

卢云峰,徐明凯,董云萍,等. 6 个咖啡品种在低温胁迫下的生理响应及抗寒性评价[J]. 江苏农业科学,2025,53(14):170-176.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.14.021

# 6 个咖啡品种在低温胁迫下的生理响应及抗寒性评价

卢云峰, 徐明凯, 董云萍, 葛宇, 李学俊, 赵猛, 张凤英  
(云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000)

**摘要:**为探究咖啡对低温胁迫的生理响应及其抗寒性,以云南农业大学试验地种植的 6 个咖啡品种幼苗(卡蒂姆品种 360、132、CC24、NY002、036、萨奇姆品种 397)为试验材料,在人工气候箱中模拟低温胁迫(5℃)环境,设置 0、1、3、5 d 的持续低温胁迫处理时间,测定不同低温胁迫时间处理下 6 个咖啡品种叶片的相对电导率(REC)、游离脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量、过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性 6 个生理指标,并对 6 个生理指标进行相关性分析,最后结合隶属函数法对 6 个不同品种咖啡的抗寒性进行综合评价。结果表明,各咖啡品种的 REC、MDA 含量随着低温胁迫时间的延长呈上升趋势;Pro 含量、SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性随低温胁迫时间的延长呈先上升后下降的趋势。相关性分析结果表明,除 MDA 含量与 CAT 活性之间无显著相关性外,其余指标间均呈显著或极显著相关,是评价咖啡抗寒性的重要指标。采用隶属函数法对 6 个咖啡品种的抗寒性指标进行综合分析和评价,得出其抗寒能力排序为 CC24 > 360 > 132 > 036 > NY002 > 397。研究结果可为今后挖掘咖啡抗寒基因及培育抗寒咖啡品种等提供可靠依据。

**关键词:**咖啡;低温胁迫;生理指标;综合评价;抗寒性

**中图分类号:**S571.201 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)14-0170-07

咖啡是茜草科(Rubiaceae)咖啡属(*Coffea*)多年生常绿灌木或小乔木,它不仅是世界三大饮料作物(咖啡、茶叶、可可)之一,还是热带亚热带地区重要的经济作物<sup>[1]</sup>。目前在世界范围内进行规模化种植的主要是中粒咖啡(*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner)和小粒咖啡(*Coffea arabica* L.) 2 个种<sup>[1-2]</sup>。云南是我国最大的咖啡种植和出口产区,以小粒咖啡为主栽品种,至 2021 年年底,全省咖啡种植面积达 9.3 万 hm<sup>2</sup>,年总产量达 11.0 万 t,占据了我国咖啡产量的 90% 以上,咖啡已经成为云南省

的主要经济作物之一,也是巩固脱贫攻坚、助力乡村振兴及服务国家“一带一路”的重要产业之一<sup>[3-6]</sup>。低温是限制植物生长发育的主要因素之一,咖啡在平均 18~25℃ 的温度下生长良好,在 16~20℃ 温度下适宜花芽发育,温度过低会影响开花和授粉,进而导致开花、结果量减少<sup>[7-8]</sup>。而种植在较高海拔地区的咖啡树病虫害较少,咖啡开花结果后的生长、发育周期也相对较长,咖啡果的品质也较高<sup>[9-10]</sup>,但是高海拔地区时有霜冻发生,而低温寒害会对咖啡树造成伤害,因此限制了咖啡向高纬度、高海拔地区推广。目前在植物抗寒性研究方面已陆续有关于草果<sup>[11]</sup>、茶树<sup>[12]</sup>、油菜等的报道<sup>[13]</sup>,但是关于咖啡抗寒方面的研究却很少,国外研究者主要从咖啡种质资源的生理生化方面进行了初步的抗寒鉴定<sup>[14-16]</sup>,国内研究者主要对咖啡在受寒时的防寒御寒措施进行了研究,此外还有寒害后防治方法的研究<sup>[17-19]</sup>。但是,目前人们还没有选育出具有高抗寒性的咖啡品种,抑制了咖

收稿日期:2024-08-07

基金项目:云南农业大学热带作物学院科学研究项目(编号:A2023022917);云南省基层专家工作站(编号:202305AF150125);云南省孟连县勐马镇公信乡科技特派队(编号:202304B1090032-58)。

作者简介:卢云峰(1992—),男,云南大理人,硕士,讲师,主要从事作物栽培研究。E-mail:2284932093@qq.com。

通信作者:张凤英,副教授,主要从事植物生理研究。E-mail:1285695143@qq.com。

[32] 陈心怡,朱盈,马中涛,等. 光强和氮肥互作对南方软米梗稻灌浆结实期碳氮代谢影响及其与产量品质间关系[J]. 作物学报,2023,49(11):3042-3062.

