

自然低温条件下芒果生理指标变化及抗寒性比较

雷跃 林迺 张正学 刘清国 刘凡值*
(贵州省亚热带作物研究所 贵州贵阳 550025)

摘要: 为探明不同芒果品种(系)的抗寒性,以自然低温条件下13份芒果品种(系)1年生枝条为材料,测定丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白(SP)和可溶性糖(SS)等指标,采用主成分分析法、隶属函数法和聚类分析进行抗寒性评价。结果表明,芒果枝条中MDA、Pro、SP和SS的含量及SOD和POD的活性在降温后显著提高,不同品种(系)提高程度存在差异。13份芒果品种(系)抗寒能力值由高到低依次为:‘红芒6号’(1.788)、‘金兴芒’(1.671)、‘金煌芒’(1.615)、‘新世纪芒’(1.498)、‘台农1号’(1.446)、‘澳芒’(1.211)、‘桂热芒82号’(0.945)、‘贵妃芒’(0.908)、‘水仙芒’(0.824)、‘热农1号’(0.802)、‘汤米芒’(0.728)、‘金穗芒’(0.532)和‘椰香芒’(0.253)。该研究结果可为芒果抗寒品种筛选与培育提供参考。

关键词: 芒果; 自然低温; 抗氧化酶; 渗透调节物质; 抗寒性评价

中图分类号: S667.7

Changes in Physiological Indexes and Comparison of Cold Resistance in Mango Under Natural Low-Temperature Conditions

基金项目: 贵州省农业科学院青年基金项目“代谢组与转录组联合解析芒果果皮转色机制的研究”(黔农科一般基金[2024]24号); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助项目“国家香蕉产业技术体系贵州黔西南综合试验站”(CARS-31-23); 贵州省农业科学院喀斯特山区作物基因资源与种质创新重点实验室“贵州热区特色作物种质创新与高效关键技术研究”(黔农科种质资源[2023]08号)。

作者简介: 雷跃(1994—), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事芒果育种与栽培研究。
E-mail: leiyue94@163.com

***通信作者:** 刘凡值(1969—), 男, 硕士研究生, 研究员, 主要从事亚热带作物栽培与育种研究。
E-mail: rzslfz@sina.com

LEI Yue, LIN Ya, ZHANG Zhengxue, LIU Qingguo, LIU Fanzhi*
(Guizhou Institute of Subtropical Crops, Guiyang 550025, Guizhou)

Abstract: To investigate the cold resistance of different mango varieties (lines), this study used annual branches of 13 mango varieties (lines) as materials under natural low-temperature conditions. Physiological indexes, including malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), proline (Pro), soluble protein (SP) and soluble sugar (SS), were measured. The cold resistance of different mango varieties (lines) was comprehensively evaluated using principal component analysis, membership function analysis and cluster analysis. The results showed that the contents of MDA, Pro, SP and SS, as well as the activities of SOD and POD in mango branches were significantly increased after exposure to natural low-temperature conditions, with the magnitude of the increase varying among different varieties (lines). The values of cold resistance of 13 mango varieties (lines), in descending order, were as follows: 'Hong mango No.6' (1.788), 'Jinxing mango' (1.671), 'Jinhuang mango' (1.615), 'Xinshiji mango' (1.498), 'Tainong No.1' (1.446), 'Australia mango' (1.211), 'Guire mango No.82' (0.945), 'Guifei mango' (0.908), 'Shuixian mango' (0.824), 'Renong No.1' (0.802), 'Tangmi mango' (0.728), 'Jinsui mango' (0.532), 'Yexiang mango' (0.253). The findings of this study could provide a reference for the screening and breeding of cold-resistant mango varieties.

Keywords: mango; natural low temperature; antioxidant enzymes; osmotic adjustment substances; cold resistance evaluation

芒果 (*Mangifera indica* Linn.) 是热带和亚热带地区重要的经济树种之一, 适宜生长温度为 20 ~ 35 ℃, 低于 15 ℃ 时, 植株会停止生长, 低于 5 ℃ 时, 叶梢会受到冻害, 低于 0 ℃ 时, 枝条和树干会有一定冻伤, 耐寒性相对较差^[1]。西南芒果产区每年 12 月至翌年 3 月是低温霜冻的高发期, 最低温度可低至 0 ℃ 以下, 恰逢芒果花芽发育期和开花期, 长时间的低温天气导致花芽无法萌动, 坐果率降低, 部分花芽和花穗甚至被冻死, 影响芒果种植经济效益。因此, 培育筛选抗寒芒果品种应用于生产具有重要意义。植物抵御低温的过程中涉及丙二醛 (MDA)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、脯氨酸 (Pro)、可溶性蛋白 (SP) 和可溶性糖 (SS) 等多种物质代谢^[2], 低温刺激会提高 MDA、SP 和 SS 的含量以及 SOD 和 POD 等酶的活性^[3-6]。刘敏等^[7]测定了低温胁迫下 3 个枣品种电导率、丙二醛和渗透调节物质等指标, 隶属函数分析发现‘伏脆蜜’抗寒性最强, 得分为 0.526, ‘京沧 1 号’抗寒性最弱, 得分为 0.486。井俊丽等^[8]对自然越冬期间不同苹果中间砧枝条生理特性变化研

