F. Integrated effects of water and fertilizer optimization and variety-specific nutrient management in facility melons[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)
- [7] MEHROTRA S, VERMA S, KUMAR S. Transcriptional regulation and signaling of cold stress response in plants: an overview of current understanding[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 180: 104243.
- [8] 任雷. 不同光温条件对厚皮甜瓜果实糖分积累与蔗糖代谢相关酶活性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
REN L. Effect of temperature and light intensity to sugar accumulation and sucrose metabolizing enzymes in muskmelone[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [9] 黄超, 姚雪, 王学征, 刘宏宇. 甜瓜耐冷性综合评价体系的构建[J]. *北方园艺*, 2018(22): 43-51.
HUANG C, YAO X, WANG X Z, LIU H Y. Construction of comprehensive evaluation system for cold tolerance in melon[J]. *Northern Horticulture*, 2018(22): 43-51. (in Chinese)
- [10] 孙玉宏, 徐跃进, 彭金光, 周漠兵, 李煜华, 李爱成, 毛巧云. 甜瓜耐冷性鉴定指标的筛选[J]. *中国蔬菜*, 2004(4): 7-10.
SUN Y H, XU Y J, PENG J G, ZHOU M B, LI Y H, LI A C, MAO Q Y. Screening on identification indices of chilling tolerance in melon[J]. *China Vegetables*, 2004(4): 7-10. (in Chinese)
- [11] 姚雪. 甜瓜种质资源耐冷性的鉴定评价及其关联分析研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
YAO X. Studies on identification and evaluation of chilling-tolerance and association analysis in melon germplasm[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [12] 周峰. 甜瓜耐低温、耐弱光鉴定方法和鉴定指标研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
ZHOU F. Studies on appraisal method and index of low temperature resistance and low-light-tolerance in melon[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)
- [13] 苗永美, 宁宇, 曹玉杰, 沈佳, 庞欣, 崔利, 程春燕, 陈劲枫. 黄瓜萌芽期和苗期耐冷性评价[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1914-1922.
MIAO Y M, YU N, CAO Y J, SHEN J, PANG X, CUI L, CHEN C Y, CHEN J F. Evaluation of cucumber's chilling tolerance at germination and seedling stages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1914-1922. (in Chinese)
- [14] 高青海, 王亚坤, 郭远远. 薄皮甜瓜种质资源苗期耐低温弱光鉴定及形态指标选择[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(8): 1360-1367.
GAO Q H, WANG Y K, GUO Y Y. Identification for tolerance to low temperature and weak light and selection for morphological indexes of melon at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(8): 1360-1367. (in Chinese)
- [15] AINSWORTH E A, YENDREK C R, SKONECZKA J A. Accelerating yield potential in soybean: potential targets for biotechnological improvement[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(1): 38-52.
- [16] DONG C H, TANG W P, LIU J Y. *Arabidopsis AtADF1* is functionally affected by mutations on actin binding sites[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2013, 55(3): 250-261.
- [17] ZHANG L, XU X, BADAWY S. A review: effects of macrolides on CYP450 enzymes[J]. *Current Drug Metabolism*, 2020, 21(12): 928-937.
- [18] FAN T, WANG R, XIANG Y. Heat stress induces actin cytoskeletal reorganization and transcript profiles of vegetative profilins and actin depolymerizing factors (ADFs) in *Arabidopsis*[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38: 37.
- [19] 曹冠华, 张兴开, 柏旭, 毕悦, 殷红伟, 张芸, 贺森. 三七细胞色素 P450 酶基因 *PnCyp450_3* 响应丛枝菌根真菌诱导的表达特性分析[J]. *中草药*, 2022, 53(21): 6848-6856.
CAO G H, ZHANG X K, BO X, BI Y, YIN H W, ZHANG Y, HE S. Expression characteristics of panax notoginseng cytochrome P450 gene *Pn Cyp450_3* under induction of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(21): 6848-6856. (in Chinese)
- [20] LYU Y L, LIU S H, ZHANG J W, CHENG J N, WANG J S, WANG L N, LI M Y, WANG L, BI S T, LIU W, ZHANG L L, LIU S L, YAN D B, DIAO C X, ZHANG S B, HE M, GAO Y, WANG C. Genome-wide identification of actin-depolymerizing factor family genes in melon (*Cucumis melo* L.) and *CmADF1* plays an important role in low temperature tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1419719.
- [21] 韩宏伟, 常亚南, 刘会芳, 庄红梅, 邢嘉怡, 张晓达. 甜瓜细胞色素 P450 家族基因的鉴定及其响应光辐射强度的表达分析[J]. *园艺学报*, 2025(1): 1-17.