[33] 丁怡梦,陈慕琪,丁文锐,等. 谷类作物碳氮代谢互作机制的研究进展[J]. 植物生理学报,2024,60(5):753-761.

[34] 刺世凯,李佳璠,杜丽春,等. 温室黄瓜育苗中生物菌肥的促根壮秧及化肥减施效果[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):469-475.

[35] Zhang L, Yang X M, Gao D C, et al. Effects of poly-γ-glutamic acid (γ-PGA) on plant growth and its distribution in a controlled plant-soil system[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):6090.

啡产业向高海拔地区的发展<sup>[20]</sup>。因此,亟需了解咖啡抗寒的生理生化机制,选育出具有高抗寒性的咖啡品种。为此,本试验以云南农业大学收藏的 6 份咖啡种质资源为研究对象,分别测定其在低温胁迫条件下的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性与丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)含量,以及相对电导率(REC),并对上述生理生化指标进行综合分析和评价,以筛选出耐寒性相对较强的咖啡种质,以期为今后挖掘咖啡抗寒基因及培育抗寒咖啡品种等提供可靠依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验选取由云南农业大学热带作物学院康平基地培育的 397(萨奇姆品种)、CC24(由雀巢咖啡中心引进的墨西哥类咖啡的后代)、036(从哥斯达黎加引进的卡蒂姆种)、360(从东帝汶引进的小粒种咖啡)、132(由云南省德宏热带农业科学研究所选育的黄果咖啡)、NY002(由雀巢咖啡中心试验地的黄果咖啡)6 个小粒咖啡品种为试验材料。以上材料均为 6 个月龄袋装苗,株高 25 cm,茎粗 0.4 cm,有 4 对叶片。

### 1.2 试验设计

试验于 2023 年 4—12 月在云南农业大学热带作物学院温室、植物生理实验室内进行。从云南农业大学热带作物学院康平基地选取健康且长势基本一致的 6 个咖啡品种的 6 月龄袋装苗,于 2023 年 4 月 26 日换成规格为 11 cm × 17 cm 的营养袋,营养土配比为土:商品有机肥(体积比)=8.5:1.5,每个营养袋装土 3 kg,继续培育 6 个月,按照常规方法进行管理。2023 年 11 月开始进行低温胁迫处理,处理前 10 d 停止浇水,营养袋的土壤湿度保持在 80% 左右。选取健康状况良好、长势一致的植株放置于温度 5 ℃、相对湿度 80% 的人工气候箱中,每个处理设置 9 株,进行低温胁迫处理,以常温培养下各品种小粒咖啡苗为 CK,分别在低温胁迫 1、3、5 d 时采集各处理咖啡植株从上往下数的第 2 对叶片,迅速置于液氮中冷冻,并转移到 -80 ℃超低温冰箱中保存,用于后续测定咖啡抗寒性相关的生理生化等指标。

### 1.3 测试项目及方法

CAT、POD、SOD 活性的测定分别采用紫外光吸

收法<sup>[21]</sup>、愈创木酚法<sup>[21]</sup>、氮蓝四唑(NBT)光化还原法<sup>[22]</sup>;脯氨酸含量的测定采用脯氨酸试剂盒(由北京索拉科技有限公司生产);丙二醛(MDA)含量、相对电导率的测定分别采用硫代巴比妥酸法<sup>[21]</sup>、电导仪法<sup>[23]</sup>。

### 1.4 隶属函数法评价

参照王晓龙等<sup>[24]</sup>和李清亚等<sup>[25]</sup>的方法,使用模糊综合评判方法中的隶属度公式计算隶属函数值( $T$ 值)和平均隶属度,综合分析评价不同咖啡品种的抗寒性。隶属函数值的计算公式如下:

$$T(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (1)$$

$$T(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}). \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为各处理某一指标的测定值; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别表示各处理中某一指标测定值的最小值、最大值。当 CAT、POD、SOD 活性与 Pro 含量与抗寒性呈正相关时,用公式(1)进行计算;当 MDA 含量、REC 与抗寒性呈负相关时,用公式(2)进行计算。

### 1.5 数据分析

用 Excel 2021 计算平均值、标准差并绘制图形。单因素方差分析、相关性分析用 SPSS 27.0 软件。采用新复极差法(Duncan's)进行多重比较,显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。

