



7种木莲属植物抗寒性评价及其生理机制

黄一波, 汪结明, 李瑞雪, 向言词, 宋禹, 颜玲玉

引用本文:

黄一波, 汪结明, 李瑞雪, 等. 7种木莲属植物抗寒性评价及其生理机制[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(5): 519–529.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4349>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自然越冬期姜花属植物生理指标变化及抗寒性评价

Changes in Physiological Characteristics of Cold Resistance of *Hedychium* and Evaluation during Natural Overwintering Period

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 509–518 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4333>

优质牧草旋扭山绿豆对低温胁迫的生理响应及其耐寒性快速鉴定

Physiological Response of High Quality Forage *Desmodium intortum* to Low Temperature Stress and Rapid Identification of Its Cold Tolerance

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 649–658 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4046>

硅对低温胁迫后檀香紫檀苗木生长和光合生理的影响

Effects of Silicon on Growth and Photosynthetic Physiology of Red Sandalwood Seedlings after Cold Stress

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 139–148 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3987>

NaCl胁迫对大黄龙船花生长及生理生化的影响

Growth and Physiological Indexes of *Ixora collinea* ‘Gillette How’ under NaCl Stress

热带亚热带植物学报. 2015(3): 262–267 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.03.005>

水淹对消落带水生苔藓植物优势种生理生态特征的影响及耐水淹评价

Effects of Waterlogging on Eco-physiological Characteristics of Aquatic Bryophytes and Their Comprehensive Evaluation of Water Tolerance in Hydro-fluctuation Belt

热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 65–72 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3626>

向下翻页, 浏览PDF全文

7 种木莲属植物抗寒性评价及其生理机制

黄一波, 汪结明*, 李瑞雪, 向言词, 宋禹, 颜玲玉

(湖南科技大学建筑与艺术设计学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为建立木莲属(*Manglietia*)植物的抗寒性综合评价体系, 对 7 种木莲属植物扦插苗进行低温胁迫处理, 测定叶片的抗寒性关键生理指标, 拟合 Logistic 方程计算低温半致死温度, 隶属函数法筛选抗寒性关键指标并综合评价。结果表明, 7 种木莲属植物的低温半致死温度依次为木莲 < 红花木莲 < 荷花木莲 < 巴东木莲 < 球果木莲 < 锥花木莲 < 粗枝木莲, 且与相对电导率显著正相关。7 种木莲属植物叶片的游离脯氨酸和可溶性蛋白含量及超氧化物酶、过氧化物酶活性均随温度降低呈先升后降的趋势, 而可溶性糖和丙二醛含量则不断增加、后趋于平稳。聚类分析结果表明 7 种木莲可分为 3 类, 木莲和红花木莲抗寒性较强; 荷花木莲、巴东木莲和球果木莲抗寒性中等; 粗枝木莲和锥花木莲抗寒性较弱。

关键词: 木莲属; 低温胁迫; 生理响应; 抗寒性

doi: 10.11926/jtsb.4349

Evaluation of Cold Resistance and Physiological Mechanism of Seven *Manglietia* Species

HUANG Yibo, WANG Jieming*, LI Ruixue, XIANG Yanci, SONG Yu, YAN Lingyu

(School of Architecture and Art Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: In order to establish a comprehensive evaluation system for cold resistance of *Manglietia* species, the key physiological indexes of cold tolerance in seven cutting seeding were determined under low temperature. The fitting logistic equation was used to calculate the semi-lethal temperature of low temperature (LT₅₀), and the key indexes of cold resistance were screened and evaluated by membership function method. The results showed that the LT₅₀ of seven *Manglietia* species were in the order of *M. fordiana* < *M. insignis* < *M. nucifera* < *M. patungensis* < *M. conifera* < *M. parvicula* < *M. crassipes*, which had positively significant correlation with relative conductivity. With the temperature decrease, the contents of free proline and soluble protein, activities of superoxide dismutase and superoxide dismutase in seven *Manglietia* species fall after rising, while contents of soluble sugar and malondialdehyde increasing and gradually leveling off. The cluster analysis showed that 7 *Manglietia* species could be divided into 3 groups, cold resistance of *Manglietia fordiana* and *M. insignis* were stronger, *M. nucifera*, *M. patungensis* and *M. conifera* were medium, *M. parvicula* and *M. crassipes* were weak.

Key words: *Manglietia*; Low temperature stress; Physiological response; Cold resistance

木莲属(*Manglietia*)是木兰科(Magnoliaceae)中珍贵的城市园林景观绿化树种^[1], 树姿婀娜, 花香宜人, 极具观赏性。因其喜温暖湿润气候, 主要分

布于我国热带和亚热带地区^[2-3], 北方地区秋冬季节寒冷、干燥, 落叶树种居多, 景观萧瑟, 园林绿化效果单一^[4]。因此, 筛选抗寒性较强的木莲属植

收稿日期: 2020-12-03 接受日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671628); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ6025, 2020JJ4294)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31671628); and the Natural Science Foundation of Hunan (Grant No. 2020JJ6025, 2020JJ4294).

作者简介: 黄一波(1994~), 男, 硕士研究生, 研究方向为植物景观。E-mail: 1246282053@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 364482609@qq.com

物, 研究耐寒相关生理指标, 对提高木莲属植物耐寒性、改善我国北方地区冬季常绿树种缺乏、园林景观单调萧条的现状等具有重要意义。

由于影响抗寒性的因素较多, 单一的生理指标无法全方位反映出植物抗寒性^[5-6], 因此评价植物抗寒性不仅需要选择适宜的指标, 更需要科学准确的评价方法。低温半致死温度(semi-lethal temperature of low temperature, LT₅₀)和其他相关生理指标常用于抗寒性评价^[7-8]。当前研究评价植物抗寒性常用的方法主要有隶属函数法、电导率法、聚类分析法等。其中隶属函数法能够全方位筛选出与抗寒性显著相关的关键指标, 揭示不同植物间抗寒性差别, 已广泛运用于木兰属(*Magnolia*)^[9-10]、含笑属(*Michelia*)^[11-12]和苹果属(*Malus*)^[13-14]等植物的抗寒性研究中。薛建辉等^[15]认为可溶性糖含量、POD 活性可以作为评价红花木莲抗寒性的重要指标。李刚^[16]报道低温胁迫下红花木莲的丙二醛(MDA)和叶绿素含量及 POD、SOD 活性均发生显著变化。虽然已对木莲属植物的抗寒性开展了较多研究, 但多关注于低温胁迫下部分生理指标的变化, 对抗寒性的评价仅用单项指标来鉴定, 因此难以全面、综合反映出木莲属植物的抗寒性^[17]。

为解析木莲属植物的抗寒性及其生理机制, 本研究以 7 种木莲属植物无性系盆栽苗为试验材料, 在低温胁迫下测定叶片相对电导率, 拟合 Logistic 方程计算植物的 LT₅₀, 对相关生理指标和半致死温度进行相关性分析, 运用隶属函数法进行抗寒性评价, 以期建立科学的木莲属植物抗寒性综合评价体系。

