北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

51个蜡梅品种抗寒性鉴定及评价

刘媛媛 卢扬 李秋旭 刘思漪 王彤叡 李庆卫

Identification and evaluation of cold tolerance of 51 *Chimonanthus praecox* cultivars

Liu Yuanyuan, Lu Yang, Li Qiuxu, Liu Siyi, Wang Tongrui, Li Qingwei

引用本文:
刘媛媛, 卢扬, 李秋旭, 刘思漪, 王彤叡, 李庆卫. 51个蜡梅品种抗寒性鉴定及评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):178–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250305
Liu Yuanyuan, Lu Yang, Li Qiuxu, Liu Siyi, Wang Tongrui, Li Qingwei. Identification and evaluation of cold tolerance of 51 *Chimonanthus praecox* cultivars[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):178–190. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250305

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250305

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

枣*CML*基因的分子特征及其抗寒性表达模式分析
Molecular characteristics of *CML* genes in Chinese jujube and their expression patterns in resistance to cold stress
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 58–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210334

油松杂交子代鉴定与苗期评价
Identification and seedling stage evaluation of *Pinus tabuliformis* hybrid progeny
北京林业大学学报, 2026, 48(2): 141–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250093

北京市区国槐表型差异及综合评价研究
Phenotypic difference and comprehensive evaluation of *Sophora japonica* in Beijing urban area
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 23–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210013

毛白杨耐寒种质资源遗传鉴定及评价
Genetic identification and evaluation of cold-resistant germplasm resources in *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 59–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220363

不同种源栎属和锥属橡实品质差异及综合评价研究
Comparison and comprehensive evaluation of acorn qualities of *Quercus* and *Castanopsis* from different provenances
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 36–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210117

美洲黑杨种质资源创制和综合评价
Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources
北京林业大学学报, 2024, 46(8): 79–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220101

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250305

51 个蜡梅品种抗寒性鉴定及评价

刘媛媛 卢 扬 李秋旭 刘思漪 王彤叡 李庆卫
（北京林业大学园林学院林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】对不同品种蜡梅的抗寒性进行鉴定与对比分析，解析其低温胁迫下生理响应差异，筛选适宜北方寒冷地区推广的高抗寒品种，以期为北方地区蜡梅的园林推广应用提供优良种质资源和理论依据。**【方法】**以 51 个蜡梅品种一年生枝条为材料，设置−34～−10 ℃ 梯度降温处理，以 4 ℃ 处理为对照，测定不同处理中不同蜡梅品种的相对电导率，并通过拟合 Logistic 方程计算半致死温度，初步筛选出高抗寒和低温敏感的代表品种，进一步测定其渗透调节（可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸）、抗氧化酶（超氧化物歧化酶、过氧化物酶）、细胞膜受损程度（丙二醛）等相关抗寒生理指标，并结合主成分分析与隶属函数法对各品种抗寒性进行综合评价。**【结果】**（1）51 份蜡梅品种相对电导率变化均呈“S”形曲线，半致死温度在−28.71～−17.59 ℃ 之间，筛选出 5 个高抗寒品种（C25、C27、C33、C39、C51）和 5 个低温敏感品种（C10、C11、C42、C46、C49）进行进一步抗寒生理指标测定。（2）随着处理温度下降，10 个代表品种的相对电导率与丙二醛含量均上升，过氧化物酶、超氧化物歧化酶活性，可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量等保护性生理指标均呈先升后降趋势；但相较于低温敏感品种，高抗寒品种表现为膜系统受损更慢、保护性生理指标峰值更高且降幅更缓的变化特征。（3）综合评价结果显示，筛选出的 10 个高抗寒或低温敏感蜡梅品种的抗寒性由强到弱依次为 C27、C39、C25、C51、C33、C49、C46、C10、C42、C11。**【结论】**高抗寒蜡梅品种具有更低的细胞膜受损程度、更强的抗氧化酶活性积累能力及渗透调节能力，本研究筛选出的 C27、C39、C25、C51、C33 高抗寒蜡梅品种可作为北方寒冷地区园林应用的适宜种质，这为突破蜡梅在北方寒冷地区的推广瓶颈奠定了关键的种质基础。

关键词：蜡梅；抗寒性；半致死温度；良种选育；综合评价
中图分类号：S685 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)03−0178−13
引文格式：刘媛媛，卢扬，李秋旭，等. 51 个蜡梅品种抗寒性鉴定及评价［J］. 北京林业大学学报，2026，48(3)：178−190. Liu Yuanyuan, Lu Yang, Li Qiuxu, et al. Identification and evaluation of cold tolerance of 51 *Chimonanthus praecox* cultivars［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 178−190.

Identification and evaluation of cold tolerance of 51 *Chimonanthus praecox* cultivars

Liu Yuanyuan Lu Yang Li Qiuxu Liu Siyi Wang Tongrui Li Qingwei
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Tree Resources, School of Landscape Architecture, Beiing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ This study identified and compared cold tolerance in different *Chimonanthus praecox* cultivars, analyzed their physiological responses to low-temperature stress, and screened cold-tolerant cultivars for cold northern regions, providing elite germplasm and theoretical support for its landscape application. ［**Method**］ One-year-old branches from 51 *C. praecox* cultivars were treated with gradient cooling from −34 to −10 ℃, with 4 ℃ as the control. The relative electrical conductivity (REC) was

收稿日期: 2025−08−08 **修回日期:** 2025−11−07
基金项目: 重点地区冬季景观树种蜡梅苗木储备驯化（1100024T000003064556），国家林业局项目“蜡梅”林业行业标准制修订（2020-LY-008）。

第一作者: 刘媛媛。主要研究方向：蜡梅抗逆生理。Email：Tropaeolum@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
责任作者: 李庆卫，教授。主要研究方向：园林植物应用与园林生态。Email：lqw6809@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

measured, and the semi-lethal temperature (LT_{50}) was calculated by fitting the Logistic equation. Representative cultivars with high cold resistance and low-temperature sensitivity were primarily screened. Their physiological indices related to cold tolerance were further determined, including osmotic regulators (soluble sugar, soluble protein, proline), antioxidant enzymes (superoxide dismutase, peroxidase) and malondialdehyde (MDA) reflecting membrane damage. Finally, the cold resistance of all cultivars was comprehensively evaluated by principal component analysis and the subordinate function method. [**Result**] (1) The relative electrical conductivity of the 51 *C. praecox* cultivars all showed an S-shaped curve, with their semi-lethal temperatures (LT_{50}) ranging from −28.71 to −17.59 ℃. Five highly cold-tolerant cultivars (C25, C27, C33, C39, C51) and five low-temperature-sensitive cultivars (C10, C11, C42, C46, C49) were screened for further measurement of cold-resistance physiological indices. (2) With decreasing treatment temperature, the relative electrolyte leakage and malondialdehyde (MDA) content of the 10 representative cultivars increased continuously, while the protective physiological indices, including peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities as well as soluble sugar (SS), soluble protein (SP) and proline contents (Pro), all increased first and then decreased. Compared with the low-temperature-sensitive cultivars, the highly cold-tolerant cultivars displayed slower membrane damage, higher peak values and a milder decline in the protective physiological indices. (3) The comprehensive evaluation showed that the cold hardiness of the 10 selected *C. praecox* cultivars, consisting of five highly cold-tolerant and five low-temperature-sensitive genotypes, ranked in descending order as follows: C27, C39, C25, C51, C33, C49, C46, C10, C42, C11. [**Conclusion**] Highly cold-tolerant *C. praecox* cultivars showed lower cell membrane damage, stronger antioxidant enzyme activity, and enhanced osmotic adjustment capacity. The highly cold-tolerant *C. praecox* cultivars C27, C39, C25, C51 and C33 screened in this study can serve as suitable germplasm for landscape application in cold northern regions, laying a critical germplasm foundation for breaking the popularization bottleneck of *C. praecox* in these areas.

Key words: *Chimonanthus praecox*; cold tolerance; semi-lethal temperature; breeding of improved varieties; comprehensive evaluation

我国北方地区冬季景观萧瑟、观赏植物种类单一匮乏，尤其缺乏冬季开花的观赏植物。蜡梅（*Chimonanthus praecox*）作为我国特有的传统名花，已有千年以上的栽培历史，以其独特的冬季开花习性和浓郁的花香而著称[1]。近年来已有如‘黄金枝’（*C. praecox* ‘Huangjin Zhi’）[2]、‘淡妆蝶舞’（*C. praecox* ‘Danzhuang Diewu’）[3]等 32 个优良新品种通过国家林业和草原局官方审定，种质创新结果显著。《蜡梅品种图志》[4]收录蜡梅品种 119 个，鄢陵地区资源调查亦记录品种 175 个，资源本底较为丰富[5]。但是，北方地区实际栽培应用的蜡梅品种较少，蜡梅的品种多样性和生态习性的优势在北方地区未能得到充分发挥。蜡梅不同品种间抗寒性的差异及其内在生理机制尚不明确，这已成为制约其在北方地理分布与推广潜力的关键因素。因此，系统解析蜡梅品种抗寒性差异的主要生理机制，对于突破其在北方栽培的地理限制、推进蜡梅种质资源保护及抗寒育种工作，具有重要的理论价值和实践指导意义。