究发现, 丙二醛含量、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性与温度变化趋势相反, 其中‘15-1’综合得分为 2.199, 抗寒性最强; ‘ZC9-3’综合得分为 -1.462, 抗寒性最弱。

芒果抗寒性研究主要集中于大田试验观察, 刘清国等^[1]对芒果寒害情况和恢复情况调查发现, 贵州地区冬季芒果寒害等级在 1 ~ 2 级之间, ‘金煌芒’和‘红象牙’抗寒性较好。黄云等^[9]对攀枝花市 2013 年芒果寒害调查表明, 高海拔、低洼地以及纬度偏北地区的芒果寒害等级能达 4 ~ 5 级, 其中‘热品 10 号’抗寒性最强, 0 级寒害率为 85%; ‘凯特芒’抗寒性最差, 0 级寒害率为 11%。张丽梅等^[10]根据枝干组织褐变程度和恢复生长能力对福州地区 33 份芒果资源寒害情况进行了调查评价, 发现主干均有活力, 1 年生枝均受冻死亡, 其中‘贵妃芒’和‘金煌芒’抗寒性相对较强。张椿林等^[11]以‘凯特芒’花序为研究对象, 发现‘凯特芒’花序寒 (冻) 害等级可分为: 1 级, 轻度寒 (冻) 害; 2 级, 中度寒 (冻) 害; 3 级重度寒 (冻) 害。目前, 芒果抗寒性研究主要通过观察低温期芒果枝

干、叶片、花芽和花序受寒（冻）害情况以及恢复情况来评价，通过生理指标分析芒果的抗寒性鲜有报道。此外，植物抗寒性因品种适应性和地域条件而存在差异。本文通过测定自然低温下13个芒果品种（系）1年生枝条中MDA、SOD、POD、Pro、SP和SS等与抗寒性相关指标，分析不同芒果品种（系）变化差异，探究自然低温条件下不同芒果品种（系）的抗寒性，并基于6项抗寒性相关指标综合评价不同品种（品系）抗寒性，旨在为芒果抗寒品种筛选与培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州省亚热带作物研究所望谟科技示范园，属于亚热带季风气候，海拔523m，年均温19.4℃，最冷月（1月）均温10.7℃，最热月（7月）均温27.0℃。2024年最冷月（1月）平均最低温为10.1℃，最高温为16.5℃，20日气温骤降，在24日温度降低至2.0℃，在28日温度开始升高（图1）。

1.2 试验材料

供试材料为13个芒果品种（系），分别为‘台农1号’‘金煌芒’‘贵妃芒’‘水仙芒’‘椰香芒’‘金兴芒’‘新世纪芒’‘金穗芒’‘热农1号’‘汤米芒’‘桂热芒82号’‘澳芒’和‘红芒6号’，均来自贵州省亚热带作物研究所望谟科技示范园芒果资源圃，于2020年高接换种，砧木为‘四季芒’。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 于2024年1月15日（降温前，最低温17℃，最高温23℃）和2024年1月25日（降温后，最低温2℃，最高温5℃）早上8:00—10:00进行取样，每个品种选取3株长势良好的植株，在向阳面选取生长良好、无病虫害的1年生枝条，迅速用蒸馏水冲洗干净，擦干后用液氮立即速冻，置于-80℃保存备用。

1.3.2 指标测定 丙二醛（Malondialdehyde, MDA）、超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase, SOD）、过氧化物酶（Peroxidase, POD）、脯氨酸（Proline, Pro）、可溶性蛋白（Soluble protein, SP）