1 材料和方法

1.1 材料和处理

2018 年 4 月从湖南省长沙植物园选取母株树龄基本相同、长势相近的木莲(*Manglietia fordiana*)、红花木莲(*M. insignis*)、荷花木莲(*M. nucifera*)、巴东木莲(*M. patungensis*)、球果木莲(*M. conifera*)、锥花木莲(*M. parviflora*)和粗枝木莲(*M. crassipes*)共 7 种木莲属植物当年生侧枝进行扦插繁殖。2019 年 10 月每种植物选取生长基本一致的扦插苗各 54 株移至花盆, 并置于湖南科技大学生物园温室中培养 2 周, 温度 26℃, 湿度 70%, 光强 200 μmol/(m²·s), 光周期: 14 h 光照/12 h 黑暗。试验共设 6 个处理, 在

人工低温气候箱进行 5℃、0℃、-5℃、-10℃、-15℃和 -20℃低温胁迫 2 h^[7], 以 5℃为对照, 每处理 3 株, 3 次重复。选取当年生侧枝的成熟叶片, 测定电导率和相关生理指标。

1.2 方法

参照陈建勋等^[18]方法测定叶片相对电导率(REC)。参照陈刚等^[19]的方法测其他生理指标。MDA 含量用硫代巴比妥酸法, 游离脯氨酸(Pro)含量用酸性茚三酮法, SOD 活性用氮蓝四唑光化还原法, POD 活性用紫外吸收法, 可溶性糖(SS)含量用蒽酮比色法, 可溶性蛋白质(SP)含量用考马斯亮蓝 G-250 法, 重复 3 次, 取平均值。

1.3 数据处理和分析

参照朱海根等^[20]的方法计算抗寒隶属函数值(H)。呈正相关的公式 $H(X_i) = (X_i - X_{\max}) / (X_i - X_{\min})$; 呈负相关的公式 $H(X_i) = 1 - (X_i - X_{\max}) / (X_i - X_{\min})$, 式中, X_i 为指标测定值, X_{\min} 、 X_{\max} 为指标的最小、最大值。参照王飞雪等^[21]的方法, 依据拟合 Logistic 方程 $y = K / (1 + ae^{-bx})$ 计算拐点温度, 其中 y 为相对电导率, K 为电导率的饱和值(最大值为 100), x 为胁迫温度, a 、 b 为线性回归系数, 根据 $LT_{50} = \ln a / b$ 计算半致死温度。采用隶属函数法^[22-23]综合评价 7 种木莲属植物抗寒性强弱。通过 Excel 2019 和 SPSS 16.0 进行方差分析、标准差分析和聚类分析等。

2 结果和分析

2.1 相对电导率和半致死温度

致死性伤害出现前植物往往会有弹性修复过程, 当伤害超出植物忍受阈值时则发生不可逆变化。通过测量低温下 7 种木莲属叶片的相对电导率, 根据拟合的 Logistic 方程计算半致死温度, 可直接反映植物耐寒性。从图 1 可见, 7 树种的相对电导率(REC)总体随温度下降呈先下降后上升的“S”形曲线趋势。当温度大于 LT₅₀时, REC 缓慢升高, 低于 LT₅₀则迅速上升, 这表明伴随温度的下降, 叶片细胞膜受伤害程度加强, 膜透性也陆续加大。低温胁迫下, 锥花木莲的 REC 显著高于其余 6 树种。在 5℃~-5℃下, 除锥花木莲外, 其余 6 树种的 REC 变化不显著($P > 0.05$)。当温度低于 -5℃时, 锥花木莲、粗枝木莲的 REC 迅速上升, -10℃时, 荷花木

莲、球果木莲的 REC 也迅速升高且变化不显著 ($P > 0.05$); -15°C 时, 红花木莲、巴东木莲和木莲的 REC 迅速上升, 这说明 LT_{50} 出现越晚其抗寒性越强。

从表 1 可见, 7 树种的拟合 Logistic 方程相关系数 R^2 均在 0.8 以上。其中木莲、荷花木莲、球果木莲、锥花木莲、粗枝木莲的 REC 与 $5^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 处理 2 h 的 LT_{50} 间呈极显著正相关, 红花木莲与巴东

木莲则呈显著正相关性。7 种木莲属植物的 LT_{50} 为 $-17.02^{\circ}\text{C} \sim -5.767^{\circ}\text{C}$, 其中木莲和红花木莲的 LT_{50} 低于 -15°C , 荷花木莲、巴东木莲和球果木莲为 $-15^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$, 而锥花木莲和粗枝木莲分别为 -9.242°C 和 -5.767°C ; 可见, LT_{50} 依次为木莲 $<$ 红花木莲 $<$ 荷花木莲 $<$ 巴东木莲 $<$ 球果木莲 $<$ 锥花木莲 $<$ 粗枝木莲。

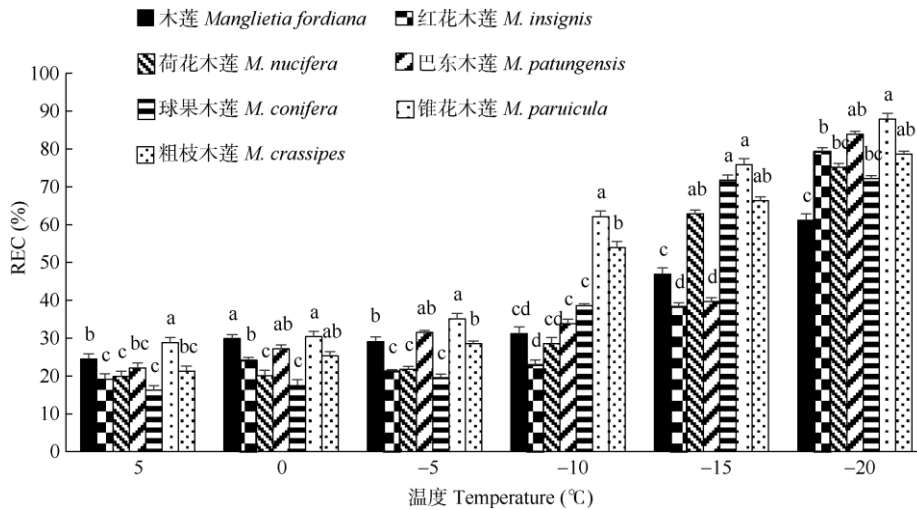


图 1 低温下 7 种木莲属植物叶片的相对电导率(REC)。柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

Fig. 1 Relative conductivity (REC) of 7 *Manglietia* species under low temperature stress. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Figures.

