

50 份热带睡莲材料的耐寒性评价

迟明宏^{1a,1b,1c}, 程哲^{1a,1b,1c}, 杨志娟², 王彦杰^{1a,1b,1c}, 金奇江^{1a,1b,1c},
杨梅花³, 王雪莲³, 徐迎春^{1a,1b,1c,①}

(1. 南京农业大学: a. 园艺学院, b. 三亚研究院, c. 农业农村部花卉生物学与种质创制重点实验室, 江苏 南京 210095;
2. 海南大学三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025; 3. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832099)

摘要: 本研究对 50 份热带睡莲材料进行 4 °C、0 °C、-6 °C 和 -12 °C 的人工低温处理, 测定了叶片相对电导率和半致死温度 (LT_{50}), 并对可溶性糖、丙二醛 (MDA) 和游离脯氨酸含量以及超氧化物歧化酶 (SOD) 活性进行了比较, 并利用相关性分析和 k 均值聚类分析等方法对 50 份热带睡莲材料的耐寒性进行分级。结果表明: LT_{50} 值可用于初步判断不同热带睡莲材料的耐寒性, 其中, 大部分热带睡莲材料的 LT_{50} 值介于 -5 °C ~ 0 °C 范围内, ‘江南风韵’ (‘Southern Charm’) 的 LT_{50} 值最低 (-5.85 °C), ‘潘燮’ (‘Poonsub’) 的 LT_{50} 值最高 (3.69 °C)。随着温度降低, 可溶性糖、MDA 和游离脯氨酸含量以及 SOD 活性的变化趋势整体可分为 3 类: 第 1 类各低温处理间的上述 4 个指标差异均不显著, 总体变幅不大; 第 2 类和第 3 类各低温处理间的上述 4 个指标的变化趋势各异且存在显著差异, 总体变幅较大。相关性分析结果显示: 热带睡莲材料的 LT_{50} 值与可溶性糖含量、MDA 含量和游离脯氨酸含量呈极显著正相关, 与 SOD 活性呈极显著负相关。进一步选取 LT_{50} 值、MDA 含量、可溶性糖含量和 SOD 活性作为建立热带睡莲耐寒性评价体系的指标。k 均值聚类分析结果显示: 50 份热带睡莲材料可分为 4 类, 即不耐寒型、弱耐寒型、中等耐寒型和强耐寒型。综上所述, 热带睡莲会通过多种生理生化反应来应对低温胁迫, 总体上看, 耐寒性越强的材料的可溶性糖和 MDA 含量越低, SOD 活性越高; 埃及白睡莲 [*Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow] 表现出强耐寒性, 可以考虑作为耐寒性育种的优良亲本。

关键词: 热带睡莲; 耐寒性; 半致死温度 (LT_{50}); 生理生化指标; 相关性分析; 聚类分析

中图分类号: Q945.78; S682.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2023)01-0039-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.01.05

Evaluation on cold tolerance of 50 tropical water lily materials CHI Minghong^{1a,1b,1c}, CHENG Zhe^{1a,1b,1c}, YANG Zhijuan², WANG Yanjie^{1a,1b,1c}, JIN Qijiang^{1a,1b,1c}, YANG Meihua³, WANG Xuelian³, XU Yingchun^{1a,1b,1c,①} (1. Nanjing Agricultural University; a. College of Horticulture, b. Sanya Research Institute, c. Key Laboratory of Flower Biology and Germplasm Creation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210095, China; 2. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya 572025, China; 3. Agriculture College, Shihezi University, Shihezi 832099, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(1): 39-49

Abstract: In this study, 50 tropical water lily materials were subjected to artificial low temperature treatments at 4 °C, 0 °C, -6 °C, and -12 °C, relative conductivity and semi-lethal temperature (LT_{50}) of the leaves were determined, contents of soluble sugar, malondialdehyde (MDA), and free proline and superoxide dismutase (SOD) activity were compared, and the cold tolerance of 50 tropical water lily materials was graded by using correlation analysis and k-means cluster analysis, etc. The results show that LT_{50} values can be used to preliminarily judge the cold tolerance of different tropical water lily materials,