低温胁迫可引发植物细胞膜损伤、渗透调节失衡及抗氧化系统紊乱等一系列生理响应，单一指标往往难以全面反映植物的抗寒能力。因此，综合多项生理生化指标进行分析也已成为当前研究的普遍趋势。目前，常见的抗寒评价指标包括相对电导率（relative electrical conductivity，REC）、半致死温度（semi-lethal temperature，LT_{50}）、渗透调节物质（可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等）、抗氧化酶（超氧化物歧化酶、过氧化物酶等）活性等。这些指标已广泛应用于梅花（*Prunus mume*）[6]、桃（*Prunus persica*）[7]、杏（*Armeniaca vulgaris*）[8]、葡萄（*Vitis vinifera*）[9]、梨（*Pyrus* spp.）[10]、苹果（*Malus domestica*）[11]等多种木本植物的抗寒性鉴定。对于大规模品种资源的初步筛选，基于 REC 数据拟合 Logistic 方程计算获得的 LT_{50}，因其兼具量化便捷性及结果准确性，已成为一种高效的核心初筛手段。刘贝贝等[12]采用此法评价了 80 个石榴（*Punica granatum*）品种的抗寒性；段美红等[13]据此鉴定了 10 组嫁接繁殖梅花的抗寒能力；秦倩等[14]和闫淑芳等[15]也分别采用该方法对 25 个新疆梨和 21 个卫矛属（*Euonymus*）植物进行了抗寒性评价。然而，要实现对抗寒机制的深入解析，则需在初筛基础上，对代表性材料开展多生理指标的综

合评价。曹建东等[16]通过对葡萄生理生化指标进行主成分分析，发现相对电导率（REC）、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、丙二醛（MDA）、游离脯氨酸（Pro）等可作为评价葡萄抗寒性的重要指标，并据此对各品种抗寒性进行综合评价。近年来，蜡梅抗寒性研究更多聚焦于功能基因的挖掘与表达分析[17−18]，而从生理水平对大样本品种进行系统比较与综合评价的研究仍相对薄弱。张昕欣等[19]对 3 个蜡梅品种的研究，虽初步揭示了 LT_{50} 与生理指标的关联性，并通过隶属函数法对品种抗寒性进行了综合评价，但受限于品种数量规模，其结果对于揭示蜡梅丰富种质资源所蕴含的抗寒性规律而言，代表性仍显不足。

基于以上研究现状，本研究以 51 个蜡梅品种 1 年生枝条为材料，通过可程式高低温试验箱模拟低温环境，进行梯度低温处理（−10 ℃、−16 ℃、−22 ℃、−28 ℃、−34 ℃），测定不同低温下的相对电导率（REC），并通过拟合 Logistic 方程计算半致死温度（LT_{50}），建立适用于蜡梅种质资源大规模初筛的标准化评价体系，初步筛选出高抗寒和低温敏感的代表品种，进一步测定其渗透调节（可溶性糖 SS、可溶性蛋白 SP、脯氨酸 Pro）、抗氧化酶（过氧化物歧化酶 SOD、过氧化物酶 POD）以及细胞膜受损程度（丙二醛 MDA）等相关抗寒生理指标，从不同维度系统解析这些生理指标在低温胁迫下的动态响应规律及品种间差异。最后，结合主成分分析与隶属函数法对各品种抗寒性进行综合评价，进而筛选出适宜北方寒冷地区生长的高抗寒性蜡梅种质。研究结果将弥补当前蜡梅抗寒性研究样本量不足、缺乏系统生理评价的短板，探明主要生理指标变化与蜡梅抗寒能力的内在联系，为蜡梅的抗寒良种选育、园林应用及区域推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与低温处理

供试材料为 51 份蜡梅品种（表 1），所有品种均在北京绿地养护服务中心蜡梅种质资源保存库中给予统一的生长环境和栽培管理。试验于 2024 年 12 月进行，此时植株处于休眠期，抗寒性已达到峰值，能够准确反映各品种的越冬能力。每个品种选取充分成熟、整齐均匀、粗度相近（直径 0.3 ~ 0.5 cm）的 1 年生枝条，洗涤干燥后将枝条剪成 10 ~ 15 cm 的枝段，每个品种枝段分成 6 份，每份 10 段，两端用保鲜膜封口，并用湿纱布包裹，以防止脱水。将枝条置于高低温交变试验箱（艾瑞斯，ASR-150 L）进行低温处理，设定 4 ℃ 作为对照温度，处理组温度分别为 −10 ℃、−16 ℃、−22 ℃、−28 ℃、−34 ℃。程序设定为以 4 ℃/h 的速率从 4 ℃ 降至目标温度，达到后恒温维持 12 h，随后以相同速率回升至 4 ℃，于室温下放置 2 h。待每一温度梯度处理结束后，立即从各

表 1 供试蜡梅品种

Tab. 1 *Chimonanthus praecox* tested cultivars

编号	品种名称	编号	品种名称	编号	品种名称
C1	‘白雪公主’ *C. praecox* ‘Baixue Gongzhu’	C18	‘鸿运’ *C. praecox* ‘Hongyun’	C35	‘玫瑰红心’ *C. praecox* ‘Meigui Hongxin’
C2	‘波皱红晕’ *C. praecox* ‘Bozhou Hongyun’	C19	‘黄玉球’ *C. praecox* ‘Huang Yuqiu’	C36	‘墨红’ *C. praecox* ‘Mohong’
C3	‘长被素心’ *C. praecox* ‘Changbei Suxin’	C20	‘金蓓’ *C. praecox* ‘Jinbei’	C37	‘墨荷’ *C. praecox* ‘Mohe’
C4	‘创美一号’ *C. praecox* ‘Chuangmei Yihao’	C21	‘卷瓣素心’ *C. praecox* ‘Juanban Suxin’	C38	‘轻舞飞扬’ *C. praecox* ‘Qingwu Feiyang’
C5	‘大花波皱’ *C. praecox* ‘Dahua Bozhou’	C22	‘金蝶’ *C. praecox* ‘Jindie’	C39	‘奇艳’ *C. praecox* ‘Qiyan’
C6	‘大花冬绿’ *C. praecox* ‘Dahua Donglv’	C23	‘金莲红玉’ *C. praecox* ‘Jinlian Hongyu’	C40	‘十月梅’ *C. praecox* ‘Shiyuemei’
C7	‘大花素心’ *C. praecox* ‘Dahua Suxin’	C24	‘卷帘金杯’ *C. praecox* ‘Juanlian Jinbei’	C41	‘檀香’ *C. praecox* ‘Tanxiang’
C8	‘大虎蹄’ *C. praecox* ‘Dahuti’	C25	‘金披风’ *C. praecox* ‘Jinpifeng’	C42	‘新科虎蹄’ *C. praecox* ‘Xinke Huti’
C9	‘淡妆蝶舞’ *C. praecox* ‘Danzhuang Diewu’	C26	‘金盘紫’ *C. praecox* ‘Jin Panzi’	C43	‘瑶池仙子’ *C. praecox* ‘Yaochi Xianzi’
C10	‘鹅黄霞冠’ *C. praecox* ‘Ehuang Xiaguan’	C27	‘菊素’ *C. praecox* ‘Jusu’	C44	‘鄢国晴雪’ *C. praecox* ‘Yanguo Qingxue’
C11	‘粉面含春’ *C. praecox* ‘Fenmian Hanchun’	C28	‘金屋藏娇’ *C. praecox* ‘Jinwu Cangjiao’	C45	‘豫红一号’ *C. praecox* ‘Yuhong Yihao’
C12	‘黄斑’ *C. praecox* ‘Huangban’	C29	‘金香红韵’ *C. praecox* ‘Jinxiang Hongyun’	C46	‘玉盘红润’ *C. praecox* ‘Yupan Hongrun’
C13	‘荷瓣檀香’ *C. praecox* ‘Heban Tanxiang’	C30	‘金焰’ *C. praecox* ‘Jinyan’	C47	‘玉碗藏红’ *C. praecox* ‘Yuwan Zanghong’
C14	‘黄金枝’ *C. praecox* ‘Huang Jinzhi’	C31	‘晶玉’ *C. praecox* ‘Jingyu’	C48	‘鄢玉’ *C. praecox* ‘Yanyu’
C15	‘黄蜡坨’ *C. praecox* ‘Huanglatuo’	C32	‘金晕波皱’ *C. praecox* ‘Jinyun Bozhou’	C49	‘扬州黄’ *C. praecox* ‘Yangzhou Huang’
C16	‘虎蹄’ *C. praecox* ‘Huti’	C33	‘口红’ *C. praecox* ‘Kouhong’	C50	‘舞袖’ *C. praecox* ‘Wu Xiu’
C17	‘红太阳’ *C. praecox* ‘Hong Taiyang’	C34	‘洛阳’ *C. praecox* ‘Luoyang’	C51	‘紫气东来’ *C. praecox* ‘Ziqi Donglai’

处理组中随机选取部分枝段作为样品，迅速放入液氮速冻，之后转移至−80 ℃ 保存，用于后续生理指标的测定。每个处理均设 3 次生物学重复。

1.2　研究方法

1.2.1　相对电导率和半致死温度初步筛选

1.2.1.1　相对电导率测定

相对电导率（REC）是反映细胞膜受损伤程度的重要生理指标。随着细胞膜受损程度加重，膜透性增大，细胞内电解质外渗增多，进而导致相对电导率升高。因此，本研究通过测定相对电导率，来评估不同低温处理条件下蜡梅枝条细胞膜的受损状况。相对电导率越高，细胞膜受损程度越高。具体测定方法如下。