表 1 7 种木莲属植物叶片相对电导率的拟合方程和低温半致死温度(LT_{50})

Table 1 Logistics equation of the relative electrical conductivity and the semi-lethal temperature of 7 *Manglietia* species

植物 Species	Logistic 方程 Logistic equation	LT_{50} ($^{\circ}\text{C}$)	R^2
木莲 <i>Manglietia fordiana</i>	$y = 100 / (1 + 2.695e^{-0.058x})$	-17.02	0.911
红花木莲 <i>M. insignis</i>	$y = 100 / (1 + 4.04e^{-0.092x})$	-15.23	0.809
荷花木莲 <i>M. nucifera</i>	$y = 100 / (1 + 3.863e^{-0.106x})$	-12.72	0.909
巴东木莲 <i>M. patungensis</i>	$y = 100 / (1 + 3.308e^{-0.093x})$	-11.89	0.833
球果木莲 <i>M. conifera</i>	$y = 100 / (1 + 4.25e^{-0.122x})$	-11.84	0.939
锥花木莲 <i>M. parvicula</i>	$y = 100 / (1 + 2.789e^{-0.111x})$	-9.24	0.974
粗枝木莲 <i>M. crassipes</i>	$y = 100 / (1 + 2.029e^{-0.122x})$	-5.77	0.963

2.2 可溶性蛋白质含量

从图 2 可见, 5°C 时, 除粗枝木莲外其余 6 种植物叶片可溶性蛋白质(SP)含量变化不显著, 且随温度下降呈先升后降的变化趋势。红花木莲与木莲的 SP 含量最大值出现在 -15°C , 荷花木莲、巴东木莲、球果木莲的均为 -10°C , 而粗枝木莲、锥花木莲在 -5°C 达最大。SP 含量最大值依次为木莲 $>$ 红花木莲 $>$ 巴东木莲 $>$ 荷花木莲 $>$ 球果木莲 $>$ 锥花木莲 $>$ 粗枝木莲, 分别比 5°C 时增加 76.07%、70.45%、65.36%、

60.88%、57.05%、50.91% 和 45.91%, 说明 LT_{50} 越低 SP 含量达到峰值的时间越晚, SP 含量上升幅度越高。SP 含量最大值过后, LT_{50} 越低 SP 含量的降幅越大, 到 -20°C 时, SP 含量较最大值下降最多的是木莲, 下降了 3.01 mg/g, 其次为红花木莲, 下降了 2.73 mg/g, 下降最少的是粗枝木莲, 仅下降 0.67 mg/g。

2.3 可溶性糖含量分析

从图 3 可见, 随温度降低 7 种木莲属植物叶片

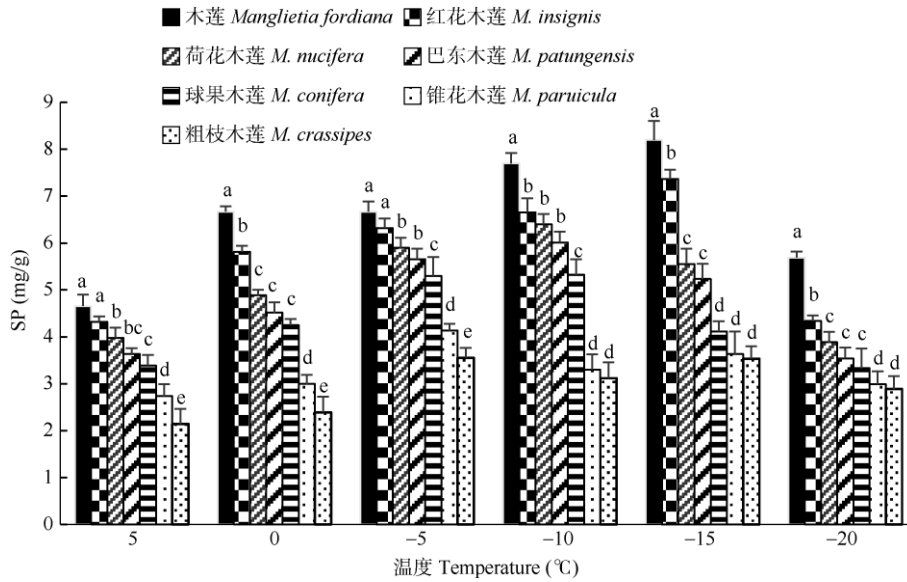


图 2 低温下 7 种木莲属植物叶片的可溶性蛋白质含量(SP)

Fig. 2 Soluble protein content (SP) in 7 *Manglietia* species under low temperature

的可溶性糖(SS)含量逐渐上升。5℃时, 7 种木莲属植物叶片的 SS 含量差异不显著($P>0.05$), 小于 5℃木莲叶片的 SS 含量均最高, 红花木莲次之, 而粗枝木莲叶片的均最低。-20℃时叶片的 SS 含量依次为木莲>红花木莲>荷花木莲>巴东木莲>球果木莲>锥花木莲>粗枝木莲, 分别比 5℃时增加了 450.87%、332.05%、270.12%、281.61%、235.34%、176.92%和 179.15%。可见, 低温下 LT_{50} 越低叶片的 SS 含量积累越多。

2.4 游离脯氨酸含量

从图 4 可见, 7 种木莲属植物叶片游离脯氨酸(Pro)含量随温度的降低呈先升后降的变化趋势。木莲和红花木莲叶片的 Pro 含量最大值出现在-15℃, 荷花木莲、巴东木莲、球果木莲的为-10℃, 锥花木莲和粗枝木莲的为-5℃。7 种木莲属植物叶片的 Pro 含量最大值依次为木莲>红花木莲>荷花木莲>巴东木莲>球果木莲>锥花木莲>粗枝木莲, 最大值分别比 5℃时增加了 388.40%、355.39%、295.16%、

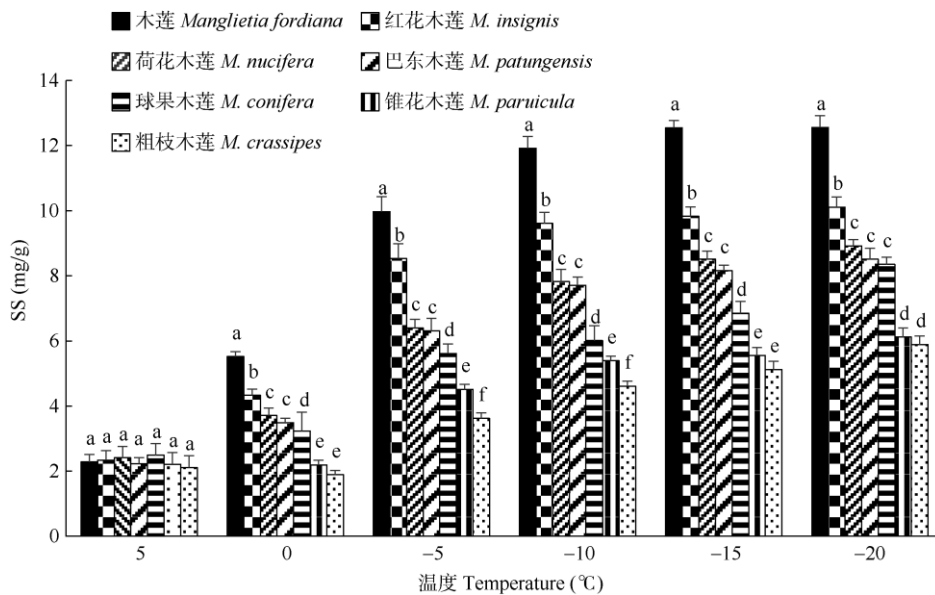


图 3 低温下 7 种木莲属植物叶片的可溶性糖含量(SS)

Fig. 3 Soluble sugar content (SS) of 7 *Manglietia* species under low temperature