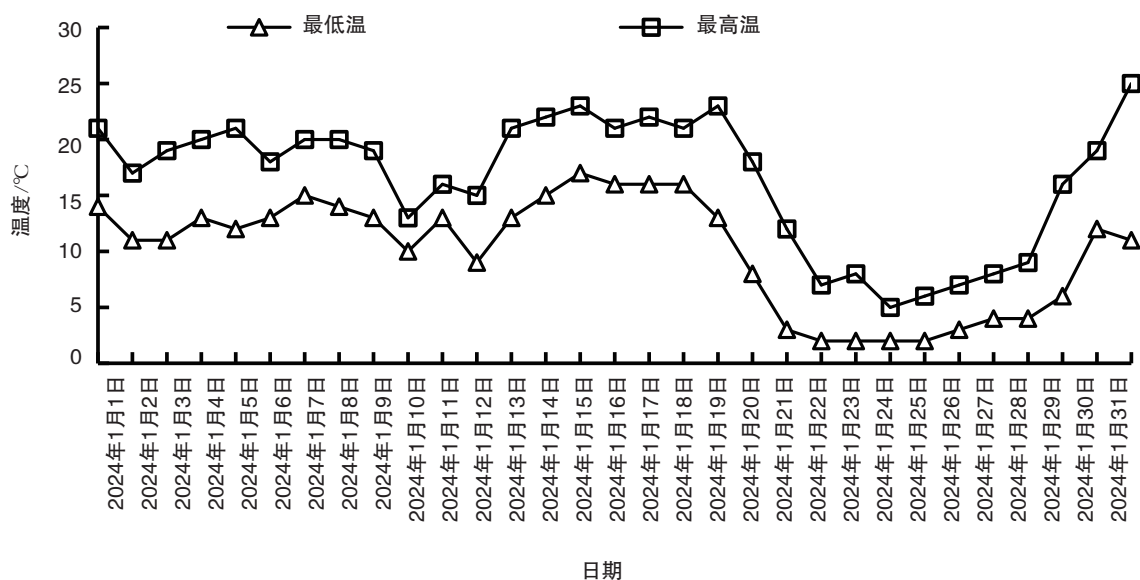


图1 2024年1月天气情况

表1 自然低温下不同芒果品种(系)MDA含量变化

品种	MDA含量/(nmol/g)	
	降温前	降温后
台农1号	10.78 ± 0.05i	16.08 ± 0.11g
金煌芒	14.20 ± 0.32f	20.16 ± 0.05e
贵妃芒	15.20 ± 0.24e	16.08 ± 0.13g
水仙芒	12.78 ± 0.16g	18.33 ± 0.20f
椰香芒	6.92 ± 0.08j	10.02 ± 0.31j
金兴芒	17.01 ± 0.38d	25.31 ± 0.16b
新世纪芒	19.09 ± 0.06b	23.15 ± 0.03c
金穗芒	6.64 ± 0.29j	10.84 ± 0.52i
热农1号	11.86 ± 0.22h	16.40 ± 0.18g
汤米芒	11.03 ± 0.79i	14.69 ± 0.10h
桂热芒82号	13.09 ± 0.63g	22.54 ± 0.15d
澳芒	18.00 ± 0.08c	26.60 ± 0.26a
红芒6号	20.05 ± 0.40a	26.57 ± 0.32a

注：同列数据后不同小写字母表示在0.05水平 ($p < 0.05$) 存在显著差异，下同

和可溶性糖 (Soluble sugar, SS) 均采用试剂盒测定 (上海优选生物科技有限公司)，测定方法参照说明书。

1.4 数据处理

采用Excel 2013进行数据统计和绘图，运用SPSS 25.0进行数据分析。通过主成分分析法确定主成分综合评价价值及权重，采用隶属函数分析方法计算隶属函数值，结合权重和隶属函数值计算抗寒能力值 (D值)，并进行聚类分析 (欧式距离)。

隶属函数值计算公式为^[12]： $U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ ，式中， U_{ij} 表示i种质在j主成分的隶属函数值， X_{ij} 表示i种质在j主成分的得分值， X_{jmin} 表示所有种质j主成分的最小值， X_{jmax} 表示所有种质j主成分的最大值。

权重计算公式为^[12]： $W_j = P_j / \sum P_j$ ，式中， W_j 表示第j个主成分的权重， P_j 表示j主成分的贡献率。

D值计算公式为^[12]： $D_i = \sum (U_{ij} \times W_j)$ ，式中， D_i

表示i种质的抗寒能力值， U_{ij} 表示i种质j主成分的隶属函数值， W_j 表示j主成分的权重。

2 结果与分析

2.1 自然低温下不同芒果品种(系)抗寒性指标的变化

2.1.1 不同芒果品种(系)MDA含量的变化 由表1可知，各芒果品种(系)MDA含量在6.64 ~ 26.60nmol/g之间，降温后各品种(系)MDA含量显著增加5.79% ~ 72.19%，其中‘桂热芒82号’增幅最大，‘金穗芒’次之，‘贵妃芒’最小。降温前‘红芒6号’MDA含量最高，为20.05nmol/g，‘金穗芒’最低，为6.64nmol/g；降温后‘澳芒’MDA含量最高，为26.60nmol/g，‘椰香芒’最低，为10.02nmol/g。

2.1.2 不同芒果品种(系)抗氧化酶活性的变化 由表2可知，各芒果品种(系)SOD活性变

化范围为107.45 ~ 621.42U/g, 降温后各品种(系) SOD活性显著增加12.28% ~ 237.82%, 其中‘桂热芒82号’增幅最大, ‘金穗芒’次之, ‘贵妃芒’增幅最小。降温前‘金煌芒’SOD活性最高, 为489.09U/g, ‘金穗芒’最低, 为107.45U/g; 降温后‘金兴芒’SOD活性最高, 为621.42U/g, ‘椰香芒’最低, 为155.41U/g。

由表2可知, 各芒果品种(系) POD活性在38.20 ~ 600.83U/g之间, 降温后各品种(系) SOD显著提高56.53% ~ 335.91%, 其中‘椰香芒’的增幅最大, ‘台农1号’次之, ‘贵妃芒’增幅最小。降温前‘红芒6号’POD活性最高, 为296.15U/g, ‘新世纪芒’最低, 为38.20U/g; 降温后‘水仙芒’POD活性最高, 为600.83U/g, ‘新世纪芒’最低, 为98.33U/g。

2.1.3 不同芒果品种(系) 渗透调节物质含量的变化 由表3可知, 各芒果品种(系) Pro含量变化范围为57.94 ~ 383.71μg/g, 降温后各品种

(系) Pro含量增加了6.23% ~ 194.58%, 其中‘澳芒’增幅最大, ‘热农1号’次之, ‘金煌芒’增幅最小。降温前‘贵妃芒’Pro含量最高, 为284.77μg/g, ‘红芒6号’最低, 为57.94μg/g; 降温后‘贵妃芒’Pro含量最高, 为383.71μg/g, ‘红芒6号’最低, 为95.12μg/g。