将每个温度处理中取出的枝条切成 2 mm 的薄片，避开芽眼，称取 2 g 放置于 50 mL 离心管中，加入 30 mL 蒸馏水，震荡 30 min，并在室温下浸泡 12 h，用电导仪（OHAUS，ST3100C）测定初始电导率值 C_1，相应的对照只加蒸馏水，测定电导率 C_0，然后将样品置于沸水浴中煮沸 30 min，放置 12 h 后摇匀，测定细胞全部破坏后提取液的电导率 C_2，计算相对电导率。

$$\mathrm{REC} = (C_1 - C_0)/(C_2 - C_0) \times 100\%。$$

1.2.1.2　半致死温度的确定

半致死温度（LT_{50}）是衡量引起膜不可逆损伤的临界温度阈值，是评估不同品种抗寒性的重要指标，该值越低，抗寒性越强。以温度（x）为自变量，枝条的相对电导率（y）为因变量，通过 Logistic 方程对数据进行拟合。当 y 值达到 0.5 时所对应的温度即为 LT_{50}。具体的回归模型为[20]

$$Y=k/(1+ae^{bt})$$

式中：Y 为相对电导率，t 代表处理温度，k、a、b 为常数。由于本研究测定的相对电导率已扣除蒸馏水电导值（C_0），可直接表征细胞膜受损程度，其极限值为 100%，故 k 值为 100。LT_{50} 即为方程拐点，计算公式为

$$\mathrm{LT}_{50} = \frac{\ln a}{b}$$

依据 LT_{50} 值的结果，从 51 个品种中初步筛选 10 个代表性蜡梅品种（高抗寒性和低温敏感）用于后续抗寒生理指标的测定及综合分析，以进一步探究蜡梅品种抗寒性差异的主要生理机制。

1.2.2　抗寒生理指标测定

从细胞膜损伤程度（MDA）、渗透调节（Pro、SS、SP）和抗氧化酶（SOD、POD）3 个维度对上述初筛的 10 个代表性蜡梅品种进行生理指标测定，探究不同低温处理下不同蜡梅品种的生理响应差异。采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量[21]、采用 NBT 光化还原法测定超氧化物 SOD 活性[21]、采用愈创木酚法测定 POD 活性[21]、采用酸性茚三酮比色法测定 Pro 含量[21]、采用蒽酮比色法测定 SS 含量[21]、采用考马斯亮蓝 G-250 法测定 SP 含量[22]。

1.2.3　综合评价

采用 *Z*-Score 法对原始数据进行标准化，以特征值大于 1 或累计贡献率大于 85% 的准则提取能够涵盖原始数据中有关蜡梅抗寒性主要信息的主成分因子。利用隶属函数法[23−24]将标准化处理后的数据与主成分分析所得的各主成分综合指标系数进行加权计算，从而得出每个蜡梅品种不同主成分的综合指标得分值，计算对应的隶属函数值，结合各主成分的权重，最后计算得到各蜡梅品种的综合评价值，筛选优良抗寒品种。综合评价值越大，表明抗寒评价结果越好。

1.3　数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据统计分析，SPSS 软件进行差异显著性分析，检验水平为 $P = 0.05$，Origin 软件进行制图。

2　结果与分析

2.1　低温处理对不同蜡梅品种枝条相对电导率的影响

随着低温胁迫加剧，各蜡梅品种的相对电导率均呈现典型的“S”形增长模式（图 1）。不同温度梯度下，不同蜡梅品种的相对电导率升高的速率不同，反映出品种间抗寒性的分化（表 2）。

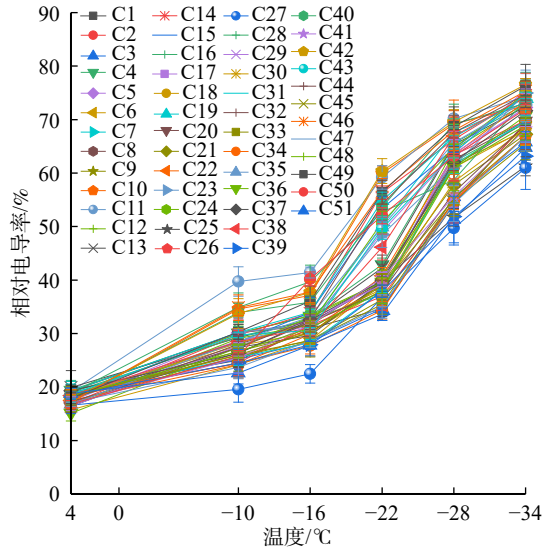


图 1　低温处理对不同蜡梅枝条相对电导率的影响

Fig. 1　Effect of low-temperature treatments on the relative electrical conductivity of branches of different *C. praecox* cultivars

表 2　51 份蜡梅品种半致死温度及抗寒性排名

Tab. 2　The semi-lethal temperature and cold tolerance ranking of 51 *C. praecox* cultivars

品种	回归方程	拟合度(R^2)	半致死温度(LT_{50})/℃	抗寒性排序
C1	$y = 100/(1 + 7.973e^{0.080\ 3x})$	0.933	−25.85	10
C2	$y = 100/(1 + 8.097e^{0.086\ 5x})$	0.949	−24.18	21
C3	$y = 100/(1 + 7.803e^{0.077\ 3x})$	0.936	−26.58	7
C4	$y = 100/(1 + 6.525e^{0.083\ 5x})$	0.940	−22.46	32
C5	$y = 100/(1 + 6.666e^{0.081\ 5x})$	0.916	−23.28	29
C6	$y = 100/(1 + 7.003e^{0.079\ 0x})$	0.923	−24.64	19
C7	$y = 100/(1 + 6.999e^{0.089\ 1x})$	0.960	−21.84	39
C8	$y = 100/(1 + 6.157e^{0.076\ 1x})$	0.928	−23.88	25
C9	$y = 100/(1 + 7.614e^{0.077\ 6x})$	0.947	−26.16	9
C10	$y = 100/(1 + 4.336e^{0.076\ 0x})$	0.928	−19.30	49
C11	$y = 100/(1 + 3.389e^{0.069\ 4x})$	0.947	−17.59	51
C12	$y = 100/(1 + 6.599e^{0.082\ 3x})$	0.919	−22.93	30
C13	$y = 100/(1 + 6.820e^{0.084\ 3x})$	0.941	−22.77	31
C14	$y = 100/(1 + 6.163e^{0.086\ 9x})$	0.964	−20.93	44
C15	$y = 100/(1 + 6.577e^{0.087\ 5x})$	0.982	−21.53	41
C16	$y = 100/(1 + 6.373e^{0.076\ 8x})$	0.905	−24.11	22
C17	$y = 100/(1 + 7.378e^{0.090\ 5x})$	0.971	−22.08	36
C18	$y = 100/(1 + 8.566e^{0.086\ 1x})$	0.963	−24.95	16
C19	$y = 100/(1 + 6.047e^{0.085\ 9x})$	0.967	−20.95	43
C20	$y = 100/(1 + 6.824e^{0.080\ 3x})$	0.939	−23.92	23
C21	$y = 100/(1 + 6.973e^{0.076\ 9x})$	0.959	−25.25	13
C22	$y = 100/(1 + 9.560e^{0.095\ 3x})$	0.969	−23.69	27
C23	$y = 100/(1 + 6.620e^{0.084\ 9x})$	0.958	−22.26	33
C24	$y = 100/(1 + 7.015e^{0.089\ 2x})$	0.968	−21.84	38
C25	$y = 100/(1 + 5.697e^{0.063\ 3x})$	0.970	−27.49	3
C26	$y = 100/(1 + 7.854e^{0.080\ 6x})$	0.961	−25.57	11
C27	$y = 100/(1 + 10.655e^{0.082\ 4x})$	0.978	−28.71	1
C28	$y = 100/(1 + 4.077e^{0.067\ 9x})$	0.967	−20.70	45
C29	$y = 100/(1 + 7.391e^{0.085\ 3x})$	0.937	−23.45	28
C30	$y = 100/(1 + 6.441e^{0.075\ 0x})$	0.941	−24.84	17
C31	$y = 100/(1 + 8.575e^{0.086\ 9x})$	0.939	−24.73	18
C32	$y = 100/(1 + 7.027e^{0.077\ 6x})$	0.955	−25.13	15
C33	$y = 100/(1 + 7.296e^{0.074\ 7x})$	0.938	−26.60	5
C34	$y = 100/(1 + 8.478e^{0.080\ 4x})$	0.940	−26.59	6
C35	$y = 100/(1 + 6.736e^{0.087\ 1x})$	0.977	−21.90	37
C36	$y = 100/(1 + 6.932e^{0.081\ 0x})$	0.953	−23.90	24
C37	$y = 100/(1 + 7.652e^{0.085\ 7x})$	0.959	−23.75	26
C38	$y = 100/(1 + 7.569e^{0.091\ 0x})$	0.955	−22.24	34
C39	$y = 100/(1 + 7.577e^{0.072\ 6x})$	0.943	−27.89	2
C40	$y = 100/(1 + 4.899e^{0.078\ 6x})$	0.946	−20.22	46
C41	$y = 100/(1 + 7.107e^{0.077\ 8x})$	0.981	−25.21	14
C42	$y = 100/(1 + 4.949e^{0.084\ 1x})$	0.959	−19.02	50
C43	$y = 100/(1 + 7.001e^{0.088\ 1x})$	0.956	−22.09	35
C44	$y = 100/(1 + 7.300e^{0.092\ 9x})$	0.972	−21.40	42
C45	$y = 100/(1 + 7.297e^{0.078\ 1x})$	0.965	−25.45	12
C46	$y = 100/(1 + 4.643e^{0.078\ 9x})$	0.967	−19.46	48
C47	$y = 100/(1 + 8.475e^{0.080\ 6x})$	0.956	−26.51	8
C48	$y = 100/(1 + 7.353e^{0.081\ 1x})$	0.941	−24.60	20
C49	$y = 100/(1 + 6.081e^{0.089\ 4x})$	0.978	−20.19	47
C50	$y = 100/(1 + 5.984e^{0.082\ 3x})$	0.991	−21.74	40
C51	$y = 100/(1 + 8.343e^{0.078\ 1x})$	0.985	−27.16	4