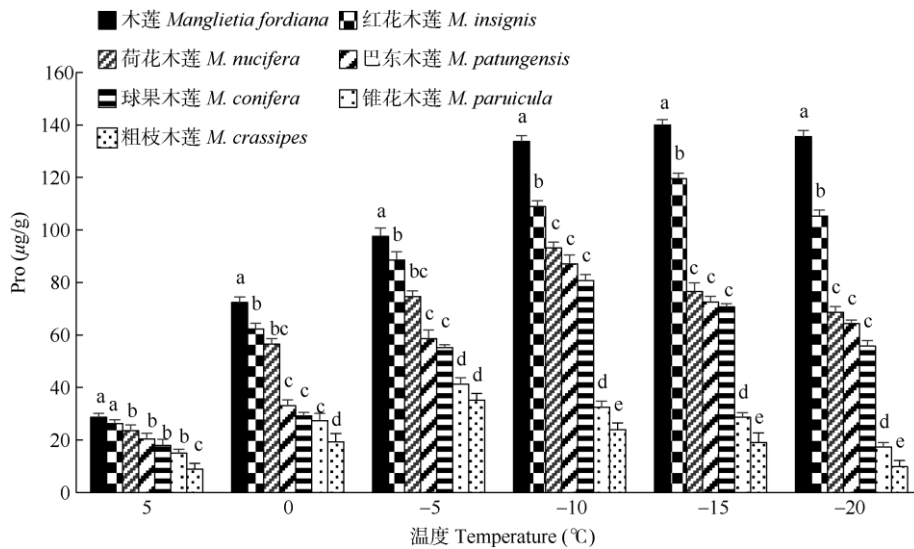


图 4 低温下 7 种木莲属植物叶片的游离脯氨酸含量(Pro)

Fig. 4 Free proline content (Pro) in leaves of 7 *Manglietia* species under low temperature

327.06%、349.03%、174.98%和 295.83%。此后，7 种木莲属植物叶片的 Pro 含量均下降，但仍高于对照。-20℃时的 Pro 含量依次为木莲>红花木莲>荷花木莲>巴东木莲>球果木莲>锥花木莲>粗枝木莲。

2.5 丙二醛含量

从图 5 可见，7 种木莲属植物叶片的丙二醛 (MDA)含量随温度降低总体呈先上升后下降的变化趋势。低温下，叶片的 MDA 含量与 LT₅₀ 呈正相

关关系，其中粗枝木莲叶片的 MDA 含量与温度呈负相关关系，在-10℃后趋于稳定。5℃时 7 种木莲属植物 MDA 含量差异不显著($P>0.05$)，在 5℃~-5℃ 时，除粗枝木莲外其余 6 树种叶片 MDA 含量缓慢上升，至-10℃时迅速增加，-15℃后趋于稳定。这表明低温胁迫下，LT₅₀ 越高的木莲属植物细胞膜脂过氧化水平越高，积累更多的 MDA。低温下叶片 MDA 含量依次为粗枝木莲>锥花木莲>球果木莲>巴东木莲>荷花木莲>红花木莲>木莲。

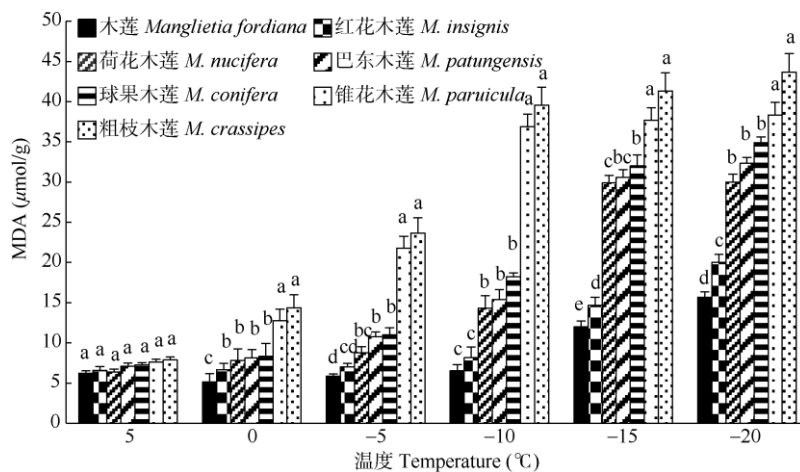


图 5 低温下 7 种木莲属植物叶片的丙二醛含量(MDA)

Fig. 5 Malondialdehyde content (MDA) in leaves of 7 *Manglietia* species under low temperature

2.6 超氧化物酶和过氧化物酶活性分析

从图 6 可见，7 种木莲属植物叶片的过氧化物酶(POD)与超氧化物酶(SOD)活性在低温胁迫下的

变化基本一致，均呈先升后降的趋势，接近 LT₅₀ 时叶片的 POD 和 SOD 活性显著下降($P<0.05$)。从 5℃ 降至 0℃，木莲和红花木莲叶片的 POD 和 SOD 活

性显著降低($P<0.05$); -5°C 时木莲和红花木莲的显著上升($P<0.05$), 而荷花木莲、巴东木莲、球果木莲叶片仍保持较高活性, 但锥花木莲、粗枝木莲显著下降($P<0.05$); -10°C 时, 木莲和红花木莲叶片的 SOD 活性比 5°C 时分别提高了 234.44%和 180.02%, POD 活性分别提高了 722.81%和 419.30%; 在 -20°C 时, 木莲叶片中的 SOD 活性较 5°C 时差异不显著($P>0.05$), 红花木莲、荷花木莲、巴东木莲、球果木莲、锥花木莲和粗枝木莲叶片中的 SOD 活性含量分别比 5°C 时下降了 32.97%、72.59%、73.80%、84.31%、96.40%和 98.26%; 木莲和红花木莲叶片中的 POD 活性比 5°C 时增加了 166.36%和 9.11%, 荷花木莲、巴东木莲、球果木莲、锥花木莲和粗枝木莲叶片中的 POD 活性含量比 5°C 时显著降低($P<0.05$).

2.7 抗寒性评价

相关性分析与抗寒关键生理指标选择

相关性分析表明(表 2), LT_{50} 与 REC 和 MDA 呈极显著

正相关($P<0.01$), 与 SP、SS 和 Pro 极显著负相关($P<0.01$), 而与 SOD 和 POD 的相关性不高, 故筛选出 REC、SP、SS、Pro 和 MDA 作为评估 7 种木莲属植物抗寒性的关键指标。REC 的检测相对其他生理指标更便捷, 可以根据 LT_{50} 直观反映出抗寒性强弱, 在实际应用中更广泛, SP、SS、PRO、MDA 则需要根据低温胁迫下的含量变化来判断植物抗寒性强弱。

抗寒性评价和聚类分析

隶属函数法通常用来评价综合抗寒性, 隶属函数值与抗寒性成正相关, 隶属函数值越大抗寒性越强, 反之抗寒性越弱。从表 3 可见, 用隶属函数法计算 REC、SP、SS、Pro、MDA 等 5 个关键指标的隶属函数值, 木莲的隶属函数值最大(0.736), 表明抗寒性最强, 其次是红花木莲(0.621), 是粗枝木莲的最小(0.335)抗寒性最弱, 木莲的平均隶属函数值是红花木莲的 220%。7 种木莲属植物的抗寒性依次为: 木莲 > 红花木莲 > 荷花木莲 > 巴东木莲 > 球果木莲 > 锥花木莲 > 粗枝木莲。