由表3可知, 各芒果品种(系) SP含量在4.00 ~ 19.24mg/g之间, 降温后各品种(系) SP含量显著提高10.75% ~ 73.68%, 其中‘汤米芒’增幅最大, ‘桂热芒82号’次之, ‘椰香芒’增幅最小。降温前‘新世纪芒’SP含量最高为11.60mg/g, ‘椰香芒’最低, 为4.00mg/g; 降温后‘新世纪芒’SP含量最高, 为19.24mg/g, ‘椰香芒’最低, 为4.43mg/g。

由表3可知, 各芒果品种(系) SS含量在32.77 ~ 103.21mg/g之间, 降温后各品种(系) SP含量显著提高51.26% ~ 182.27%, 其中‘汤米芒’的增幅最大, ‘澳芒’次之, 为177.66%, ‘台

表2 自然低温下不同芒果品种(系) 抗氧化酶活性变化

品种	SOD活性/(U/g)		POD活性/(U/g)	
	降温前	降温后	降温前	降温后
台农1号	463.43 ± 4.34b	607.77 ± 2.04b	114.14 ± 8.69ef	440.36 ± 11.83b
金煌芒	489.09 ± 9.29a	563.76 ± 5.81c	181.76 ± 2.20b	332.73 ± 5.56c
贵妃芒	314.14 ± 7.53g	352.71 ± 2.74j	157.89 ± 16.39bcd	247.15 ± 2.25de
水仙芒	192.30 ± 11.41i	267.77 ± 9.57k	159.80 ± 24.94bcd	600.83 ± 15.50a
椰香芒	134.52 ± 20.13j	155.41 ± 14.25m	69.84 ± 16.91gh	304.44 ± 27.48cd
金兴芒	434.45 ± 1.07c	621.42 ± 8.30a	168.70 ± 20.87bc	546.81 ± 5.94a
新世纪芒	432.84 ± 1.24d	513.78 ± 4.44d	38.20 ± 23.24h	98.33 ± 13.62g
金穗芒	107.45 ± 23.18k	195.31 ± 19.38l	175.98 ± 11.12b	397.88 ± 5.72b
热农1号	322.01 ± 7.36f	465.84 ± 10.05e	127.17 ± 13.89de	245.42 ± 3.66e
汤米芒	252.93 ± 15.32h	426.20 ± 11.32i	56.37 ± 5.62gh	149.24 ± 18.99f
桂热芒82号	133.97 ± 7.14j	452.58 ± 13.31g	81.00 ± 7.21fg	257.44 ± 10.17de
澳芒	324.46 ± 5.98e	455.99 ± 11.50f	135.79 ± 19.40cde	215.22 ± 11.37e
红芒6号	325.57 ± 24.87e	444.53 ± 17.79h	296.15 ± 40.07a	568.62 ± 20.01a

农1号’最小。降温前‘新世纪芒’SS含量最高为49.96mg/g, ‘汤米芒’最低, 为32.77mg/g; 降温后‘椰香芒’SS含量最高, 为103.21mg/g, ‘台农1号’最低, 为70.88mg/g。

2.2 芒果品种(系)抗寒指标的相关性

由表4可知, 降温前, MDA含量与SOD活性和SP含量呈显著正相关和极显著正相关, 相关系数分别为0.574和0.846, SOD活性与SP含量呈极显著正相关, 相关系数为0.813, Pro含量与SS含量呈极显著正相关, 相关系数为0.799。降温后MDA含量与SOD活性和SP含量呈极显著正相关和显著正相关, 相关系数分别为0.631和0.626, SOD活性与SP含量呈极显著正相关, 相关系数为0.724, 与Pro含量和SS含量呈显著负相关, 相关系数为-0.397和-0.635, SS含量与SP含量呈显著负相关, 相关系数为-0.636。由此可见, 6项抗寒指标互相存在一定相关性, 反映的信息有重叠, 直接用于反映各品种(系)间的抗寒性, 增加了分析问题的复杂性和

认识的偏差, 存在一定缺陷, 不能直接用于抗寒性评价, 可通过主成分分析进行综合评价。

2.3 芒果品种(系)抗寒性指标的主成分分析

由表5可知, 降温前, 2个主成分的累积贡献率达76.032%, 主成分1的贡献率为46.881%, 其中SP含量和MDA含量的绝对载荷值较大, 分别为0.919和0.871; 主成分2的贡献率为29.151%, 其中SS含量和Pro含量绝对载荷值较大, 分别为0.920和0.726。降温后, 2个主成分的累积贡献率达71.497%, 主成分1的贡献率为50.060%, 其中SOD活性和SP含量的绝对载荷值较大, 分别为0.900和0.877; 主成分2的贡献率为21.437%, 其中POD活性和Pro含量绝对载荷值较大, 分别为0.916和0.532。