依据相对电导率的变化特征，可将供试的 51 个品种划分为不同的响应类型。部分品种在整个低温处理过程中表现出较强的细胞膜稳定性，如 C27、C39、C25 等。在−22 ~ 4 ℃ 的范围内，这些品种的枝条受冻害程度较轻，相对电导率呈缓慢增长趋势，表明细胞膜系统在此阶段保持相对完整；直至温度降至−28 ℃ 时，其相对电导率才开始达到较高水平。这一变化规律表明，这些品种能够耐受更低的低温，细胞膜受损阈值较低，可归类为高抗寒性品种。

相比之下，另一部分品种对低温胁迫更为敏感，细胞膜损伤出现得更早且更为剧烈，如 C42、C46、C49 等。在−16 ~ 4 ℃ 的处理阶段，其相对电导率增幅尚属平缓；但当温度降至 −28 ~ −16 ℃ 区间时，相对电导率即进入快速增长期，细胞膜损伤迅速加剧。其中，在−22 ℃ 时，上述品种的相对电导率已达到较高水平；至−28 ℃ 时，其相对电导率已普遍达到或接近 70%，标志着细胞膜系统受损严重，电解质大量外渗，这些品种被界定为低温敏感品种。

此外，还存在一部分中等抗寒性品种，如 C8、C22、C37 等。其相对电导率变化趋势介于上述两类之间：在−22 ~ −16 ℃ 区间开始出现明显增长，但增速缓于低温敏感品种；至−28 ℃ 时，其相对电导率虽显著升高，但仍低于敏感品种的 70% 水平，表现出中等程度的细胞膜损伤。

2.2　Logistic 方程的拟合及半致死温度的确定

51 个蜡梅品种的 LT_{50} 在−28.71 ~ −17.59 ℃ 之间，且各品种的 Logistic 方程拟合度（R^2）都在 0.9 以上，表明模型可信度较高，据此计算所得的 LT_{50} 真实可靠（表 2）。根据 LT_{50} 越低，抗寒性越强的原则，依据 LT_{50} 值的结果，筛选出 10 个代表性蜡梅品种，包括 LT_{50} 值排名靠前的高抗寒性品种 C25、C27、C33、C39、C51，以及排名靠后的温度敏感品种 C10、C11、C42、C46、C49，用于后续进一步探究低温胁迫下不同蜡梅品种的生理抗寒指标响应差异及综合分析。

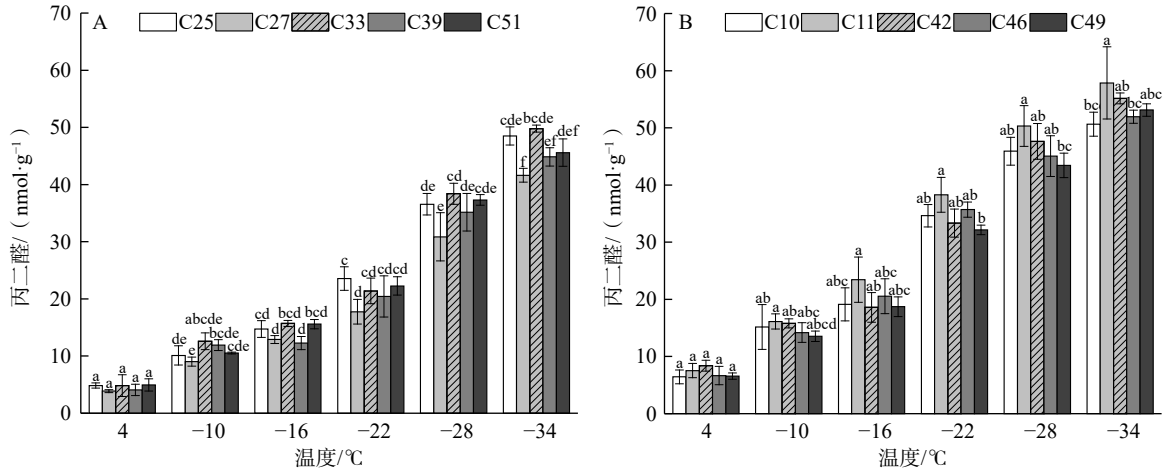
2.3　低温处理对蜡梅枝条不同生理指标的影响

2.3.1　低温处理对蜡梅枝条丙二醛含量的影响

低温处理对不同蜡梅品种一年生枝条的丙二醛（MDA）含量影响见图 2。MDA 作为膜脂过氧化的终产物，其积累量反映了细胞膜的受损程度。在不同低温胁迫条件下，10 个代表性蜡梅品种的 MDA 含量均随低温胁迫的加剧而呈上升趋势，且在各低温处理下均高于对照水平。从品种间比较来看，在各温度处理下，高抗寒品种的 MDA 含量均显著低于低温敏感品种，表明高抗寒品种的膜脂过氧化程度整体较轻。

高抗寒品种枝条（图 2A）在−22 ~ 4 ℃ 处理的 MDA 含量维持在相对较低的水平，增幅较缓。表明此时细胞内膜脂过氧化的终产物较少，推测此时抗氧化酶活性较高，可及时清除活性氧自由基，进而减轻低温对细胞膜造成的损伤。当温度降至−34 ~ −22 ℃ 范围时，其 MDA 含量增幅明显增大，在−28 ℃ 时较 −22 ℃ 升高了 55.25% ~ 79.40%。表明此时膜脂过氧化作用加剧，细胞膜系统受损程度加重。

低温敏感品种枝条（图 2B）在−16 ~ 4 ℃ 处理时，其 MDA 含量也较低且增幅较为平缓；当温度降低至−22 ~ −16 ℃ 范围时，蜡梅枝条 MDA 含量急剧上升，在−22 ℃ 时较−16 ℃ 上升了 63.30% ~ 80.90%，达到最大增幅，表明此时为抗寒敏感期。在随后的低温（如−34 ~ −22 ℃）处理下，MDA 含量继续升高，但增幅趋于稳定，表明膜系统可能遭受了严重且持续的损伤。



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。不同小写字母表示同一低温处理下不同品种间差异显著（$p < 0.05$）。下同。

图 2　低温处理对不同蜡梅品种丙二醛含量的影响

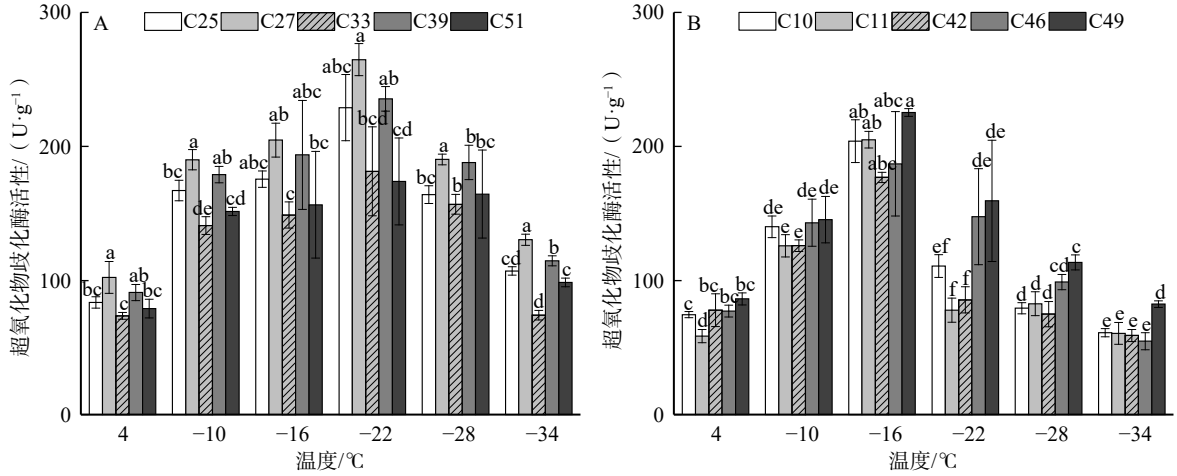
Fig. 2　Effect of low-temperature treatments on malondialdehyde content in different *C. praecox* cultivars

2.3.2 低温处理对抗氧化酶活性的影响

不同低温胁迫下蜡梅枝条过氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的变化如图 3 和图 4 所示。在低温处理过程中，10 个代表性蜡梅品种枝条的 SOD 和 POD 活性均呈现先升后降的趋势，高抗寒性品种的 SOD 和 POD 活性在大多低温梯度处理下整体上要高于温度敏感品种，其中 POD 活性在两品种中的差幅更大，且高抗寒性品种(−22 ℃)的 SOD 和 POD 活性峰值对应温度要低于温度敏感品种(−16 ℃)，表明高抗寒品种的抗氧化系统能够在更低的温度下被激活，其对低温的耐受范围和耐受能力更强，这进一步从抗氧化酶层面上说明了高抗寒性品种对低温的耐受能力和耐受范围要强于温度敏感品种。