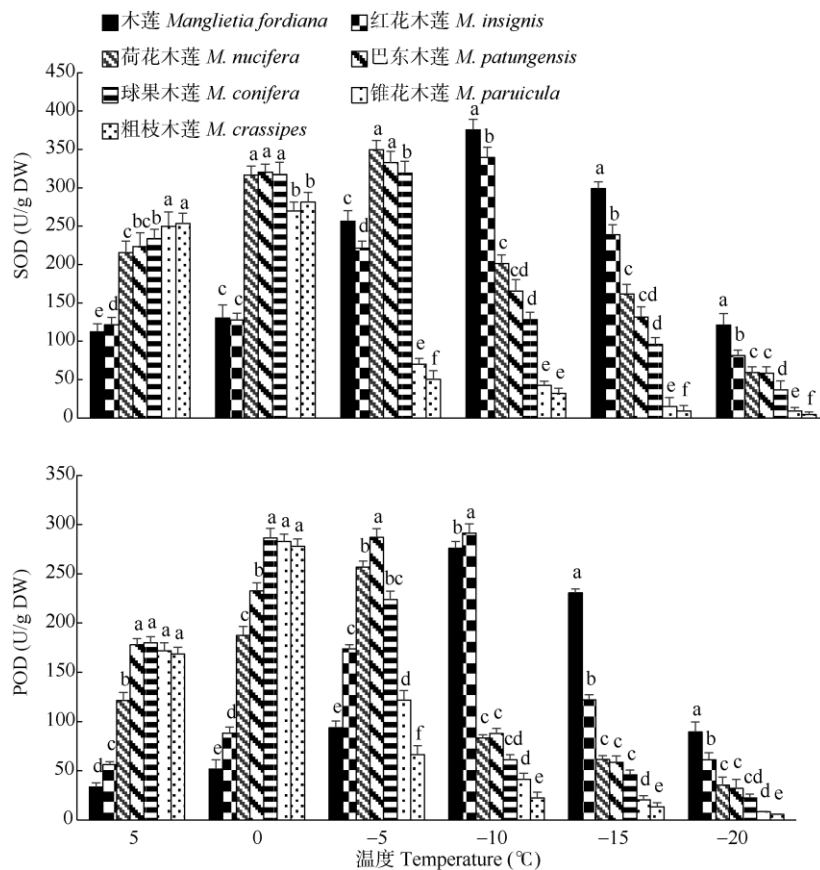


图 6 低温下 7 种木莲属植物叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性

Fig. 6 Activities of peroxidase (SOD) and superoxide dismutase (POD) in leaves of 7 *Manglietia* species under low temperature

表 2 7 种木莲属植物生理指标相关性矩阵

Table 2 Correlation matrix of 7 species of *Manglietia* physiological indexes

	LT ₅₀	REC	SP	SS	Pro	MDA	SOD	POD
LT ₅₀	1.000							
REC	0.924*	1.000						
SP	-0.993**	-0.918*	1.000					
SS	-0.953**	-0.763	0.963**	1.000				
Pro	-0.985**	-0.813*	0.986**	0.991**	1.000			
MDA	-0.986**	0.866*	-0.988**	-0.978**	-0.989**	1.000		
SOD	-0.712	-0.761	0.706	0.579	0.634	-0.599	1.000	
POD	-0.512	-0.625	0.563	0.305	0.363	-0.496	0.756	1.000

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. LT₅₀: 低温半致死温度; REC: 相对电导率; SP: 可溶性蛋白质; SS: 可溶性糖; Pro: 脯氨酸; MDA: 丙二醛; SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶。下表同。

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. LT₅₀: Semi-lethal temperature of low temperature; REC: Relative electrical conductivity; SP: Soluble protein; SS: Soluble sugar; Pro: Proline; MDA: Malondialdehyde; SOD: Superoxide dismutase; POD: Peroxidase. The same is following Table.

表 3 7 种木莲属植物抗寒性整体评价

Table 3 Comprehensive evaluation of cold resistance of 7 *Manglietia* species

植物 Species	REC	MDA	Pro	SP	SS	平均 Mean	排序 Rank
木莲 <i>Manglietia fordiana</i>	0.923	0.589	0.779	0.712	0.677	0.736	1
红花木莲 <i>M. insignis</i>	0.790	0.486	0.690	0.637	0.501	0.621	2
荷花木莲 <i>M. nucifera</i>	0.812	0.460	0.589	0.490	0.461	0.562	3
巴东木莲 <i>M. patungensis</i>	0.687	0.439	0.598	0.566	0.469	0.552	4
球果木莲 <i>M. conifera</i>	0.587	0.418	0.299	0.460	0.449	0.443	5
锥花木莲 <i>M. parvicula</i>	0.465	0.376	0.255	0.316	0.414	0.363	6
粗枝木莲 <i>M. crassipes</i>	0.431	0.321	0.238	0.295	0.391	0.335	7

基于平均隶属函数值进行聚类法分析(图 7),结果表明,7 种木莲属植物的综合抗寒性可分为 3 类,木莲和红花木莲归为第 1 类,综合抗寒性强;荷花木莲、巴东木莲和球果木莲归为第 2 类,综合抗寒性中等;锥花木莲和粗枝木莲归为第 3 类,综合抗寒性弱,这和用相对电导率计算出的 LT₅₀ 结果相似。

3 结论和讨论

细胞膜系统是植物受低温伤害的原发部位,植物受到低温胁迫时,胞内电解质渗出,电导率增大^[24]。因此,REC 可用于鉴定细胞及膜系统受损伤的程度^[25-26]。低温胁迫下,7 树种的 REC 总体随温度下降呈先下降后上升的“S”形曲线趋势,说明低温处理对细胞膜造成伤害,胞内电解质渗出,这与前人^[27-29]的研究结果一致。锥花木莲、粗枝木莲和荷花木莲、球果木莲以及红花木莲、巴东木莲、木莲分别在-5℃、-10℃、-15℃时电导率迅速上升,说

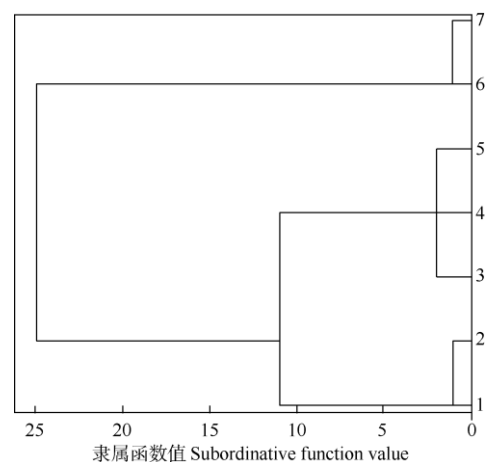


图 7 7 种木莲属植物抗寒性的聚类分析。1: 木莲; 2: 红花木莲; 3: 荷花木莲; 4: 巴东木莲; 5: 球果木莲; 6: 锥花木莲; 7: 粗枝木莲。

Fig. 7 Cluster analysis of cold resistance of 7 *Manglietia* species. 1: *M. fordiana*; 2: *M. insignis*; 3: *M. nucifera*; 4: *M. patungensis*; 5: *M. conifer*; 6: *M. parvicula*; 7: *M. crassipes*.