2.4 芒果品种(系)抗寒性综合评价

由表6可知, 13份芒果品种(系)抗寒性由强到弱依次为: ‘红芒6号’(1.788)、‘金兴芒’(1.671)、‘金煌芒’(1.615)、‘新世

表3 自然低温下不同芒果品种(系)渗透调节物质含量变化

品种	Pro含量/($\mu\text{g/g}$)		SP含量/(mg/g)		SS含量/(mg/g)	
	降温前	降温后	降温前	降温后	降温前	降温后
台农1号	153.07 $\pm$ 2.86fg	193.97 $\pm$ 0.11d	7.50 $\pm$ 0.50cd	10.25 $\pm$ 1.00cd	46.86 $\pm$ 3.10ab	70.88 $\pm$ 9.13d
金煌芒	109.96 $\pm$ 0.69h	116.81 $\pm$ 4.62f	11.22 $\pm$ 1.00ab	13.47 $\pm$ 0.71b	39.68 $\pm$ 1.01cd	96.01 $\pm$ 3.53ab
贵妃芒	284.77 $\pm$ 5.63a	383.71 $\pm$ 4.50a	7.34 $\pm$ 2.00cd	8.34 $\pm$ 0.46e	49.37 $\pm$ 1.54a	99.23 $\pm$ 0.96ab
水仙芒	253.19 $\pm$ 0.10c	315.76 $\pm$ 5.45b	5.53 $\pm$ 0.58def	6.38 $\pm$ 1.00f	41.60 $\pm$ 2.02bc	102.86 $\pm$ 1.98a
椰香芒	217.24 $\pm$ 5.65d	280.70 $\pm$ 4.92c	4.00 $\pm$ 0.65f	4.43 $\pm$ 0.10g	43.55 $\pm$ 3.05bc	103.21 $\pm$ 1.01a
金兴芒	199.68 $\pm$ 2.08e	269.25 $\pm$ 12.14c	9.79 $\pm$ 0.80ab	13.46 $\pm$ 1.00b	45.41 $\pm$ 5.57ab	86.71 $\pm$ 5.28bc
新世纪芒	259.96 $\pm$ 8.72bc	322.71 $\pm$ 9.93b	11.60 $\pm$ 1.10a	19.24 $\pm$ 1.07a	49.96 $\pm$ 0.03a	77.20 $\pm$ 6.01cd
金穗芒	267.12 $\pm$ 10.60b	311.49 $\pm$ 9.08b	4.93 $\pm$ 0.12ef	7.91 $\pm$ 0.61ef	46.83 $\pm$ 3.02ab	91.47 $\pm$ 1.06ab
热农1号	149.95 $\pm$ 0.12g	328.34 $\pm$ 23.12b	6.47 $\pm$ 0.25de	8.70 $\pm$ 0.32de	35.15 $\pm$ 5.06de	97.19 $\pm$ 6.99ab
汤米芒	159.86 $\pm$ 0.18f	199.39 $\pm$ 1.05d	6.80 $\pm$ 0.42de	11.81 $\pm$ 1.26bc	32.77 $\pm$ 0.03h	92.50 $\pm$ 0.02ab
桂热芒82号	94.38 $\pm$ 1.80i	158.59 $\pm$ 15.14e	6.67 $\pm$ 0.58de	11.32 $\pm$ 1.05c	34.08 $\pm$ 2.99de	87.44 $\pm$ 0.03bc
澳芒	95.47 $\pm$ 2.97i	281.24 $\pm$ 17.12c	9.28 $\pm$ 0.97bc	10.77 $\pm$ 0.48c	34.73 $\pm$ 0.04e	96.43 $\pm$ 4.00ab
红芒6号	57.94 $\pm$ 0.13j	95.12 $\pm$ 3.05f	10.22 $\pm$ 2.20ab	11.64 $\pm$ 0.63bc	33.72 $\pm$ 0.24e	87.20 $\pm$ 7.00bc

表4 降温前和降温后芒果品种（系）抗寒指标的相关性

取样时间	指标	MDA含量	SOD活性	POD活性	Pro含量	SP含量	SS含量
降温前	MDA含量	1					
	SOD活性	0.574 [*]	1				
	POD活性	0.324	0.134	1			
	Pro含量	-0.317	-0.205	-0.288	1		
	SP含量	0.846 ^{**}	0.813 ^{**}	0.238	-0.346	1	
	SS含量	-0.115	0.206	-0.141	0.799 ^{**}	0.01	1
降温后	MDA含量	1					
	SOD活性	0.631 ^{**}	1				
	POD活性	0.139	-0.026	1			
	Pro含量	-0.338	-0.397 [*]	-0.235	1		
	SP含量	0.626 [*]	0.724 ^{**}	-0.316	-0.263	1	
	SS含量	-0.293	-0.635 [*]	0.011	0.308	-0.636 [*]	1

注：^{*}表示 $p < 0.05$ ；^{**}表示 $p < 0.01$

表5 主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

指标	降温前		降温后	
	主成分1	主成分2	主成分1	主成分2
MDA含量	0.871	0.161	0.755	0.183
SOD活性	0.759	0.467	0.900	-0.016
POD活性	0.449	-0.204	-0.039	0.916
Pro含量	-0.601	0.726	-0.532	-0.532
SP含量	0.919	0.300	0.877	-0.350
SS含量	-0.264	0.920	-0.756	0.086
特征值	2.813	1.749	3.004	1.286
贡献率/%	46.881	29.151	50.060	21.437
累积贡献率/%	46.881	76.032	50.060	71.497

纪芒’（1.498）、‘台农1号’（1.446）、‘澳芒’（1.211）、‘桂热芒82号’（0.945）、‘贵妃芒’（0.908）、‘水仙芒’（0.824）、‘热农1号’（0.802）、‘汤米芒’（0.728）、‘金穗芒’（0.532）和‘椰香芒’（0.253）。13份芒果品种（系）根据抗寒能力可分为3类