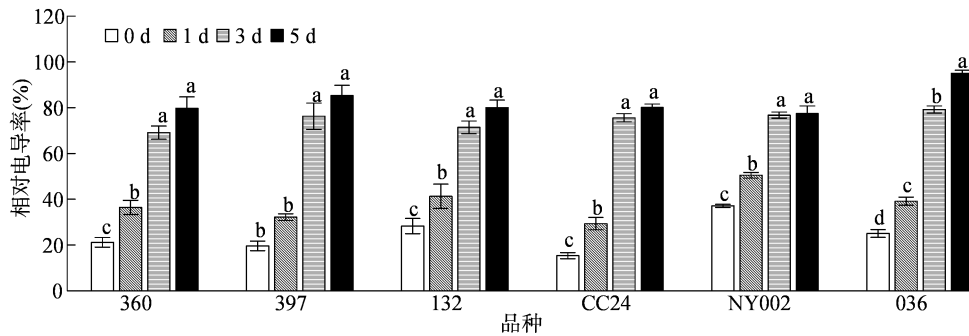
## 2 结果与分析

### 2.1 6 个咖啡品种在 5 ℃低温胁迫下叶片中相对电导率变化

如图 1 所示,5 ℃低温胁迫 1 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率在 29.33% ~ 50.47% 之间;5 ℃低温胁迫 3 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率在 69.10% ~ 79.20% 之间;5 ℃低温胁迫 5 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率在 77.43% ~ 95.07% 之间。在 5 ℃低温胁迫条件下将胁迫时间从 0 d 延长至 5 d 后,6 个咖啡品种叶片的相对电导率均增加。5 ℃低温胁迫 1 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率变化幅度较小;当胁迫时间持续延长至 3 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率均显著提高( $P < 0.05$ );胁迫 5 d 时,6 个咖啡品种的叶片相对电导率增加幅度减小,且所有处理的相对电导率均达到最高值,其中品种 036 的相对电导率最高,增幅显著,其他品种的变化均不显著。

### 2.2 6 个咖啡品种在 5 ℃低温胁迫下叶片中丙二醛含量的变化

如图 2 所示,在 5 ℃低温胁迫下,随着胁迫时间



柱上同一品种的不同胁迫时间间标有不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下图同  
图1 6个咖啡品种在5℃低温胁迫下叶片中相对电导率的变化

从0 d增加到5 d,6个咖啡品种叶片中的丙二醛含量均增加,并在胁迫后5 d时达到最大值。在低温胁迫下,6个小粒种咖啡品种叶片的丙二醛含量增加规律不一:胁迫0~1 d时,397、132、CC24的叶片丙二醛含量显著增加,360、NY002、036的丙二醛含量虽然有所增加,但差异未达到显著水平;胁迫1~

3 d时,360、397的叶片丙二醛含量有显著增加的趋势,132、CC24、NY002、036的叶片丙二醛含量增加,但是差异不显著;胁迫3~5 d时,6个咖啡品种叶片丙二醛含量虽然均在增加,但是增加速度较慢,均没有显著差异;胁迫5 d时,咖啡品种397的丙二醛含量最高,132、036的丙二醛含量较低。

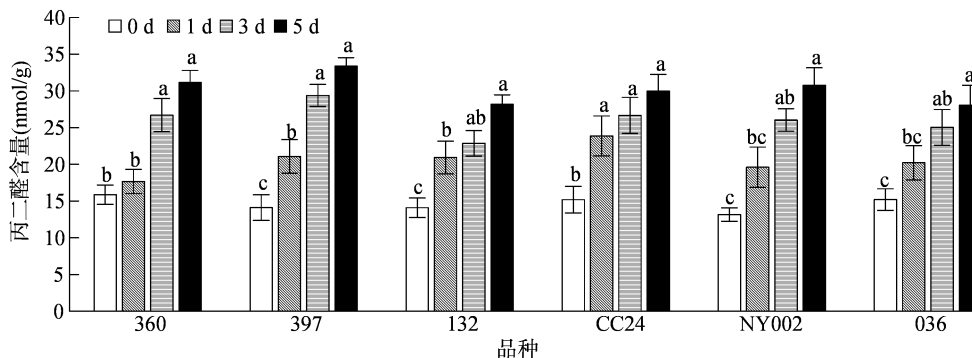


图2 6个咖啡品种在5℃低温胁迫下叶片中丙二醛含量的变化

### 2.3 6个咖啡品种在5℃低温胁迫下叶片中脯氨酸含量变化

如图3所示,5℃低温胁迫处理0 d时,6个咖啡品种叶片中的游离脯氨酸含量在41.36~44.40 μg/g之间;5℃低温胁迫处理1 d时,6个咖啡品种叶片中的游离脯氨酸含量增加到57.42~71.65 μg/g;5℃低温胁迫处理3 d时,6个咖啡品种叶片中的游离脯氨酸含量进一步增加到96.88~114.67 μg/g;5℃低温胁迫处理5 d时,6个咖啡品种叶片中的游离脯氨酸含量下降,为84.39~103.68 μg/g。整体上看,随着胁迫时间从0 d增加到5 d,6个咖啡品种叶片中游离脯氨酸含量均先增加然后又降低,并在胁迫后3 d时达到最高值。与胁迫0~1 d相比,胁迫1~3 d时咖啡叶片中游离脯氨酸含量的增加幅度更大。品种397叶片中游离脯氨酸含量的增加幅度在5℃低温胁迫处理0~1 d