明膜脂物相已由液晶相变为凝胶相、膜系统被破坏程度严重。LT₅₀ 反映了植物抗寒性强弱和耐低温极

限, LT_{50} 越低植物抗寒性越强^[30-31]。本研究结果表明, 红花木莲和木莲的 LT_{50} 分别为 -15.23°C 和 -17.02°C , 有研究表明红花木莲抗寒性较强, LT_{50} 约为 -10°C ^[15-16]。而苏敬^[32]却认为红花木莲的 LT_{50} 约为 -5°C , 这可能与试材年龄和区域有关。

植物通过渗透调节物质来调节体内细胞液浓度、降低胞内渗透势, 增加抗寒性能力^[33-34]。可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)和可溶性蛋白(SP)是细胞的主要渗透调节物质, 在低温胁迫下可通过调节渗透物质的含量来缓解低温伤害, 渗透物质含量可以反映植物抗寒性^[35-36]。低温处理下, 7 种木莲属植物的 Pro 和 SP 含量呈先升后降的变化趋势, 而 SS 含量不断增加并趋于平稳, LT_{50} 最低的木莲在不同低温下 Pro、SP、SS 含量均为最高, 抗寒性也最强, 而 LT_{50} 最高的粗枝木莲均为最低, 抗寒性最弱, 这表明 LT_{50} 越低的树种, 渗透调节物质积累的最多, 抗寒性越强, 这与前人^[37-38]对广玉兰(*M. grandiflora*)的研究结论相似。

低温胁迫下, 植物细胞往往会发生脂膜过氧化, 丙二醛(MDA)作为脂膜氧化的最终产物之一, 其含量可以反映细胞膜系统在低温胁迫下的受伤害程度^[25]。随温度下降, 7 种木莲属植物叶片的 MDA 含量总体上不断升高, 达峰值后, 由于细胞冻伤死亡, 逐渐平缓。 LT_{50} 最高的粗枝木莲叶片的 MDA 含量始终保持最高水平, 抗寒性弱, 而 LT_{50} 最低的木莲叶片始终保持最低水平, 抗寒性强, 表明低温胁迫下木莲膜脂过氧化, 细胞膜系统受伤害程度低, 这与前人^[14,39]的研究结果一致。SOD 和 POD 是植物体内清除 H_2O_2 和自由基的重要抗氧化酶^[40-41], 本研究结果表明, 随温度的下降, 7 种木莲属植物叶片 SOD 和 POD 活性皆呈现出先升后降的趋势。在 5°C 和 0°C 下, 木莲和红花木莲叶片的 SOD 和 POD 活性远低于其余 5 种木莲属植物, 说明其具备抵制寒冷伤害的能力。随温度的下降, 植物体内的脂膜过氧化程度加剧, 锥花木莲、粗枝木莲和荷花木莲、球果木莲、巴东木莲的 SOD 和 POD 活性分别在 0°C 和 -5°C 时达最大, 而木莲和红花木莲叶片的 SOD 和 POD 活性迅速上升, 在 -10°C 达最大, 这表明木莲和红花木莲抗寒性最强。 -10°C 后木莲、红花木莲的 SOD 和 POD 活性皆下降, 这可能是保护酶系统遭到破坏, 致使植物体内清除活性氧自由基作用降低, 不能缓解低温胁迫带来的伤害。

木莲属植物种类繁多, 种间差异不明显, 导致

分类较为困难, 因此关于木莲属植物的分类研究常成为热点。本研究从抗寒性进行聚类分析, 结果表明, 木莲和红花木莲属于抗寒性较强的一类, 而荷花木莲、巴东木莲和球果木莲属于抗寒性中等的一类, 锥花木莲、粗枝木莲则属于抗寒性较弱的一类, 这从抗寒性上为木莲属植物提供了新的分类依据。孟爱平等^[42]对巴东木莲、红花木莲的核型分析结果不支持两者归为一类; 肖黎等^[43]的研究将木莲、红花木莲归为一类, 巴东木莲分为另一类, 这与本研究结果一致。而桑子阳等^[44]的研究将木莲、红花木莲和巴东木莲归为一类, 这与本研究结果不同, 可能是由于研究的物种与数量不同所致。

本研究基于隶属函数法筛选出 REC、SP、SS、Pro、MDA 等 5 个木莲属植物的抗寒性关键评价指标。基于隶属函数值的聚类分析法能快速区分抗寒性植物种类, 为抗寒性植物的初步筛选提供了有效途径, 同时从抗寒性分类角度为植物的传统分类方法提供了新的思路。此外, 筛选出的抗寒性强的植物对于南树北移、丰富北方园林植物景观具有重要实践价值。

参考文献

- XIONG H Y. Advances in embryology of endangered species of *Manglietia* [J]. *J Yangtze Univ (Nat Sci)*, 2017, 14(10): 43-45,55. doi: 10.3969/j.issn.1673-1409.2017.10.012.
熊海燕. 木莲属濒危植物胚胎学研究进展 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2017, 14(10): 43-45,55. doi: 10.3969/j.issn.1673-1409.2017.10.012.
- QI B Y, YIN Y L, YU C G, et al. Relationship between leaf anatomical structure and cold resistance of 8 *Michelia* species of Magnoliaceae [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(4): 150-153. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2013.04.057.
亓白岩, 殷云龙, 於朝广, 等. 木兰科含笑属 8 种植物叶片解剖结构性状与抗寒性的关系 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(4): 150-153. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2013.04.057.
- HE Z H. Effects of control measures on cold resistance of *Magnolia wufengensis* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 201: 5-7.
何著书. 几种调控措施对红花玉兰抗寒性的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 5-7.
- PAN H L. The construction of plant landscape in northern winter garden [J]. *Contemp Hort*, 2018(24): 71-72. doi: 10.3969/j.issn.1006-4958.2018.24.053.
潘红玲. 北方冬季园林植物景观的营造 [J]. *现代园艺*, 2018(24):