HAN H W, CHANG Y N, LIU H F, ZHUANG H M, XING J Y, ZHANG X D. Identification of cytochrome P450 family genes in melon and expression analysis in response to light intensity[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2025(1): 1-17. (in Chinese)
- [22] 宋慧, 黄芸萍, 古斌权, 付玉婧, 臧全宇, 邢乃林, 张香琴. 甜瓜耐低温弱光生理指标数据处理及极端材料筛选[J]. *华北农学报*, 2020, 35(增刊 1): 183-188.
SONG H, HUANG Y P, GU B Q, FU Y J, ZANG Q Y,

- XING N L, ZHANG X Q. Physiological data processing and extreme material selection of low temperature and low light tolerance in melon[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(Suppl. 1): 183-188. (in Chinese)
- [23] 李合生. 现代植物生理学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LI H S. Modern Plant Physiology[M]. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 周亚峰, 许彦宾, 王艳玲, 李琼, 胡建斌. 基于主成分-聚类分析构建甜瓜幼苗耐冷性综合评价体系[J]. *植物学报*, 2017, 52(4): 520-529.
- ZHOU Y F, XU Y B, WANG Y L, LI Q, HU J B. Establishment of a comprehensive evaluation system for chilling tolerance in melon seedlings based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2017, 52(4): 520-529. (in Chinese)
- [25] 杨鸿基, 徐诚, 高亚宁, 杨建超, 杨平, 轩正英. 新疆哈密瓜苗期耐冷性评价[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(2): 90-94.
- YANG H J, XU C, GAO Y N, YANG J C, YANG P, XUAN Z Y. Cold tolerance evaluation of Hami melon seedlings in Xinjiang[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(2): 90-94. (in Chinese).
- [26] 谷世闯, 牟涛, 秦强, 王诗友, 朱拼玉, 丁海峰, 李季. 黄瓜品种高原适应性评价体系研究[J]. *南京农业大学学报*, 2025(1): 1-17.
- GU S C, MU T, QIN Q, WANG S Y, ZHU P Y, DING H F, LI J. Study on the evaluation system of cucumber varieties' adaptability to plateau[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2025(1): 1-17. (in Chinese)
- [27] 张芊, 卮兰春, 赵文圣, 方思雨, 赵佳腾, 郭克东. 甜瓜耐冷砧木筛选及嫁接苗耐冷性评价[J]. *中国蔬菜*, 2022(7): 85-91.
- ZHANG Q, NIE L C, ZHAO W S, FANG S Y, ZHAO J T, GUO K D. Screening of melon cold resistant rootstocks and evaluation on cold tolerance of grafted seedlings[J]. *China Vegetables*, 2022(7): 85-91. (in Chinese)
- [28] 张永平, 许爽, 杨少军, 陆世钧, 陈幼源. 外源亚精胺对低温胁迫下甜瓜幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(6): 1087-1096.
- ZHANG Y P, XU S, YANG S J, LU S J, CHEN Y Y. Effect of exogenous spermidine on the growth and antioxidant system of melon seedlings under low temperature stress[J]. *Plant Physiology Communications*, 2017, 53(6): 1087-1096. (in Chinese)
- [29] CHINNUSAMY V, ZHU J, ZHU J K. Cold stress regulation of gene expression in plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12(10): 444-451.
- [30] 周晓丽, 张荣, 王泽浩. 低温弱光胁迫对西葫芦幼苗生长及生理特性的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2009(3): 14-16.
- ZHOU X L, ZHANG R, WANG Z H. Effects of low temperature and poor light on growth and physiological characteristics of summer squash seedlings[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2009(3): 14-16. (in Chinese)
- [31] FRANKLIN K A. Light and temperature signal crosstalk in plant development[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(1): 63-68.
- [32] 宋金亮, 朱磊, 王震, 王林忠, 孙守如. 低温弱光胁迫对西葫芦幼苗生长指标的影响[J]. *北方园艺*, 2017(1): 13-17.
- SONG J L, ZHU L, WANG Z, WANG L Z, SUN S R. Effects of *Bacillus mucilaginosus* agents on four species vegetable seeds germination and seeding growth[J]. *Northern Horticulture*, 2017(1): 13-17. (in Chinese)
- [33] 黄丽芳, 刘建汀, 王彬, 温庆放, 朱海生, 林碧英. 低温弱光对西葫芦幼苗生长生理指标的影响[J]. *福建农业科技*, 2018(7): 11-16.
- HUANG L F, LIU J T, WANG B, WENG Q F, ZHU H S, LING B Y. Effects of low temperature and weak illumination on physiological indices of summer squash seedlings[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2018(7): 11-16. (in Chinese)
- [34] 王红飞, 李锡香, 董洪霞, 王海平, 宋江萍, 邱杨, 张晓辉, 沈镡. 黄瓜核心种质芽期低温耐受性鉴定评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(1): 6-12.