时最大,与低温处理前相比增加了61.37%;5℃低温胁迫处理后1~3 d,品种132叶片中游离脯氨酸含量的增幅最大,与处理1 d时相比增加了80.54%;5℃低温胁迫处理后3~5 d,6个咖啡品种叶片中的游离脯氨酸含量均开始降低,除397、CC24叶片中的游离脯氨酸含量显著降低外,其他品种的降幅均不显著。在整个试验期间,NY002叶片中的游离脯氨酸增幅最大,与低温处理前相比增加了134.86%。  
2.4 6个咖啡品种在5℃低温胁迫下叶片中抗氧化酶活性的变化

如图4-A所示,在5℃低温胁迫下,随着胁迫时间从0 d增加到5 d,6个咖啡品种叶片中的SOD活性均先增加后降低。5℃低温胁迫1 d时,与0 d相比6个咖啡品种叶片的SOD活性均迅速增加,且变化显著,SOD活性达峰值,为2.99~4.59 U/mg,与低温胁迫前相比增了53.45%~133.00%;5℃低

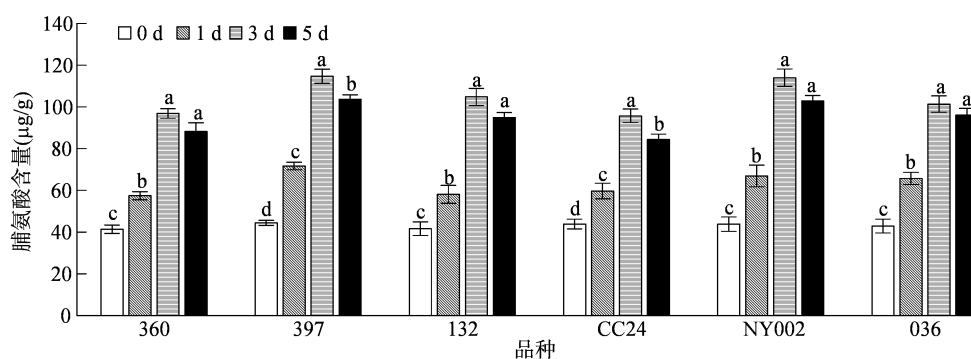


图3 6个咖啡品种在5 °C低温胁迫下叶片中脯氨酸含量的变化

温胁迫1~5 d时,6个咖啡品种叶片中的SOD活性呈缓慢下降的变化趋势,除品种NY002叶片中的SOD活性在胁迫5 d时与胁迫1 d时有显著差异外,其余5个咖啡品种叶片中的SOD活性在胁迫1~5 d内均无显著变化,但6个咖啡品种叶片中的SOD活性在胁迫1~5 d内均显著高于低温胁迫前。

如图4-B所示,在5 °C低温胁迫下,随着低温胁迫时间从0 d增加到5 d,6个咖啡品种叶片中的CAT活性均表现为先急速上升然后又迅速下降的变化,在低温胁迫0~1 d时显著增加,达到最大值,范围在7.43~8.85 U/mg之间,与低温胁迫前相比增了150.80%~223.00%;胁迫1~3 d时,6个咖啡品种叶片的CAT活性迅速下降,且变化显著;胁迫3~5 d时,除了品种NY002的CAT活性显著降低,其他5个咖啡品种的CAT活性变化不大,均无显著差异。

如图4-C所示,在5 °C低温胁迫下,随着胁迫时间从0 d增加到5 d,6个咖啡品种叶片中POD活性整体表现除出先急速上升然后又缓慢下降的变化。5 °C低温胁迫0~1 d时,6个咖啡品种叶片的过氧化物酶活性均显著增加,与低温胁迫前相比增幅为198.30%~295.70%;5 °C低温胁迫1~5 d时,6个咖啡品种叶片的POD活性均开始缓慢下降,除品种397在胁迫5 d时显著降低,其余5个咖啡品种POD活性的差异不明显。

## 2.5 低温胁迫下6个咖啡品种各抗寒性指标间的相关性分析

如表1所示,CAT活性与MDA含量间无显著相关性,CAT活性与相对电导率间呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),CAT活性与Pro含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ),其余指标间均呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。由此可知,6个咖啡品种抗寒性相关生理指标间均存在一定联系,不能仅通过单个指标进行抗