具体来说，SOD 和 POD 在高抗寒品种中表现出相似的趋势(图 3A，图 4A)：在−10 ℃ 时均快速增长，表明胁迫初期能够迅速启动抗氧化防御；在−16 ~ −10 ℃ 区间增幅趋缓，进入平稳适应期；在−22 ℃ 达到峰值后开始下降。二者的不同之处在于，POD 活性在−28 ℃ 时的降幅(4.48% ~ 15.69%)明显小于 SOD(5.44% ~ 28.34%)，且 POD 在−22 ~ −10 ℃ 区间持续保持较稳定的增长，反映出高抗寒品种的 POD 系统可能在更宽的温度范围内维持活性，其抗氧化防御的稳定性更强。

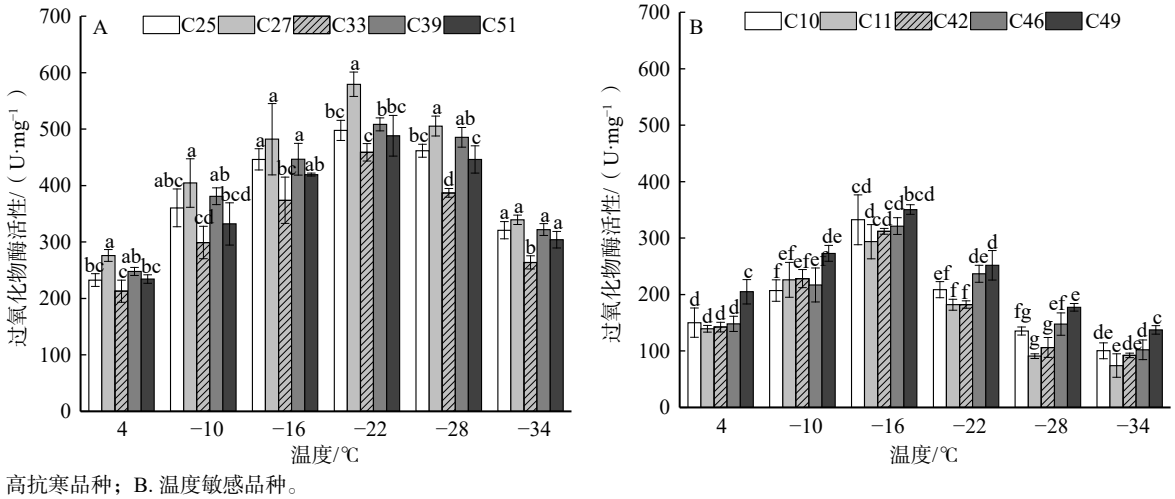
低温敏感品种枝条(图 3B、4B)的 SOD 和 POD 活性变化同样呈现先升后降的趋势，但其峰值温度较高(−16 ℃)，且达到峰值后活性下降更为迅速。SOD 在−10 ℃ 时快速增长，在−16 ℃ 达到峰值后，于−22 ℃ 时较峰值下降 21.11% ~ 62.01%；POD 同样在−16 ℃ 达到峰值，随后在−22 ℃ 时较峰值下降 26.34% ~ 41.58%，降幅均明显大于高抗寒品种。这表明低温敏感品种的抗氧化系统激活阈值较高，对更低温度胁迫的响应能力有限；一旦温度低于其耐受阈值，酶系统迅速受损，活性氧清除能力大幅下降，



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。

图 3 低温处理对蜡梅枝条超氧化物歧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of low-temperature treatments on superoxide dismutase activity in different *C. praecox* cultivars



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。

图 4 低温处理对蜡梅枝条过氧化物酶活性的影响

Fig. 4 Effect of low-temperature treatments on peroxidase activity in different *C. praecox* cultivars

这也是其抗寒性较弱的重要生理原因。

综上所述，高抗寒品种通过更低的酶活性激活温度、更强的酶活性水平和更稳定的酶系统维持能力，构建了更高效的抗氧化防御体系，从而在低温胁迫下表现出更强的耐受能力。

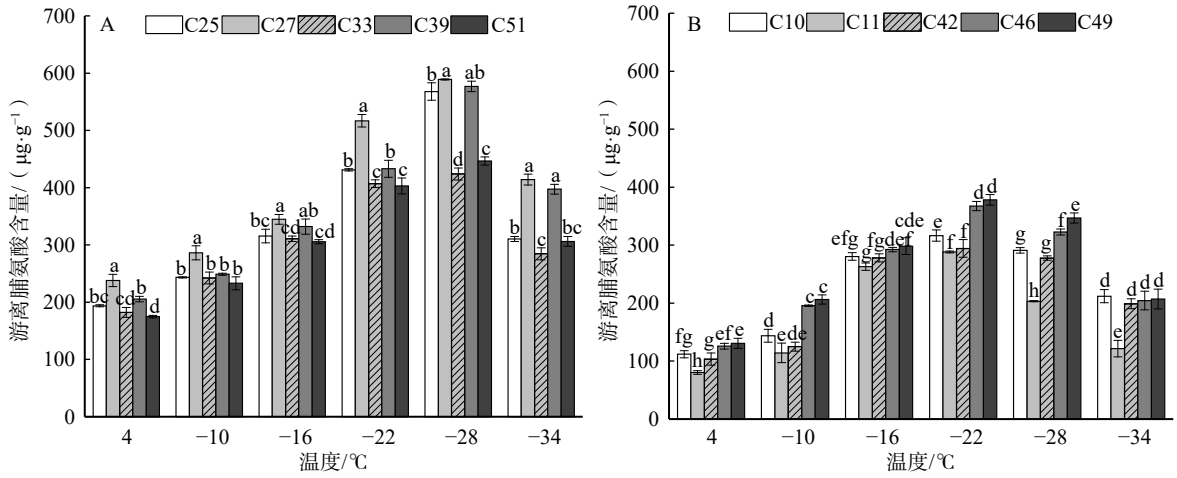
2.3.3　低温处理对蜡梅枝条脯氨酸含量的影响

随着处理温度的下降，10 个供试品种的游离脯氨酸（Pro）含量均呈现先升后降的趋势，但高抗寒品种 Pro 含量在各低温处理温度下均显著高于温度敏感品种，且峰值温度存在差异（图 5）。高抗寒品种在 −28 ~ −16 ℃ 时增幅最大，增幅为 36.32% ~ 70.83%；在−28 ℃ 时达到峰值，为 423.86 ~ 588.96 μg/g（图 5A）。此阶段大幅积累可能与渗透调节需求相关，随着低温胁迫加剧，为维持细胞渗透平衡并减轻膜系统受损，蜡梅枝条加快了 Pro 的积累。低温敏感品种在 −16 ~ −10 ℃ 期间含量快速升高，其增幅范围为 44.69% ~ 130.26%，−22 ℃ 达到峰值，其后 Pro 含量下降（图 5B）。峰值温度相较于高抗寒性品种提前，表明温度敏感品种低温胁迫下渗透调节能力可能有限。

2.3.4　低温处理对蜡梅枝条可溶性糖含量的影响

可溶性糖（SS）作为重要的渗透调节物质，可通过降低细胞冰点、维持膜稳定性来减轻低温损伤。10 个蜡梅品种枝条的 SS 含量随低温胁迫的加剧均呈先升后降的趋势，且都在−22 ℃ 时达到峰值，但变化幅度存在差异（图 6）。

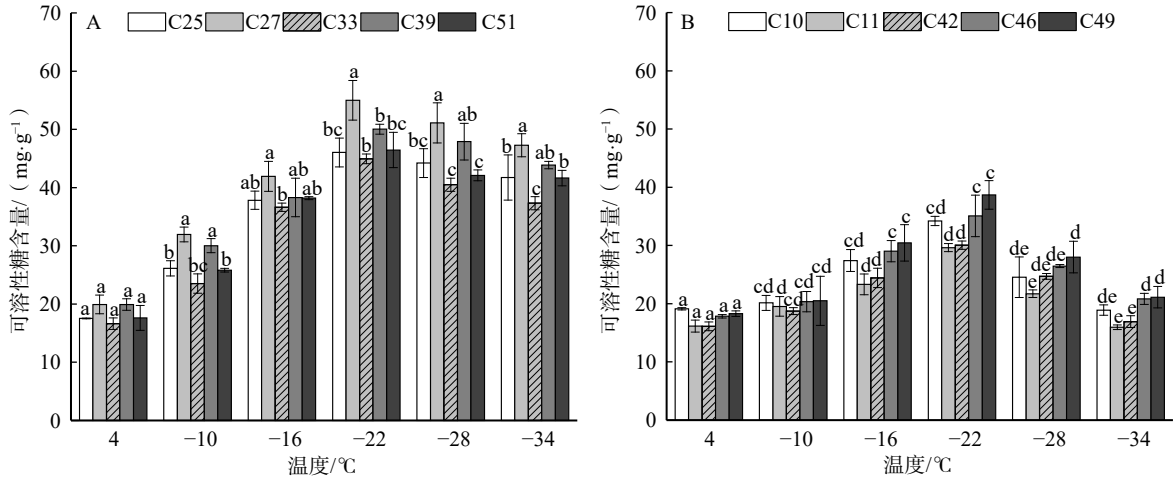
对照温度处理下，两品种的 SS 含量无明显差异，在−10 ~ 4 ℃ 处理期间，高抗寒品种枝条的 SS 含量出现显著上升，而低温敏感品种同期增幅不显著；在 −22 ℃ 时，高抗寒品种的 SS 含量较 4 ℃ 对照增长了 2.50 ~ 2.75 倍，为 44.93 ~ 54.98 mg/g；低温敏感品种较 4 ℃ 对照增长了 1.79 ~ 2.11 倍，为 29.63 ~ 38.67 mg/g。这说明在低温胁迫下，高抗寒品种可通过更快速地合成 SS 维持渗透平衡，抵抗和减轻低温伤害的能力更强。