- WANG H F, LI X X, DONG H X, WANG H P, SONG J P, QIU Y, ZHANG X H, SHEN D. Cold tolerance identification at germination stage of cucumber core germplasm[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(1): 6-12. (in Chinese)
- [35] 李丹丹, 邹士成, 刘思源, 刘卫峰, 张梦. 低温弱光对黄瓜幼苗生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2015(18): 41-44.
- LI D D, ZOU S C, LIU S Y, LIU W F, ZHANG M. Effect of low temperature and low-light stress on growth of cucumbers seedling (*Cucumis sativus* L.)[J]. *Northern Horticulture*, 2015(18): 41-44. (in Chinese)
- [36] 陈中钊, 许端祥, 钟开勤, 林碧英, 高山. 耐低温弱光苦瓜产量性状的相关、途径及灰色关联度分析[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(6): 1053-1057.
- CHEN Z S, XU D X, ZHONG K Q, LING B Y, GAO S. Correlation, path and grey relational analysis between yield characteristics for bitter melon with tolerance to low temperature and weak light[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(6): 1053-1057. (in Chinese)
- [37] 魏珉, 马红, 于贤昌, 李滨. 低温胁迫影响厚皮甜瓜幼苗生育的初步研究[C]//中国园艺学会. 中国科协第3届青年学术年会园艺学卫星会议暨中国园艺学会第2届青年学术讨论会论文集, 1998: 496-499.

- WEI M, MA H, YU X C, LI B. Preliminary study on the effect of low temperature stress on the growth of thick-skinned melon seedlings[C]//Chinese Horticultural Society. Proceedings of the 3rd Annual Conference of Horticulture of the China Association for Science and Technology and the 2nd Youth Symposium of the Chinese Horticultural Society, 1998: 496-499. (in Chinese)
- [38] 杨乐. 低温弱光下苦瓜生理生化变化规律及品种耐性鉴定研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- YANG L. Study on physiological and biochemical changes and identification of tolerance of bitter gourd under low temperature and poor light stress[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [39] 邢燕, 徐志红, 徐永阳, 赵光伟, 孔维虎, 贺玉花, 张建. 西瓜苗期耐低温弱光性鉴定指标初探[J]. 中国瓜菜, 2012, 25(6): 31-33.
- XING Y, XU Z H, XU Y Y, ZHAO G W, KONG W H, HE Y H, ZHANG J. Effects of low temperature and low light on physiological characters of watermelon seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2012, 25(6): 31-33. (in Chinese)
- [40] 王薇薇. 西瓜耐低温、耐弱光鉴定方法和鉴定指标研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014.
- WANG W W. The research of appraisal method and index of low temperature and weak light resistance in watermelon[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [41] 于龙凤, 安福全, 李富恒, 谭大海. 低温弱光对西葫芦叶片解剖结构的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(6): 44-46.
- YU L F, AN F Q, LI F H, TAN D H. Effect of low light and low temperature on anatomical structure of summer squash leaves[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2011(6): 44-46. (in Chinese)
- [42] 许小江, 黄伟忠, 何勇. 低温弱光下南瓜叶绿素荧光参数等变化及其与品种耐性的关系[J]. 核农学报, 2015, 29(11): 2231-2238.
- XU X J, HUANG W Z, HE Y. Changes of chlorophyll fluorescence parameters and correlations between variety tolerance in pumpkin seedlings under chilling and low irradiance conditions[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(11): 2231-2238. (in Chinese)
- [43] 刘浩. 低温弱光对耐受性西葫芦幼苗的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- LIU H. The influence of tolerance pumpkin at low temperature and weak light[D]. Handan: Hebei Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [44] 侯伟, 孙爱花, 杨福孙, 周兆德, 陈汇林, 吴翠玲. 低温弱光对西瓜幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(7): 1232-1237.
- HOU W, SUN A H, YANG F S, ZHOU Z D, CHEN H L, WU C L. Effects of low temperature and low light on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of watermelon seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(7): 1232-1237. (in Chinese)
- [45] 李静. 低温弱光胁迫对甜瓜幼苗生长及生理指标的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(5): 106-109.
- LI J. Effects of chilling and low light on vegetative and physiological parameters of melon seedlings[J]. Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(5): 106-109. (in Chinese)
- [46] FAN T T, NI J J, DONG W C. Effect of low temperature on profilins and ADFs transcription and actin cytoskeleton reorganization in *Arabidopsis*[J]. Biologia Plantarum, 2015, 59: 793-796.
- [47] VASAV A P, BARVKAR V T. Phylogenomic analysis of cytochrome P450 multigene family and their differential expression analysis in *Solanum lycopersicum* L. suggested tissue specific promoters[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 116.