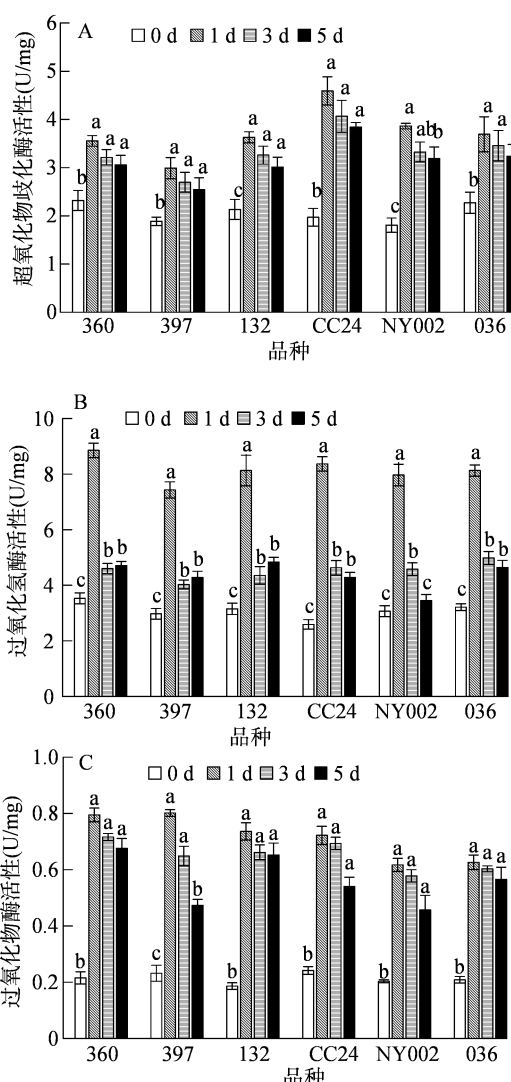


图4 低温胁迫对6个咖啡品种叶片超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性的影响

寒性的评价。

## 2.6 低温胁迫下6个咖啡品种各抗寒性生理指标的隶属函数分析

小粒咖啡在遭受低温胁迫后,自身会发生多种多样的变化以抵抗低温胁迫的影响,这个变化是多

表 1 6 个咖啡品种抗寒性生理指标间的相关性分析

指标	相关系数					
	相对电导率	丙二醛含量	脯氨酸含量	超氧化物歧化酶活性	过氧化物酶活性	过氧化氢酶活性
相对电导率	1.000					
丙二醛含量	0.780 **	1.000				
脯氨酸含量	0.890 **	0.790 **	1.000			
超氧化物歧化酶活性	0.332 **	0.378 **	0.340 **	1.000		
过氧化物酶活性	0.410 **	0.413 **	0.486 **	0.635 **	1.000	
过氧化氢酶活性	-0.318 **	-0.191	-0.260 *	0.524 **	0.513 **	1.000

注: \* 表示在 0.05 水平显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平显著相关。

个因子综合作用的结果。因此, 单项生理指标并不能完全、准确地反映植物的抗寒性, 通常应进行综合评价。运用隶属函数法计算得出低温胁迫下 6 个

咖啡品种的综合隶属度值并进行排序。表 2 结果显示, 6 个咖啡品种的抗寒性排序为 CC24 > 360 > 132 > 036 > NY002 > 397。

表 2 6 个咖啡品种抗寒性生理指标的隶属函数分析

品种	隶属函数值							排序
	相对电导率	丙二醛	脯氨酸	超氧化物歧化酶	过氧化物酶	过氧化氢酶	平均	
360	0.545	0.521	0.404	0.441	0.673	0.368	0.492	2
397	0.524	0.440	0.576	0.259	0.573	0.267	0.440	6
132	0.499	0.587	0.457	0.432	0.606	0.327	0.485	3
CC24	0.564	0.467	0.403	0.650	0.590	0.307	0.497	1
NY002	0.434	0.543	0.553	0.445	0.451	0.280	0.451	5
036	0.445	0.556	0.479	0.488	0.511	0.342	0.470	4

### 3 讨论

#### 3.1 低温胁迫下咖啡叶片相对电导率与抗寒性的关系

细胞膜既可以接受和传递细胞内外信息, 又能对外界环境胁迫作出反应, 是植物细胞内外环境之间的一个界面<sup>[26]</sup>。当植物受到低温胁迫时, 细胞膜系统会受到相应影响, 膜结构也因此发生改变, 膜透性增大, 细胞内电解质通过细胞膜向外渗透, 进而导致细胞外液电导率增大<sup>[27]</sup>。基于细胞外液电导率变化, 可以确定细胞膜透性, 进而推测细胞膜受损伤的程度及抗寒强度, 是植物抗寒性评价中最常用的试验方法, 因此相对电导率可作为评价植物抗寒能力的重要指标<sup>[28]</sup>。抗寒能力强的植株, 低温对其细胞膜的损害较小, 其相对电导率改变较小, 并且能恢复到正常水平。相反, 抗寒能力弱的植株, 低温对细胞膜损伤更严重, 其相对电导率的变化也较大, 更难恢复到正常水平<sup>[29-30]</sup>。王敏等通过对 10 种紫花苜蓿在 4 °C 低温胁迫下的研究发现, 随着低温胁迫时间的延长, 10 种紫花苜蓿的相对电导