- 71–72. doi: 10.3969/j.issn.1006-4958.2018.24.053.
- [5] ZHANG H Y, FAN J F, ZHOU Y X, et al. Determination and evaluation on cold-resistance of 8 poplar clones [J]. J NW For Univ, 2020, 35(2): 87–93. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.02.12. 张海燕, 樊军锋, 周永学, 等. 8个白杨无性系抗寒性测定与评价 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 87–93. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.02.12.
- [6] SU J S, ZHANG F, LI P R, et al. Genetic variation and association mapping of waterlogging tolerance in *Chrysanthemum* [J]. Planta, 2016, 244(6): 1241–1252. doi: 10.1007/s00425-016-2583-6.
- [7] LI R X, JIN X L, HU X J, et al. Analysis and comprehensive evaluation on cold resistance of six varieties of *Michelia* [J]. Chin J Appl Ecol, 2017, 28(5): 1464–1472. doi: 10.13287/j.1001-9332.201705.039. 李瑞雪, 金晓玲, 胡希军, 等. 6种含笑属植物抗寒性分析与综合评价 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1464–1472. doi: 10.13287/j.1001-9332.201705.039.
- [8] SUN Y J, HE Y H, IRFAN A R, et al. Exogenous brassinolide enhances the growth and cold resistance of maize (*Zea mays* L.) seedlings under chilling stress [J]. Agronomy, 2020, 10(4): 488. doi: 10.3390/agronomy10040488.
- [9] LUO X M, CHENG M W, HAN W Y, et al. 10 species of Magnoliaceae: Seedling growth characteristics and resistance evaluation [J]. J Agric, 2020, 10(11): 72–77. doi: 10.11923/j.issn.2095-4050.cjas20190500024. 骆绪美, 程明伟, 韩文妍, 等. 10种木兰科植物苗期生长表现与抗性评价 [J]. 农学学报, 2020, 10(11): 72–77. doi: 10.11923/j.issn.2095-4050.cjas20190500024.
- [10] PEI W, LI P, PEI H C, et al. Comparative analysis of physiological index related to cold resistance of nine Magnoliaceae plants under natural and artificial low temperature conditions [J]. J Henan Agric Sci, 2014, 43(4): 101–105. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.04.022. 裴文, 李鹏, 裴海潮, 等. 低温条件下9种木兰科植物抗寒性研究 [J]. 河南农业科学, 2014, 43(4): 101–105. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2014.04.022.
- [11] TAN Y Y, JIN X X, YU Q Y, et al. Screening of leaf cold-resistant structural indexes and cold-resistance evaluation of five *Michelia* species [J]. Guihaia, 2021, 41(8): 1296–1305. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201908001. 谭殷殷, 金晓玲, 余秋岫, 等. 五种含笑属植物叶片抗寒结构指标的筛选与抗寒性评价 [J]. 广西植物, 2021, 41(8): 1296–1305. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201908001.
- [12] LI R X, JIN X L, HU X J, et al. Physiological responses and differential expression of cold resistance-related genes of six varieties of Magnoliaceae under low temperature stress [J]. Acta Ecol Sin, 2019, 39(8): 2883–2898. doi: 10.5846/stxb201801230185. 李瑞雪, 金晓玲, 胡希军, 等. 低温胁迫下6种木兰科植物的生理响应及抗寒相关基因差异表达 [J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2883–2898. doi: 10.5846/stxb201801230185.
- [13] ADILI YIKIMU, BAHARGULI AYROUPU, HARKEN YEERJIANG, et al. Research on physiological response to low temperature stress of different varieties of North American *Begonia* [J]. SW China J Agric Sci, 2018, 31(4): 687–692. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2018.4.008. 阿地力·衣克木, 巴哈尔古丽·阿尤甫, 哈尔肯·叶尔江, 等. 不同北美海棠品种对低温胁迫的生理响应 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 687–692. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2018.4.008.
- [14] WANG H P, DONG T, LIU X L, et al. A study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for branches of five apple rootstock cultivars [J]. J Fruit Sci, 2020, 37(4): 495–501. doi: 10.13925/j.cnki.gsx.20190383. 王红平, 董铁, 刘兴禄, 等. 5个苹果砧木品种枝条的低温半致死温度及耐寒性评价 [J]. 果树学报, 2020, 37(4): 495–501. doi: 10.13925/j.cnki.gsx.20190383.
- [15] XUE J H, SU J, LIU J G, et al. Physiological responses of five evergreen broadleaved ornamental tree species to low temperature variations during winter season [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2009, 33(4): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2009.04.008. 薛建辉, 苏敬, 刘金根, 等. 5个常绿阔叶园林树种对低温变化的生理响应 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2009.04.008.
- [16] LI G. Study on Cold hardiness of several magnolia evergreen young seedlings and their photosynthetic characters in winter and spring [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 16–30. 李刚. 几种木兰科常绿树种幼苗的抗寒性及在冬春季节光合生理生态特征的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 16–30.
- [17] LING R, DAI Z W, DAI X Y, et al. Evaluation of heat tolerance and screening the index for the assessment of heat tolerance in cultivars of *Hydrangea* [J]. Chin J Trop Crops, 2021, 42(8): 2209–2218. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.08.012. 凌瑞, 戴中武, 代晓雨, 等. 8个绣球品种耐热性综合评价与耐热指标筛选 [J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2209–2218. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.08.012.
- [18] CHEN J X, WANG X F. Experiment Instruction of Plant Physiology [M]. 2nd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 64–84. 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 第2版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 64–84.
- [19] CHEN G, LI S. Plant Physiology Experiment [M]. Beijing: Higher

- Education Press, 2016: 59–71.
- 陈刚, 李胜. 植物生理学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 59–71.
- [20] ZHU G H, LIU Z Q, ZHU P R. A study on determination of lethal temperature with logistic function [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 1986, 9(3): 11–16.
- 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究 [J]. *南京农业大学学报*, 1986, 9(3): 11–16.
- [21] WANG F X, WANG X J. Study on natural cold resistance of different apple rootstocks of progenies in winter [J]. *N Hort*, 2020, 44(4): 20–28. doi: 10.11937/bfyy.20192189.
- 王飞雪, 王新建. 不同苹果砧木实生后代自然越冬抗寒性研究 [J]. *北方园艺*, 2020, 44(4): 20–28. doi: 10.11937/bfyy.20192189.
- [22] GAO F, XIE Z D, LÜ J, et al. Comprehensive evaluation of cucumber biomass cultivation substrate based on fuzzy mathematics method [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2019, 54(6): 93–101. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2019.06.013.
- 高峰, 顾振东, 吕剑, 等. 基于模糊数学隶属函数法综合评价黄瓜生物质栽培基质 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(6): 93–101. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2019.06.013.
- [23] DU P B, ZHANG Y F, BAI X D, et al. Evaluation of drought resistance of potato varieties by principal component analysis and membership function method [J]. *Seed*, 2019, 38(8): 120–126. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.08.120.
- 杜培兵, 张永福, 白小东, 等. 主成分分析和隶属函数法对马铃薯品种抗旱性的评价 [J]. *种子*, 2019, 38(8): 120–126. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.08.120.
- [24] GUO X Q, ZHU H Y, HONG W, et al. The quantitative application of cold resistance standard in *Eucalyptus dunnii* with the lowest temperature distribution model [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2011, 19(1): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.01.007.
- 郭祥泉, 朱会芸, 洪伟, 等. 极端低温分布模型在邓恩桉抗寒性标准量化应用的研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(1): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.01.007.
- [25] ZHANG X, ZHU Z Z, SUN L L, et al. Effects of different dwarfing interstocks on cold resistance of ‘Changfu 2’ apple in Longdong Area [J]. *J Fruit Sci*, 2020, 37(7): 985–996. doi: 10.13925/j.cnki.gsx2019.0565.
- 张旭, 朱珍珍, 孙鲁龙, 等. 陇东地区不同矮化中间砧对‘长富 2 号’苹果抗寒性的影响 [J]. *果树学报*, 2020, 37(7): 985–996. doi: 10.13925/j.cnki.gsx20190565.
- [26] LI Q Y, LU B, ZHAO J W, et al. Physiological response and cold resistance evaluation of different *Pyrus calleryana* varieties under low temperature stress [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2020, 48(1): 86–94, 110. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.01.011.
- 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. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.01.011.
- [27] WANG S S, FAN B G. Cold resistance of ten species of deciduous trees [J]. *N Hort*, 2016, 40(9): 87–93. doi: 10.11937/bfyy.201609024.
- 王姗姗, 樊保国. 十个落叶乔木树种的抗寒性研究 [J]. *北方园艺*, 2016, 40(9): 87–93. doi: 10.11937/bfyy.201609024.
- [28] ZHANG X X, ZHANG N, ZHANG Y X, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of introduced *Cedrus deodara* Loud. in Shanxi [J]. *J Shanxi Agri Sci*, 2020, 48(11): 1781–1785.
- 张幸幸, 张娜, 张芸香. 山西引种雪松抗寒性综合评价 [J]. *山西农业科学*, 2020, 48(11): 1781–1785.
- [29] YANG Y N, XU T T, MA J, et al. Genetic variation and molecular markers for cold tolerance of ray florets by the relative electric conductivity analysis in chrysanthemum cultivars [J]. *Plant Physiol J*, 2020, 56(2): 275–284. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2019.0249.
- 杨英楠, 徐婷婷, 马杰, 等. 以相对电导率研究菊花舌状花抗寒性遗传变异及其分子标记 [J]. *植物生理学报*, 2020, 56(2): 275–284. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2019.0249.
- [30] HE K Y, LI X C, HUANG L B, et al. A study on variations of physiological indices of cold resistance in *Fukien cypress* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2002, 26(5): 10–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2002.05.003.
- 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 等. 福建柏抗寒生理指标变化研究 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(5): 10–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2002.05.003.
- [31] LIU X M, ZHAO B, SHEN H F, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of twenty rhododendron cultivars under cold stress [J]. *N Hort*, 2017, 41(5): 60–66. doi: 10.11937/bfyy.201705015.
- 刘旭梅, 赵冰, 申惠蕤, 等. 低温胁迫下二十个杜鹃花品种的抗寒性评价 [J]. *北方园艺*, 2017, 41(5): 60–66. doi: 10.11937/bfyy.201705015.
- [32] SU J. A study on the cold-resistance of five evergreen broadleaved tree species in natural decreasing process of air temperature [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007: 30–32.
- 苏敬. 自然降温过程中五个常绿阔叶树种的抗寒性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007: 30–32.
- [33] REN J, HAO Y, BAI Y D, et al. Comprehensive evaluation on cold resistance of seven grape rootstock-scion combinations of Italian Riesling in Hexi Corridor [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2019, 54(4): 60–68. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2019.04.009.
- 任静, 郝燕, 白耀栋, 等. 河西走廊‘贵人香’7 个葡萄砧穗组合抗寒性