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。

图 5　低温处理对蜡梅枝条游离脯氨酸含量的影响

Fig. 5　Effect of low-temperature treatments on proline content in different *C. praecox* cultivars



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。

图 6　低温处理对蜡梅枝条可溶性糖含量的影响

Fig. 6　Effect of low-temperature treatments on soluble sugar content in different *C. praecox* cultivars

在其后的低温处理下，SS 含量呈下降趋势。在−34 ℃ 时，高抗寒品种枝条的 SS 含量较峰值下降了 9.38% ~ 16.94%，而低温敏感品种枝条下降了 40.65% ~ 46.18%。低温敏感品种的 SS 含量的大幅下降，表明其代谢系统受损更为严重。

2.3.5 低温处理对蜡梅枝条可溶性蛋白含量的影响

低温处理对不同蜡梅枝条可溶性蛋白(SP)含量的影响如图 7 所示。10 个蜡梅代表性品种的 SP 含量总体均呈先升后降的趋势，但峰值温度有所差异。

具体来看，高抗寒品种枝条(图 7A)的 SP 含量在−16 ~ 4 ℃ 处理阶段显著增加，较 4 ℃ 对照增长 39.08% ~ 50.00%，表明在中等低温胁迫下，高抗寒品种已积极启动渗透调节机制；在−22 ~ −16 ℃ 处理阶段，SP 含量继续积累，增幅为 12.82% ~ 42.30%，并在−22 ℃ 达到峰值，为 0.31 ~ 0.44 mg/g，说明其能够在更低的温度下维持 SP 的持续合成，以应对加剧的低温胁迫；此后随着温度的降低，SP 含量下降，表明超过耐受极限后，蛋白质合成受阻或降解加速，渗透调节能力减弱。

低温敏感品种枝条(图 7B)的 SP 含量在−16 ~ 4 ℃ 处理阶段同样呈上升趋势，并于−16 ℃ 达到峰值，为 0.26 ~ 0.34 mg/g；此后随着低温胁迫的加剧，SP 含量呈下降趋势。峰值提前说明低温敏感品种对低温更为敏感，能通过提高渗透压以抵抗低温，但其调节能力有限。

2.3.6 低温胁迫下不同蜡梅品种生理指标的主成分分析

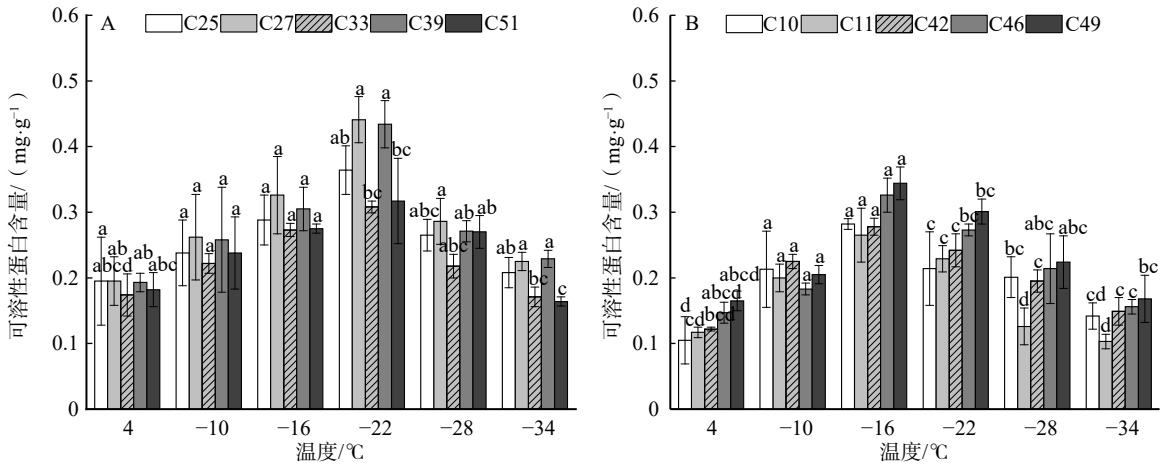
采用主成分分析对蜡梅品种的各项生理测定指标进行处理。依据累计贡献率大于 85% 的标准，共提取了 2 个主因子。新生成的 2 个主成分相互独立，分别用 CI1、CI2 表示，其特征值分别为 4.90 和 1.65，贡献率依次为 69.93% 和 23.38%，累计贡献率达 93.31%(表 3)。这表明所提取的主成分能够较好地涵盖原始数据中有关蜡梅抗寒性的主要信息，具有充分代表性。根据成分矩阵分析各指标在主成分上的荷载，结果显示：CI1 主要包括 X_1(REC)、X_2(MDA)、X_4(POD)、X_5(Pro)和 X_6(SS)；CI2 主要包括 X_3(SOD)和 X_7(Pro)。由此可见，通过主成分分析提取得到的 2 个综合指标能够有效替代原始的 7 个单项指标，充分反映其包含的信息，可用于蜡梅抗寒性的准确评价。

2.3.7 不同蜡梅品种抗寒性综合评价

基于标准化处理后的数据，结合主成分分析得到的各指标在主成分上的系数，分别计算每个蜡梅品种在 2 个主成分上的综合指标得分。在此基础上，进一步计算各品种在 2 个主成分上的隶属函数值，并根据主成分 1 和主成分 2 的权重(分别为 0.75 和 0.25)进行加权综合，得到各品种的综合评价值。该评价值的大小与品种的抗寒性强弱呈正相关，综合评价值越高，品种抗寒性越好。表 4 显示：10 个不同代表性蜡梅品种的抗寒性强弱依次表现为 C27 > C39 > C25 > C51 > C33 > C49 > C46 > C10 > C42 > C11，初步筛选结果中的高抗寒性品种均居于前 5，温度敏感品种均位于后 5，这从侧面也印证了综合评价结果的准确性。

3 讨 论

蜡梅作为我国特有的冬季开花名木，在北方地区园林应用中具有不可替代的观赏价值，但其在北方寒冷地区的推广应用长期受到抗寒性差异不清晰、适生品种缺乏系统筛选等问题的限制。因此，围绕 51 个蜡梅品种开展抗寒性鉴定与评价，不仅是对蜡



A. 高抗寒品种；B. 温度敏感品种。

图 7 低温处理对蜡梅枝条可溶性蛋白含量的影响

Fig. 7 Effect of low-temperature treatments on soluble protein content in different *C. praecox* cultivars

表 3　蜡梅品种各抗寒性生理指标的主成分分析

Tab. 3　Principal component analysis of physiological indicators related to cold tolerance in *C. praecox*

指标	CI1	CI2
X_1	−0.44	0.08
X_2	−0.44	0.05
X_3	−0.12	0.70
X_4	0.44	0.03
X_5	0.44	0.14
X_6	0.44	−0.04
X_7	0.12	0.70
特征值	4.90	1.65
贡献/%	69.93	23.38
累计贡献率/%	69.93	93.31

注：X_1. 相对电导率；X_2. 丙二醛含量；X_3. 超氧化物歧化酶活性；X_4. 超氧化物酶活性；X_5. 游离脯氨酸含量；X_6. 可溶性糖含量；X_7.可溶性蛋白含量。

梅种质资源耐寒特性的基础识别，更是为北方地区引种栽培、园林配置和抗寒育种提供科学依据的关键前提。本研究以 51 个蜡梅品种为对象，首先基于 REC−温度曲线 Logistic 拟合获得 LT_{50}，对不同品种抗寒能力进行定量比较，再从中筛选出代表性高抗寒和低温敏感品种，结合膜伤害、抗氧化防御和渗透调节等指标开展深入分析。

植物在低温胁迫下最先受损的部位是细胞膜系统，膜透性增大导致的电解质外渗可通过相对电导率（REC）反映，而由 Logistic 方程拟合的 LT_{50} 则能定量反映枝条受冻致死阈值[25−26]。本研究中 51 个蜡梅品种的 LT_{50} 介于−28.71～−17.59 ℃ 之间，品种间差异显著，表明蜡梅种质资源中蕴藏着丰富的抗寒遗传变异。这一变异范围与梅花的−36.04～−16.96 ℃[13]、桃的−26.65～−17.69 ℃[7]、葡萄的−29.153～−8.550 ℃[27]等木本植物相近，但品种间差异幅度更大，反映出蜡梅抗寒性鉴定的必要性和筛选潜力。