率均增加, 且各品种的增加趋势不一样<sup>[31]</sup>, 表明 10 种紫花苜蓿细胞膜均受到了一定程度的损伤, 相对电导率增幅大的细胞膜受到的损伤程度较大, 相对电导率增幅较小的细胞膜受到的损伤程度较小。本试验结果表明, 在 5 °C 低温胁迫下, 随着胁迫时间从 0 d 增加到 5 d, 6 个咖啡品种叶片的相对电导率整体表现为上升趋势, 且胁迫 5 d 时 6 个咖啡品种的相对电导率与低温胁迫前相比均具有显著差异, 其中品种 036 的增幅最大, 品种 NY002 增幅最小, 表明品种 036 的抗寒能力较弱, 叶片细胞膜受损严重, 品种 NY002 的抗寒能力相对较强, 叶片细胞膜受损相对较轻。

#### 3.2 低温胁迫下咖啡叶片丙二醛含量与抗寒性的关系

植物在遭受低温胁迫时, 体内会发生膜脂过氧化反应, 导致活性氧积累, 使自由基的产生与清除的动态平衡遭到破坏, 从而使细胞膜系统受到损伤甚至瓦解, 最终导致膜脂过氧化反应的终产物丙二醛含量增加。细胞膜系统是植物遭受低温胁迫时冷害发生的首要部位, 低温胁迫引起的植株寒害损

伤和死亡的主要原因是低温引起的细胞器膜结构的破坏<sup>[32]</sup>。因此,丙二醛的含量在一定程度上既能反映细胞膜受损伤的程度,也能够反映植物抗寒能力的强弱。周丽霞等研究发现,在 4 ℃ 低温胁迫下,随着胁迫时间从 0 d 增加到 2 d,10 份油棕种质的丙二醛含量整体上逐渐增加,且增加趋势不一样,表明 10 份油棕种质的抗寒强度不同<sup>[33]</sup>。本研究结果表明,随着低温胁迫时间的延长,6 个咖啡品种叶片的丙二醛含量逐渐增加,但是增加的趋势不一,且与相对电导率呈极显著正相关。其中品种 397 的变化幅度最大,与低温胁迫前相比增加了 136.47%,表明抗寒能力弱,品种 036 的变化幅度最低,与低温胁迫前相比增加了 84.54%,表明抗寒能力相对较强。

### 3.3 低温胁迫下咖啡叶片脯氨酸含量与抗寒性的关系

植物在遭受低温胁迫时,自身能够产生大量渗透调节物质来维持体内渗透压平衡,使其维持正常的形态和生理功能。脯氨酸是植物体重要的渗透调节物质之一,以游离状态存在植物体内,并参与蛋白质构成,其具有较强的亲水性,既能够防止细胞脱水,又能降低组织冰点<sup>[34]</sup>,它可以在低温胁迫下积累,并参与调节植物体内的生理生化反应,从而增强植物对低温的耐受性,提高植物的抗寒性<sup>[35]</sup>。本研究结果表明,在 5 ℃ 低温胁迫下,随着低温胁迫时间的延长,6 个咖啡品种叶片的游离脯氨酸含量呈现先增加后降低的趋势,且增加或降低的含量各不相同,但胁迫 5 d 时 6 个咖啡品种叶片的游离脯氨酸含量与低温胁迫前相比均显著增加,说明 6 个咖啡品种均会通过产生和积累渗透调节物质脯氨酸来抵御寒冷。低温胁迫后,6 个咖啡品种游离脯氨酸含量的变化趋势与段景秀等的研究结果<sup>[28]</sup>一致。

### 3.4 低温胁迫下咖啡叶片抗氧化酶活性与抗寒性的关系

在正常生长情况下,植物体内活性氧的生成和清除处于一个动态平衡状态,当植物遭受低温胁迫时,这一动态平衡被打破,体内活性氧增加并积累,同时体内光氧化反应加剧,产生大量超氧阴离子自由基( $O_2^- \cdot$ ),这些超氧阴离子自由基又会与 OH—结合,进而对植物细胞 DNA 造成损伤。SOD 能催化超氧阴离子自由基发生歧化反应,生成过氧化氢、氧,POD 能将植物体内过量的过氧化氢清除,CAT