(图2),第1类包括‘红芒6号’‘金兴芒’‘金煌芒’‘新世纪芒’‘台农1号’‘澳芒’,抗寒能力强;第2类包括‘桂热芒82号’‘贵妃芒’‘水仙芒’‘热农1号’‘汤米芒’,抗寒能力中等;第3类包括‘金穗芒’和‘椰香芒’,抗

寒能力弱。

3 讨论与结论

MDA可作为判断植物抗逆性和细胞膜系统损伤程度的重要指标^[13,14]。蓝莓枝条MDA含量随温度

表6 不同芒果品种(系)主成分得分、隶属函数值、D值及抗寒性排名

品种	时间	综合分		隶属函数值		D值	排名
		F ₁	F ₂	U ₁	U ₂		
台农1号	降温前	0.035	0.865	0.503	0.879	1.446	5
	降温后	1.493	0.570	0.859	0.658		
金煌芒	降温前	2.031	0.779	0.862	0.848	1.615	3
	降温后	1.225	0.491	0.809	0.640		
贵妃芒	降温前	-0.492	1.074	0.408	0.955	0.908	8
	降温后	-1.591	-0.986	0.286	0.302		
水仙芒	降温前	-1.270	0.255	0.269	0.658	0.824	9
	降温后	-1.965	1.406	0.216	0.850		
椰香芒	降温前	-2.764	-0.895	0.000	0.241	0.253	13
	降温后	-3.128	0.043	0.000	0.537		
金兴芒	降温前	1.242	1.198	0.720	1.000	1.671	2
	降温后	1.699	0.831	0.897	0.718		
新世纪芒	降温前	0.988	1.189	0.675	0.997	1.498	4
	降温后	2.251	-2.303	1.000	0.000		
金穗芒	降温前	-2.579	-0.039	0.033	0.551	0.532	12
	降温后	-2.032	-0.014	0.204	0.524		
热农1号	降温前	-0.201	-0.750	0.461	0.293	0.802	10
	降温后	-0.832	-0.751	0.427	0.355		
汤米芒	降温前	-0.735	-1.557	0.365	0.001	0.728	11
	降温后	-0.011	-0.896	0.579	0.322		
桂热芒82号	降温前	-0.548	-1.559	0.398	0.000	0.945	7
	降温后	0.984	0.084	0.764	0.547		
澳芒	降温前	1.495	-0.426	0.766	0.411	1.211	6
	降温后	0.410	-0.539	0.658	0.404		
红芒6号	降温前	2.798	0.378	1.000	0.703	1.788	1
	降温后	1.498	2.063	0.860	1.000		

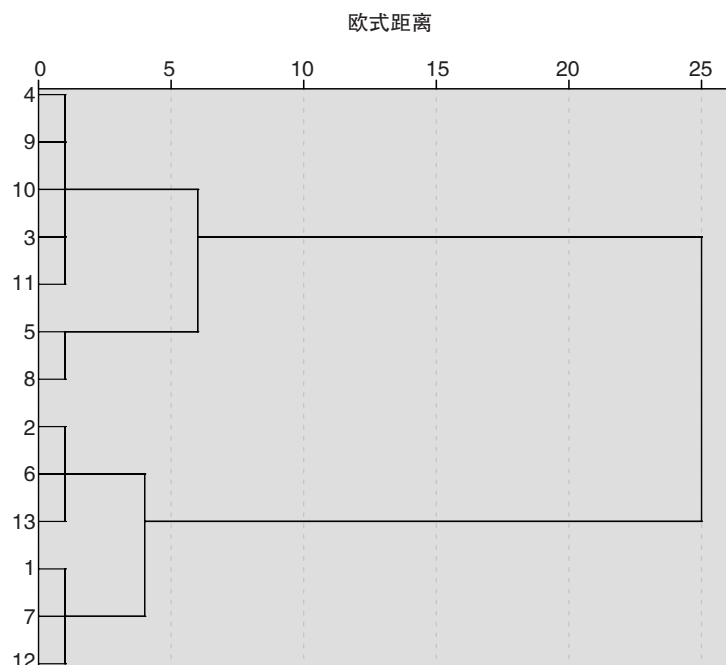


图2 13个芒果品种（系）抗寒性系统聚类分析

注：左侧数字为不同芒果品种。1：‘台农1号’；2：‘金煌芒’；3：‘贵妃芒’；4：‘水仙芒’；5：‘椰香芒’；6：‘金兴芒’；7：‘新世纪芒’；8：‘金穗芒’；9：‘热农1号’；10：‘汤米芒’；11：‘桂热芒82号’；12：‘澳芒’；13：‘红芒6号’

降低而升高，抗寒性强的品种细胞膜损伤程度小，MDA含量升高速度相对平缓^[15]。自然低温胁迫后各芒果品种（系）MDA含量均显著提高，表明芒果枝条细胞膜脂发生过氧化，该研究结果与前人研究结果一致^[8,16]。MDA含量越高，细胞膜损伤程度越大，抗寒能力越弱^[17]。降温后抗寒性最弱的2个品种（系）‘椰香芒’和‘金穗芒’MDA的含量分别为10.02nmol/g和10.84nmol/g，显著低于其他品种，但MDA增幅分别为44.80%和63.25%，显著高于抗寒性最强的品种‘红芒6号’（32.52%），表明芒果抗寒性与MDA含量之间不是单一的正相关或负相关。