膜脂过氧化产物丙二醛（MDA）的积累是细胞膜系统受损的重要标志[28]。本研究中 10 个蜡梅品种的 MDA 含量均随温度下降显著上升，且低温敏感品种的积累量更高，与丁美云等[29]在蓝靛果忍冬（*Lonicera caerulea*）、范宗民等[30]在葡萄砧木上的研究结果一致。这表明膜系统稳定性是决定植物抗寒性强弱的关键因素之一。高抗寒品种能够将膜损伤控制在较低水平，推迟膜脂过氧化的急速加剧，从而为其他防御机制的启动赢得时间。为应对低温诱导的氧化胁迫，植物会激活抗氧化酶系统来清除过量活性氧（ROS）[31−32]。本研究中 SOD 和 POD 活性均呈“先升后降”模式，但两类品种的响应模式存在显著差异。高抗寒品种的酶活性峰值出现在−22 ℃，显著低于敏感品种的−16 ℃，且峰值活性更高、下降幅度更缓。这与张昕欣等[19]、王季姣等[27]等对多种木本植物的研究结果一致，说明高抗寒品种不仅能够在更低的温度下激活抗氧化系统，而且其酶系统的功能维持时间更长、稳定性更强。

渗透调节是植物缓解低温诱导脱水的重要机制。可溶性蛋白（SP）、可溶性糖（SS）和脯氨酸（Pro）通过调节胞内水势、降低冰点、稳定膜蛋白结构并直接清除部分 ROS，从而在抗寒中发挥关键作用[33−34]。本研究中 3 类渗透调节物质均呈现先升后降的规律，且在接近 LT_{50} 的温度区间达到峰值，表明蜡梅在致冻临界前启动了强烈的渗透保护反应，以对抗膜损伤引起的脱水。这表明高抗寒品种具有更强的渗透调节能力，能够在更宽的温度范围内维持细胞渗透势，从而减轻低温对细胞结构的损伤。

表 4　不同蜡梅品种的综合指标得分、隶数函数值和综合得分

Tab. 4　Values of diferent *C. praecox* varieties’comprehensive index score and comprehensive index score

品种	综合指标得分		隶属函数值		综合得分（C）	排名
	CI1	CI2	CI1	CI2		
C11	−2.90	−1.58	0	0	0	10
C25	1.62	0.98	0.70	0.64	0.685 0	3
C27	3.58	2.42	1	1	1	1
C33	0.68	−0.36	0.55	0.31	0.490 0	5
C39	2.08	1.96	0.77	0.89	0.800 0	2
C10	−2.12	−0.75	0.12	0.21	0.142 5	8
C42	−2.25	−0.9	0.10	0.17	0.117 5	9
C46	−1.69	−1.40	0.19	0.05	0.155 0	7
C49	−0.69	−0.70	0.34	0.22	0.310 0	6
C51	1.69	0.35	0.71	0.48	0.652 5	4

植物的抗寒性是由多途径协同调控的复杂性状，单一指标难以全面评价。主成分分析(PCA)与隶属函数法通过整合多维生理信息，能够提取反映寒害核心机制的关键因子，并生成更可靠的综合抗寒性排序，这已在葡萄[26]、玫瑰(*Rosa rugosa*)[35]、核桃(*Juglans regia*)[36]等材料中得到验证。本研究通过主成分分析提取了 2 个主成分，累计贡献率达 93.31%，有效整合了膜损伤(REC、MDA)、抗氧化(SOD、POD)和渗透调节(Pro、SS、SP)3 类指标的信息。基于隶属函数法的综合评价结果显示，10 个代表性品种的抗寒性强弱依次为 C27 > C39 > C25 > C51 > C33 > C49 > C46 > C10 > C42 > C11，与 LT_{50} 初筛结果高度吻合。这一结果验证了多指标综合评价方法在蜡梅抗寒性鉴定中的可靠性和必要性。

本研究首次对 51 个蜡梅品种进行了系统的抗寒性鉴定与生理机制解析，筛选出 C27、C39、C25、C51、C33 等 5 个高抗寒品种，可作为北方寒冷地区园林应用的优良种质。这些品种不仅 LT_{50} 值低，而且在膜稳定性、抗氧化能力和渗透调节等方面均表现出显著优势，具备在北方地区安全越冬的生理基础。这不仅弥补了以往蜡梅抗寒研究中样本量偏少、系统比较不足的局限，也为北方地区蜡梅的园林推广和抗寒育种提供了较为可靠的依据。然而，本研究主要基于一年生枝条在人工低温条件下的响应进行评价，虽然有利于控制试验条件并提高不同品种间的可比性，但与自然越冬环境中整株植株所面临的低温、风害、冻融交替及土壤水分变化等复合胁迫仍有差异。此外，本研究重点分析了生理生化响应，而对于不同品种抗寒性的遗传基础、分子调控网络及其与生理指标之间的内在关联尚缺乏进一步阐明。未来可结合田间越冬表现、多年份多地点验证以及分子生物学手段，对筛选出的高抗寒品种进行持续跟踪和深入解析，从而进一步提高蜡梅抗寒种质评价的准确性，并为北方地区蜡梅品种选育和精准推广提供更全面的理论支撑。

4 结　　论

本研究针对蜡梅品种抗寒性机制差异不明晰、制约北方推广的问题，以 51 个蜡梅品种为材料，通过模拟低温胁迫处理，系统测定了相对电导率、丙二醛、抗氧化酶活性及渗透调节物质等多项生理指标，明确了不同蜡梅品种的半致死温度范围，揭示了高抗寒与低温敏感品种在膜系统稳定性、抗氧化酶响应及渗透调节能力等方面的生理差异，并采用主成分分析与隶属函数法对各品种抗寒性进行了综合评价。主要研究结论如下。

(1)51 个蜡梅品种的半致死温度(LT_{50})介于 −28.71 ~ −17.59 ℃ 之间，品种间抗寒性差异显著。据此筛选出 5 个高抗寒品种(C25、C27、C33、C39、C51)和 5 个低温敏感品种(C10、C11、C42、C46、C49)，为后续生理机制的解析提供了代表性材料。

(2)随着低温胁迫加剧，各品种相对电导率(REC)和丙二醛(MDA)含量均持续上升，但高抗寒品种的上升幅度显著低于低温敏感品种。高抗寒品种在−22 ℃ 以上温度范围内膜损伤较轻，而低温敏感品种在−16 ℃ 即出现膜损伤急剧加剧，表明细胞膜稳定性是蜡梅品种抗寒性差异的关键决定因素。

(3)抗氧化酶(SOD、POD)活性在低温胁迫下呈先升后降趋势。高抗寒品种的酶活性峰值出现在−22 ℃，显著低于低温敏感品种的−16 ℃，且峰值活性更高、下降幅度更缓。其中 POD 活性在高抗寒品种中表现出更强的稳定性，表明高抗寒品种能够在更低的温度下维持更高效的活性氧清除能力。

(4)渗透调节物质(脯氨酸 Pro、可溶性糖 SS、可溶性蛋白 SP)含量均呈先升后降趋势。高抗寒品种的 Pro 峰值出现在−28 ℃，SS 和 SP 峰值出现在−22 ℃，而低温敏感品种的峰值均提前至−22 ℃ 或−16 ℃，且峰值含量显著低于高抗寒品种。这说明高抗寒品种具有更强的渗透调节能力，能够在更宽的温度范围内维持细胞渗透平衡。

(5)通过主成分分析和隶属函数法对 10 个代表性品种进行综合评价，抗寒性强弱依次为 C27 > C39 > C25 > C51 > C33 > C49 > C46 > C10 > C42 > C11，与 LT_{50} 初筛结果高度吻合，验证了多指标综合评价方法的可靠性。

研究结果为蜡梅抗寒种质筛选、良种选育及北方地区园林应用提供了系统的理论依据和优良种质资源。未来可进一步开展高抗寒品种的区域适应性试验，并深入挖掘其抗寒相关基因，为蜡梅抗寒分子育种奠定基础。

参 考 文 献

[1] 段美红, 李庆卫. 腊梅与蜡梅 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(增刊 1): 100−104.
Duan M H, Li Q W. A terminological differentiation between Chinese names of wintersweet“腊梅”and“蜡梅” [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(Suppl.1): 100−104.

[2] 郭林繁, 罗春燕, 李子航, 等. 蜡梅新品种‘黄金枝’[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(3): 304.
Guo L F, Luo C Y, Li Zi H, et al. A new cultivar of *Chimonanthus praecox* ‘Huangjin Zhi’ [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(3): 304.

[3] 王秀军, 李子航, 郭林繁, 等. 蜡梅新品种‘淡妆蝶舞’[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(5): 275.

Wang X J, Li Z H, Guo L F, et al. A new cultivar of *Chimonanthus praecox* ‘Danzhuang Diewu’ [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(5): 275.

[4] 卢健国. 蜡梅品种图志 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
Lu J G. An illustrated monograph of the wintersweet cultivars. Nanjing: Southeast University Press, 2018.

[5] 王静. 鄢陵地区蜡梅种质资源调查与遗传多样性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Wang J. Study on germplasm resources investigation and genetic diversity of *Chimonanthus praecox* in Yanling area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[6] 段美红, 李文广, 高祥利, 等. 三种梅花品种枝条抗寒性研究 [C]//中国园艺学会. 中国观赏园艺研究进展 2015 会议论文集. 北京: 中国林业出版社, 2015: 495−499.
Duan M H, Li W G, Gao X L, et al. Study on cold tolerance of three varieties of *Prunus mume* [C]// Chinese Society for Horticultural Science. Proceedings of the 2015 Annual Conference of the advances in Ornamental Horticulture of China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015: 495−499.