作为辅酶参与活性氧的清除<sup>[32,36-37]</sup>。因此,植物体内因低温胁迫产生的超氧阴离子自由基( $O_2^- \cdot$ )、过氧化氢能够在 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶的协同配合下被清除,使植物体内氧化、抗氧化的动态平衡能被维持,从而对植物起到有效的保护作用。本研究发现,在 5 ℃ 低温胁迫下,随着低温胁迫时间的延长,6 个咖啡品种叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性均呈现先增加后降低趋势;增加阶段,可能由于低温胁迫初期诱导了咖啡植株体内 SOD、POD 和 CAT 活性的增加,对咖啡叶片细胞内超氧阴离子自由基( $O_2^- \cdot$ )的积累起到了一定清除作用,从而保护咖啡叶片细胞膜系统免受伤害,提高咖啡的抗寒能力,这是植物抵御低温伤害的本能反应。随着低温胁迫时间的延长,植物体内的代谢平衡被打破,抗氧化酶活性遭到不可逆转的下降,清除超氧阴离子自由基的能力下降,动态平衡失调,植株出现受伤症状。上述结果与王晓霞等在低温处理青海茄参得到结果<sup>[38]</sup>、黄丽芳等在低温处理小粒咖啡时得到的结果<sup>[5]</sup>一致。

### 3.5 隶属函数评价咖啡抗寒性

隶属函数法属于模糊数学计算方法,可以对种质的不同抗性相关指标进行综合分析,与单一指标相比更全面,目前已被众多学者认可,并被广泛应用于油棕<sup>[33]</sup>、梨<sup>[39]</sup>、甘蔗<sup>[40]</sup>、木薯<sup>[41]</sup>、核桃<sup>[42]</sup>、石榴<sup>[43]</sup>等的抗寒性综合评价中。本试验采用隶属函数加权重的综合评价方法,对 6 个小粒咖啡品种在低温胁迫下的 POD、SOD、CAT 活性以及 MDA 和游离 Pro 含量和 REC 等抗寒性相关指标进行了综合分析,最后根据综合得分,得出这 6 个咖啡品种的抗寒性排名。

## 4 结论

在低温胁迫下,6 个咖啡品种的 POD、SOD、CAT 活性与 MDA、游离 Pro 含量,以及相对电导率与低温处理前相比均呈现上升趋势。结合 6 个咖啡品种的抗寒性相关指标综合分析得出,6 个咖啡品种的抗寒性排序为 CC24 > 360 > 132 > 036 > NY002 > 397。

### 参考文献:

- [1] 闫林,黄丽芳,王晓阳,等. 基于 ISSR 标记的咖啡资源遗传多样性分析[J]. 热带作物学报,2019,40(2):300-307.
- [2] Martins P M M, Batista N N, da Cruz Pedrozo M M G, et al. Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and