SOD和POD能有效清除体内 H_2O_2 、 O_2^- 和 OH^- 等，对维持细胞结构和功能具有重要作用^[17,18]。自然低温胁迫后各芒果品种（系）SOD和POD活

性均显著提高，该研究结果与低温胁迫下苹果枝条中SOD和POD活性变化一致^[3]。自然越冬过程中，抗寒性强的姜花属植物叶片的抗氧化物酶（POD、SOD）活性含量更高^[12]。整个时期，‘红芒6号’‘金兴芒’和‘金煌芒’等强抗寒品种（系）SOD活性均在300.00U/g以上，弱抗寒性品种‘金穗芒’和‘椰香芒’SOD活性则在200.00U/g以下；POD活性强的‘红芒6号’‘金兴芒’‘水仙芒’和‘金煌芒’等抗寒性强的品种，整体来看具有较高的SOD和POD活性，研究结果与刘胜元等^[19]相似。

Pro、SP和SS是重要的渗透调节物质，可以维持细胞膜结构，与植物抗寒性密切相关^[20-23]。低温胁迫时，植物体内的Pro会大量积累，以此来提高渗透压，增强保水性，提升抗寒性^[24]。郭艳兰

等^[25]对葡萄砧木枝条抗寒性评价发现,抗寒性较强的品种Pro含量随温度的降低升高较快,并且最终保持在较高水平。本研究中,‘红芒6号’抗寒性最强,但其降温前和降温后Pro的含量最低,仅为57.94 $\mu\text{g/g}$ 和95.12 $\mu\text{g/g}$,而抗寒性最弱的两个品种(系)Pro含量均维持较高,该研究结果与郭艳兰等^[25]不一致。但也有研究发现,橡胶树^[26]和杨树^[27]的抗寒性与Pro含量关系不显著,因此,推测芒果抗寒性与Pro含量不显著,通过Pro这一个指标评价抗寒性存在缺陷。SP是植物抗寒性评价的指标,具有提高细胞内的束缚水量、抑制离子吸收、保护细胞结构等功能,其含量高低可以反映受害严重程度^[28]。分析发现,整个时期‘红芒6号’‘新世纪芒’和‘金煌芒’等强抗寒性品种(系)SP含量均保持在较高水平,‘椰香芒’的抗寒性最弱,其SP含量最低,分别为4.00mg/g和4.43mg/g,增幅也最小,该研究结果与钟海霞等^[29]基本一致。低温刺激下植物体内的SS会迅速积累,胞液浓度增加,胞质冰点降低,能防止细胞质凝结,从而抵御和缓解低温刺激^[30,31]。本研究中,各品种(系)SS含量差异较小,‘椰香芒’抗寒性最弱,但其SS含量维持在较高水平,而‘红芒6号’抗寒性最强,其SS含量显著低于‘椰香芒’,由此可见,芒果抗寒性受多个指标的影响。

综上可知,每一项指标对13个芒果品种(系)呈现的抗寒性结果存在差异,各种物质应对低温胁迫的过程受多种因素的影响,并不是简单地起到协同作用,研究结果与海光辉等^[32]等基本一致。由于各品种(系)间遗传特性差异较大,导致其抗寒机制差异较大,通过单一指标难以准确、全面地评价其抗寒性,具有一定缺陷。主成分分析法和隶属函数分析法评价植物抗寒性已广泛应用于多种植物^[33,34]。徐功勋等^[35]测定了低温胁迫下苹果枝条抗寒性相关指标,采用主成分分析法和隶属函数综合评价了苹果的抗寒性。谢雨萱等^[12]分析了自然越冬期姜花属植物抗寒生理指标,并结合主成分分析和隶属函数分析对姜花属植物抗寒性进行了评价。本研究通过主成分分析得到各主成分综合评价值和权重,基于综合评价通过隶属函数法计算出各芒果品种(系)的隶属函数值,结合权重得出13份芒果

品种(系)的D值在0.253~1.788之间,并基于D值进行聚类分析,将13份芒果品种(系)分为3类:第1类包括‘红芒6号’‘金兴芒’‘金煌芒’‘新世纪芒’‘台农1号’‘澳芒’,抗寒能力强;第2类包括‘桂热芒82号’‘贵妃芒’‘水仙芒’‘热农1号’‘汤米芒’,抗寒能力中等;第3类包括‘金穗芒’和‘椰香芒’,抗寒能力弱。本研究结果可为芒果抗寒品种筛选与培育提供参考。