[7] 李杰, 田启航, 王雨, 等. 不同桃种质资源 1 年生幼树抗寒性评价 [J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(4): 22−31.
Li J, Tian Q H, Wang Y, et al. Evaluation of cold resistance in one-year-oldpeach germplasm seedlings [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2025, 43(4): 22−31.

[8] 康敏, 何炎红, 林涛, 等. 不同鲜食杏品种对低温胁迫的响应及其抗寒性评价 [J]. 北方园艺, 2025(9): 63−71.
Kang M, He Y H, Lin T, et al. Responses of different fresh apricot varieties to low temperature stress and comprehensive evaluation of their cold resistance [J]. Northern Horticulture, 2025(9): 63−71.

[9] 张西, 刘璇, 王勇, 等. 18 个无核葡萄品种在吐鲁番地区的抗寒性 [J]. 经济林研究, 2025, 43(2): 212−221.
Zhang X, Liu X, Wang Y, et al. Cold hardiness of 18 seedless grape varieties in Turpan region [J]. Non-wood Forest Research, 2025, 43(2): 212−221.

[10] 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.
Wang R Z, Zhang B, Guo T G, et al. Physiological responses to low temperature stress of five *Pyrus* spp. species and their cold resistance evaluation [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(2): 57−63.

[11] 刘兴禄, 王红平, 孙文泰, 等. 5 个砧木苹果枝条的抗寒性评价 [J]. 果树学报, 2021, 38(8): 1264−1274.
Liu X L, Wang H P, Sun W T, et al. Cold resistance evaluation of the shoots of 5 apple rootstocks [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(8): 1264−1274.

[12] 刘贝贝, 陈利娜, 牛娟, 等. 电导法协同 Logistic 方程评价 80 个石榴品种的抗寒性 [J]. 果树学报, 2017, 34(增刊): 127−133.
Liu B B, Chen L N, Niu J, et al. Comparison of cold resistance in 80 *Punica granatum* using relative electrical conductivity method and Logistic equation [J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(Suppl.): 127−133.

[13] 段美红, 杨益, 李庆卫. 电导法结合 Logistic 方程鉴定嫁接繁殖梅花的抗寒性 [J]. 中国园林, 2020, 36(增刊): 67−70.
Duan M H, Yang Y, Li Q W. Identification of cold resistance based on conductance method and logistic equation in the top-grafting of *Prunus mume* [J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(Suppl.): 67−70.

[14] 秦倩, 蒋艳, 木合塔尔·扎热, 等. 新疆的二十五份梨种质资源低温半致死温度比较及耐寒性评价 [J]. 北方园艺, 2024(10): 24−31.
Qin Q, Jiang Y, Muhetar Zhare, et al. Comparison of low temperature and half lethal temperature and evaluation of cold tolerance of 25 pear germplasm resources [J]. Northern Horticulture, 2024(10): 24−31.

[15] 闫淑芳, 代嵩华, 冯树香, 等. 卫矛属植物抗寒性综合评价 [J]. 中国农学通报, 2025, 41(16): 62−67.
Yan S F, Dai S H, Feng S X, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance in *Euonymus* plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(16): 62−67.

[16] 曹建东, 陈佰鸿, 王利军, 等. 葡萄抗寒性生理指标筛选及其评价 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(11): 2232−2239.
Cao J D, Chen B H, Wang L J, et al. Cold resistance indexes identification and comprehensive evaluation of grape varieties [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(11): 2232−2239.

[17] 郑仰辉. 蜡梅冷适应基因 Cpcor413pm1 的原核蛋白表达及拟南芥超表达的特性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
Zheng Y H. Prokaryotie expression of cold adapted gene Cpcor413pml from *Chimonanthus praecox* and its overexpression in *Arabidopsis thaliana*[D]. Chongqing: Southwest University. 2022.

[18] Lü Y, Xie M, Zhou S, et al. CpCAF1 from *Chimonanthus praecox* promotes flowering and low-temperature tolerance when expressed in *Arabidopsis thaliana* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(16): 12945.

[19] 张昕欣, 芦建国, 彭志杰. 低温胁迫对蜡梅几个抗逆生理指标的影响 [J]. 河北林果研究, 2012, 27(3): 309−312.
Zhang X X, Lu J G, Peng Z J. Effects of chilling stress on several physiological indices associated with stress resistance of *Chimonanthus praecox* [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2012, 27(3): 309−312.

[20] 范军强, 武军艳, 刘丽君, 等. 甘蓝型冬油菜气孔特性与抗寒性的关系 [J]. 中国农业科学, 2023, 56(4): 599−619.
Fan J Q, Wu J Y, Liu L J, et al. Correlation between stomatal characteristics and cold resistance of *Brassica napus* L. [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(4): 599−619.

[21] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao Junfeng. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[22] 史树德, 孙亚卿, 魏磊. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
Shi S D, Sun Y G, Wei L. Plant physiology experimental

guide[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[23] 苏小雨, 高桐梅, 张鹏钰, 等. 基于主成分分析及隶属函数法对芝麻苗期耐热性综合评价 [J]. 作物杂志, 2023(4): 52−59.
Su X Y, Gao T M, Zhang P Y, et al. Comprehensive evaluation of heat resistance of sesame seedlings based on principal component analysis and membership function ethod [J]. Crop Journal, 2023(4): 52−59.

[24] 黄思婕, 黄运鹏, 李冰, 等. 低温胁迫下八个澳洲坚果品种的抗寒性综合评价 [J]. 广西植物, 2025, 45(9): 1742−1734.
Huang S J, Huang Y P, Li B, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of 8 macadamia varieties under low temperature stress [J]. Guihaia, 2025, 45(9): 1742−1734.

[25] 努尔扎代姆·麦麦提, 连琼宇, 姜继元, 等. 电导法结合 Logistic 方程评价 6 个文冠果种质抗寒性 [J]. 现代农业科技, 2024(10): 80−83.
Nurzadam · Mamat, Lian Q Y, Jiang J Y, et al. Cold resistance evaluation of six *Xanthoceras sorbifolium* germplasms by conductivity method and logistic equation [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(10): 80−83.

[26] 丁思悦, 王雨婷, 赵佳琪, 等. 葡萄种质抗寒性鉴定及综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52(6): 106−120.
Ding S Y, Wang Y T, Zhao J Q, et al. Identification and comprehensive evaluation of cold resistance among grape germplasm [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(6): 106−120.

[27] 王季姣, 王世伟, 潘越, 等. 新疆天山北麓产区酿酒葡萄种质抗寒性鉴定及综合评价 [J]. 果树学报, 2024, 41(10): 1933−1946.
Wang J J, Wang S W, Pan Y, et al. Identification and comprehensive evaluation of cold resistance of winegrape germplasm from Northern Tianshan Region, Xinjiang [J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(10): 1933−1946.

[28] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines [J]. Plant Science, 2000, 151(1): 59−66.

[29] 丁美云, 张巍, 徐宜彬, 等. 不同低温环境对蓝靛果忍冬抗寒性生理代谢的影响 [J]. 北方园艺, 2025(12): 59−65.
Ding M Y, Zhang W, Xu Y B, et al. Effects of different low temperature environments on the cold resistance physiological metabolism of *Lonicera caerulea* [J]. Northern Horticulture, 2025(12): 59−65.

[30] 范宗民, 孙军利, 赵宝龙, 等. 不同砧木‘赤霞珠’葡萄枝条抗寒性比较 [J]. 果树学报, 2020, 37(2): 215−225.
Fan Z M, Sun J L, Zhao B L, et al. Evaluation of cold resistance of one-year shoots from‘Cabernet Sauvignon’grape vine grafted on different rootstocks [J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(2): 215−225.

[31] Aydin S S, Büyük İ, Aras S. Relationships among lipid peroxidation, SOD enzyme activity, and SOD gene expression profile in *Lycopersicum esculentum* L. exposed to cold stress [J]. Genetics and Molecular Research, 2013, 12(3): 3220−3229.

[32] Ghanati F, Morita A, Yokota H. Effects of aluminum on the growth of tea plant and activation of antioxidant System [J]. Plant and Soil, 2005, 276(1-2): 133−141.

[33] 张海燕, 樊军锋, 高建社, 等. 5 个欧美杨无性系抗寒性测定与评价 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(2): 37−43.
Zhang H Y, Fan J F, Gao J D, et al. Determination and evaluation of cold resistance of 5 *Populus* × *euramericana* clones [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2020, 40(2): 37−43.

[34] 刘钰玺, 陈佰鸿, 马宗桓, 等. 河西走廊酿酒葡萄砧木抗寒性综合评价 [J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 86−96.
Liu Y X, Chen B H, Ma Z H, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of grape rootstock in Hexi Corridor [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(6): 86−96.

[35] 赵婷, 蒋倩, 徐琼. 10 种玫瑰种质资源抗寒性评价 [J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(4): 160−168.
Zhao T, Jiang Q, Xu Q. Evaluation on cold resistance of 10 rose germplasms [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(4): 160−168.

[36] 李建, 王君桃, 史根生, 等. 核桃 11 个品种抗寒性综合评价 [J]. 园艺学报, 2026, 53(1): 174−184.
Li J, Wang J T, Shi G S, et al. Comprehensive evaluation on cold tolerance of eleven walnut cultivars [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2026, 53(1): 174−184.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 戴思兰）