- the quality of fermented coffees [J]. *Food Research International*, 2020, 129: 108872.
- [3] 黄家雄, 李锐锐, 夏兵, 等. 云南咖啡产业高质量发展对策初探 [J]. *热带农业科技*, 2022, 45(3): 21-29.
- [4] 胡发广, 刘红明, 毕晓菲, 等. 不同海拔的小粒咖啡光合特性日变化研究 [J]. *江西农业学报*, 2022, 34(5): 53-58.
- [5] 黄丽芳, 龙宇宙, 李金芹, 等. 低温胁迫对小粒种咖啡幼苗生理特性的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(2): 60-67.
- [6] 李贵平, 付兴飞, 李亚男, 等. 怒江州精品咖啡标准化种植技术 [J]. *热带农业科学*, 2022, 42(7): 29-37.
- [7] 吴家耀. 咖啡花的形态学研究—影响咖啡开花的因素 [J]. *云南教育学院学报*, 1996(2): 74-77.
- [8] 王芳, 李峪曦, 蒋路平, 等. 低温胁迫下植物分子响应机制研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2020, 33(6): 15-21.
- [9] 黄家雄, 吕玉兰, 程金焕, 等. 不同海拔对小粒种咖啡品质影响的研究 [J]. *热带农业科学*, 2012, 32(8): 4-7.
- [10] 萧自位, 张洪波, 田素梅, 等. 云南咖啡生豆品质研究 [J]. *食品工业*, 2019, 40(2): 29-33.
- [11] 赵新宇, 苏俊宇, 杨伟, 等. 不同产地草果种质资源抗寒性评价 [J]. *中国农学通报*, 2024, 40(15): 73-79.
- [12] 闫瑞瑞, 燕飞, 曲东, 等. 外源物质对茶树抗寒性影响的研究进展 [J/OL]. *分子植物育种*, 2024: 1-10 (2024-06-18) [2024-07-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240618.0939.004.html>.
- [13] 徐义群, 胡哲, 胡月朦, 等. 干旱-低温交叉适应性对茶树抗寒性的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(1): 1-6.
- [14] Ramalho J C, Fortunato A S, Goulao L F, et al. Cold-induced changes in mineral content in leaves of *Coffea* spp. Identification of descriptors for tolerance assessment [J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57(3): 495-506.
- [15] Ramalho J C, DaMatta F M, Rodrigues A P, et al. Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp. plants [J]. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2014, 26(1): 5-18.
- [16] Fortunato A S, Lidon F C, Batista-Santos P, et al. Biochemical and molecular characterization of the antioxidative system of *Coffea* sp. under cold conditions in genotypes with contrasting tolerance [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(5): 333-342.
- [17] 何丽. 云南咖啡防寒御寒措施 [J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 154-155, 168.
- [18] 孙燕, 董云萍. 咖啡寒害及其防治 [J]. *农村实用技术*, 2015(7): 36-37.
- [19] 周华, 李锦红, 杨世华, 等. 小粒种咖啡寒害树截干复壮试验初报 [J]. *热带农业科技*, 2004, 27(4): 13-16.
- [20] 黄家雄, 李贵平. 中国咖啡遗传育种研究进展 [J]. *西南农业学报*, 2008, 21(4): 1178-1181.
- [21] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 172-179.
- [22] 于孝保, 朱继宏, 付德峰, 等. 4种蔬菜中SOD活性测定研究 [J]. *现代农业科技*, 2012(11): 82, 88.
- [23] 蒋媛, 位杰, 林彩霞, 等. 6个香梨品种的低温半致死温度比较及耐寒性评价 [J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(6): 1358-1363.
- [24] 王晓龙, 杨翌, 来永才, 等. 8个苜蓿品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价 [J]. *中国草地学报*, 2023, 45(8): 60-69.
- [25] 李清亚, 路斌, 赵佳伟, 等. 不同豆梨品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 86-94, 110.
- [26] 徐呈祥. 提高植物抗寒性的机理研究进展 [J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7966-7980.
- [27] 谢小敏. 3个卡特兰品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 36-37.
- [28] 段景秀, 侯禄晓, 暴会会, 等. 低温胁迫对马铃薯幼苗抗寒相关生理指标的影响 [J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(5): 20-26.
- [29] 黄治远, 李隆华, 张云贵, 等. 龙眼耐寒性与叶片可溶性糖含量的关系 [J]. *中国南方果树*, 2005, 34(2): 32-33.
- [30] 安常蓉, 韦小丽, 叶嘉俊, 等. 低温胁迫对闽楠幼苗形态及生理特性的影响 [J]. *西部林业科学*, 2018, 47(3): 96-101, 106.
- [31] 王敏, 李莉, 贾蓉, 等. 10种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价 [J]. *草业学报*, 2024, 33(6): 76-88.
- [32] 丁红映, 田宇豪, 李青, 等. 马铃薯低温胁迫的生理响应及耐寒性综合评价 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33(6): 1165-1170.
- [33] 周丽霞, 吴秋妃, 李睿, 等. 低温胁迫下10份油棕种质耐寒性分析 [J/OL]. *分子植物育种*, 2023: 1-10 (2023-11-16) [2024-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231115.1400.014.html>.
- [34] Huang Z, Zhao N, Qin M F, et al. Mapping of quantitative trait loci related to cold resistance in *Brassica napus* L. [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 231: 147-154.
- [35] 杨凤翔, 金芳, 颜霞. 不同草莓品种抗寒性综合评价 [J]. *果树学报*, 2010, 27(3): 368-372.
- [36] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species; metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 373-399.
- [37] 吴宇欣, 蔡昌杨, 唐诗蓓, 等. 植物响应低温的生长发育及分子机制研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 1-9.
- [38] 王晓霞, 王成, 赵艳艳. 低温胁迫对青海茄参叶片生理特性的影响 [J]. *青海大学学报*, 2023, 41(5): 53-57, 92.
- [39] 王睿哲, 张蓓, 郭铁群, 等. 5个梨品种在低温胁迫下的生理响应及抗寒性评价 [J]. *山东农业科学*, 2023, 55(2): 57-63.
- [40] 饶席兵, 钱祺锋, 曾丹, 等. 低温胁迫下不同甘蔗品种的生理响应及耐寒性评价 [J]. *热带作物学报*, 2024, 45(4): 742-751.
- [41] 张玮, 易拓, 唐维, 等. 木薯耐寒性种质资源及其鉴定指标的筛选与综合评价 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(1): 1-10.
- [42] 相昆, 张美勇, 徐颖, 等. 不同核桃品种耐寒特性综合评价 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2325-2330.
- [43] 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.