参考文献

- [1] 刘清国,龚德勇,王晓敏,等.贵州省几个芒果品种(系)寒害调查与抗寒性分析[J].广东农业科学,2011,38(17):26-28.
- [2] 曾琳,顾雅坤,吴怡,等.超低温冷冻对羯布罗香种子结构和生理生化特性的影响[J].热带亚热带植物学报,2018,26(3):249-254.
- [3] 李岩,田维丽,谢恩俊,等.低温胁迫及生理生化指标综合评价抗寒茶树[J].种子,2020,39(12):38-43,54.
- [4] 赵滢,杨义明,张宝香,等.2个葡萄品种越冬抗寒性比较及其生理响应分析[J].中国果树,2021(9):30-35,41.
- [5] 魏兰波,董佳慧,史文佳,等.自然低温胁迫过程中4种楸树苗期抗寒性综合评价[J].分子植物育种,2024,22(19):6493-6499.
- [6] 潘翠萍,谢红江,王永清,等.6个枇杷品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J].热带作物学报,2019,40(12):2369-2374.
- [7] 刘敏,靳娟,阿布都卡尤木·阿依麦提,等.新疆3个鲜食枣品种的抗寒性评价[J].新疆农业科学,2023,60(4):916-924.
- [8] 井俊丽,刘铭潇,高美娜,等.不同苹果中间砧枝条在越冬期间的生理特性变化及抗寒性比较[J].河北农业大学学报,2022,45(4):25-31.
- [9] 黄云,刘斌,杜邦,等.2013年攀枝花芒果冻害调查报告[J].中国热带农业,2014(2):51-54.
- [10] 张丽梅,陈志峰,许家辉,等.芒果品种资源抗寒能力调查与评价[J].中国南方果树,2017,46(4):91-95.
- [11] 张椿林,杨小波,杜成勋,等.低温胁迫对芒果花序的影响[J].中南农业科技,2024,45(7):50-53.
- [12] 谢雨萱,包革,郭莺,等.自然越冬期姜花属植物生理指标变化及抗寒性评价[J].热带亚热带植物学报,2021,29(5):509-518.
- [13] Campos SP, Quartin NV, Ramalho ACJ, et al. Electrolyte

- leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of coffea sp. plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2003,160(3):283-292.
- [14] Nadarjah KK. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020,21(15):5208.
- [15] 魏鑫,王升,王兴东,等.不同蓝莓品种对低温处理的生理响应及抗寒性评价[J].河南农业科学,2023,52(8):115-125.
- [16] 令凡,焦健,李朝周,等.不同油橄榄品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性综合评价[J].西北植物学报,2015,35(3):508-515.
- [17] 刘燕,罗文敏,段如雁,等.威宁地区茶树种质资源的抗旱性研究[J].西南农业学报,2022,35(3):530-535.
- [18] He S, Zhao K, Ma L, et al. Comparison of cold resistance physiological and biochemical features of four Herba Rhodiola seedlings under low temperature[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2016,23(2):198-204.
- [19] 刘胜元,张明忠,王华田,等.3个主栽花椒品种的抗寒性评价[J].森林与环境学报,2021,41(4):388-395.
- [20] 王海鸥,高展,艾克拜尔·毛拉,等.自然越冬条件下17个葡萄砧木品种几个生理指标变化分析[J].经济林研究, 2019,37(4):120-128.
- [21] Anjum F, Rishi V, Ahmad F. Compatibility of osmolytes with gibbs energy of stabilization of proteins[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2000,1476(1):75-84.
- [22] Zhang XZ, Wang KH, Ernin EH, et al. Metabolic changes during cold acclimation and deacclimation in five bermudagrass varieties: I. Proline, total amino acid, protein, and dehydrin expression[J]. Crop Science, 2011,51(2): 838-846.
- [23] 陈静,何玮,徐远东,等.36份马棘种质资源抗旱性评价[J].西南农业学报,2024,37(3):542-551.
- [24] 王燕凌,廖康,刘君,等.越冬前低温锻炼期间不同品种葡萄枝条中渗透性物质和保护酶活性的变化[J].果树学报, 2006,23(3):375-378.
- [25] 郭艳兰,牟德生,赵连鑫,等.六个葡萄砧木品种(系)的抗寒性评价[J].中外葡萄与葡萄酒,2022(3):38-43.
- [26] 李小琴,张凤良,杨滢,等.橡胶树野生种质资源抗寒性评价及其与生长的相关性分析[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(2):44-51.
- [27] 李晓宇,杨成超,彭建东,等.杨树苗期抗寒性综合评价体系的构建[J].林业科学,2014,50(7):44-51.
- [28] 黄梦真,柴亚倩,关思慧,等.2个石榴品种对低温的生理生化响应[J].果树学报,2024,41(6):1150-1159.
- [29] 钟海霞,潘明启,张付春,等.葡萄砧木枝条的抗寒性比较[J].新疆农业科学,2016,53(2):261-269.
- [30] 李桂荣,程珊珊,张少伟,等.葡萄抗寒相关生理生化指标灰色关联分析[J].东北林业大学学报,2018,46(10):40-47,53.
- [31] 邵怡若,许建新,薛立,等.低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响[J].生态学报,2013,33(14):4237-4247.
- [32] 海光辉,张正武,王茜,等.不同海拔油橄榄对自然低温的生理响应及抗寒性差异[J].经济林研究,2022,40(4):182-190,217.
- [33] 牟开萍,李维芳,杨文新,等.20个月季品种的抗寒性综合评价[J].草原与草坪,2021,41(6):58-66.
- [34] 张志伟.基于主成分分析法的5种棕榈科苗木抗寒性评价[J].种子,2019,38(12):72-76.
- [35] 徐功勋,周佳,吕德国,等.4个苹果品种的抗寒性评价[J].果树学报,2023,40(4):669-679.