- 的综合评价 [J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 60–68. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2019.04.009.
- [34] YU H X, JIANG C Y, WANG C, et al. Physiological response of high quality forage *Desmodium intortum* to low temperature stress and rapid identification of its cold tolerance [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(6): 649–658. doi: 10.11926/jtsb.4046.
- 余涵霞, 姜朝阳, 王纯, 等. 优质牧草旋扭山绿豆对低温胁迫的生理响应及其耐寒性快速鉴定 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(6): 649–658. doi: 10.11926/jtsb.4046.
- [35] YANG N, JIANG J L, LI L, et al. Physiological response and evaluation of cold resistance of three *Citrus* varieties seedlings under low temperature stress [J]. *China Fruits*, 2020(5): 32–39. doi: 10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.05.006.
- 阳妮, 蒋景龙, 李丽, 等. 3个柑橘品种幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性评价 [J]. 中国果树, 2020(5): 32–39. doi: 10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.05.006.
- [36] LIU H M, ZHANG Q, SU Q, et al. Studies on evaluation and screening of cold resistance during seedling stage in eighteen species or varieties of *Spiraea* [J]. *Acta Hort Sin*, 2014, 41(12): 2427–2436.
- 刘慧民, 仇茜, 苏青, 等. 18种绣线菊苗期抗寒性评价与筛选 [J]. 园艺学报, 2014, 41(12): 2427–2436.
- [37] ZHOU J, YOU Y, YUAN D Y. Effect of low temperature stress on physiological characteristics of *Magnolia grandiflora* [J]. *J NW For Univ*, 2008, 23(6): 38–42.
- 周建, 尤扬, 袁德义. 低温胁迫对广玉兰生理特性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 38–42.
- [38] SUN L X, JIN X L, HU X J, et al. Evaluation of cold resistance of new variety 'Bicui' of *Magnolia grandiflora* and its screening of cold resistance index [J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2020, 7(1): 33–39. doi: 10.3969/j.issn.2095-7300.2020.01.005.
- 孙凌霄, 金晓玲, 胡希军, 等. 广玉兰新品种‘碧翠’的抗寒性评价及抗寒性指标筛选 [J]. 湖南生态科学学报, 2020, 7(1): 33–39. doi: 10.3969/j.issn.2095-7300.2020.01.005.
- [39] TIAN A J, WANG Y L, ZHANG R F, et al. The comparison of cold resistance of three species of evergreen broadleaf plants during the winter [J]. *J Beijing Agric Univ*, 2017, 32(4): 98–102. doi: 10.13473/j.cnki.issn.1002-3186.2017.0419.
- 田爱菊, 王雅丽, 张润芳, 等. 三种常绿阔叶植物越冬期间抗寒性的比较 [J]. 北京农学院学报, 2017, 32(4): 98–102. doi: 10.13473/j.cnki.issn.1002-3186.2017.0419.
- [40] TIAN D Q, GE Y Y, PAN G M, et al. Morphological and physiological characteristics of different cultivars of *Anthurium andraenum* under chilling stress [J]. *Acta Hort Sin*, 2011, 38(6): 1173–1179.
- 田丹青, 葛亚英, 潘刚敏, 等. 低温胁迫对3个红掌品种叶片形态和生理特性的影响 [J]. 园艺学报, 2011, 38(6): 1173–1179.
- [41] PEI W. Measurements of physiological indicators of nine evergreen Magnoliaceae plants in low temperature and cold tolerance evaluations [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013: 38–40.
- 裴文. 九种木兰科常绿植物低温冷害生理指标的测定及耐寒性评价 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2013: 38–40.
- [42] MENG A P, HE Z C, LI J Q, et al. Karyomorphology of three *Manglietia* (Magnoliaceae) species [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2004, 26(3): 317–320. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2004.03.009.
- 孟爱平, 何子灿, 李建强, 等. 三种木莲属(木兰科)植物的核型研究 [J]. 云南植物研究, 2004, 26(3): 317–320. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2004.03.009.
- [43] XIAO L, LI X L, WANG Y B, et al. Analyses of the genetic relationships among 22 species of *Manglietia* plants using iSSR markers [J]. *Bull Bot Res*, 2011, 31(4): 489–494.
- 肖黎, 李晓玲, 王玉兵, 等. 22种木莲属植物亲缘关系的 ISSR 分析 [J]. 植物研究, 2011, 31(4): 489–494.
- [44] SANG Z Y, ZHANG D C, WANG Y B, et al. Taxonomy significance based on pollen morphology observation of 19 species of *Manglietia* [J]. *Bull Bot Res*, 2016, 36(1): 43–51. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2016.01.006.
- 桑子阳, 张德春, 王玉兵, 等. 19个木莲属树种的花粉形态观察及其分类学意义 [J]. 植物研究, 2016, 36(1): 43–51. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2016.01.006.