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金新疆联合基金项目(U1803104; U2003113); 海南省自然科学基金高层次人才项目(321RC670); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(KYZZ2022004)

作者简介: 迟明宏(2000—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 本科, 主要从事园林植物应用方面的研究。

①通信作者 E-mail: xyc@njau.edu.cn

引用格式: 迟明宏, 程哲, 杨志娟, 等. 50 份热带睡莲材料的耐寒性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(1): 39-49.

in which, the LT_{50} values of most tropical water lily materials are within the range of $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, the LT_{50} value of ‘Southern Charm’ is the lowest ($-5.85\text{ }^{\circ}\text{C}$), while that of ‘Poosub’ is the highest ($3.69\text{ }^{\circ}\text{C}$). With the decrease of temperature, the variation tendency of contents of soluble sugar, MDA, and free proline and SOD activity can be divided into three categories: the differences in above-mentioned 4 indexes among each low temperature treatment of the first category are all not significant, and the overall variation degree is not great; the variation tendency of above-mentioned 4 indexes among each low temperature treatment of the second and third categories are different and there are significant differences, and the overall variation degree is relatively great. The correlation analysis result shows that LT_{50} values of tropical water lily materials show extremely significant positive correlations with contents of soluble sugar, MDA, and free proline, but show extremely significant negative correlation with SOD activity. LT_{50} value, MDA content, soluble sugar content, and SOD activity are further selected as indexes to establish a cold tolerance evaluation system for tropical water lilies. The k-means cluster analysis result shows that 50 tropical water lily materials can be divided into four categories, namely non-cold tolerant type, weak cold tolerant type, medium cold tolerant type, and strong cold tolerant type. Taken together, tropical water lilies will cope with low temperature stress *via* multiple physiological and biochemical reactions, in general, stronger cold tolerant materials have lower contents of soluble sugar and MDA and higher SOD activity; *Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow exhibits strong cold tolerance, and can be considered as an excellent parent for cold tolerance breeding.

Key words: tropical water lily; cold tolerance; semi-lethal temperature (LT_{50}); physiological and biochemical index; correlation analysis; cluster analysis

热带睡莲为睡莲科 (Nymphaeaceae) 睡莲属 (*Nymphaea* Linn.)^[1] 植物中广泛分布于热带地区的类群统称,具有极高观赏价值和生态价值,热带睡莲花色丰富,多应用于园林造景、水生态治理以及日化产品开发等多个领域。然而热带睡莲的适宜生长温度为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2], 在北纬 24.3° 以北地区需要采用保护设施才能安全越冬^[3], 生产成本的提高降低了厂商对热带睡莲生产培养的的积极性,进而影响了热带睡莲在中国北方的推广和应用。

目前,热带睡莲的研究多集中在育苗技术和杂交育种^[4-5]、天然产物提取与功能分析^[6-8]以及水体净化^[9-11]等方面,已有的耐寒性相关研究存在耐寒程度未量化、耐寒性育种操作技术不成熟^[12]等不足。因此,有必要对热带睡莲进行科学的耐寒性评价,确定其安全越冬的温度,为热带睡莲的保护越冬和引种等奠定基础。本研究以 50 份主栽热带睡莲材料为研究对象,研究低温对叶片生理生化指标的影响,通过半致死温度并结合聚类分析等建立耐寒性评价体系,以期对热带睡莲种质资源区域化引种以及耐寒性种质筛选提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试 50 份热带睡莲材料均采自南京农业大学龙

潭荷花睡莲基地(东经 $119^{\circ}08'57''$ 、北纬 $32^{\circ}12'06''$), 包括埃及白睡莲 [*Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow]、‘艾利克斯’(‘Alexis’)、‘安妮艾米特’(‘Anne Emmet’)、澳洲 IM 睡莲 (*N. immutabilis* subsp. *immutabilis*)、澳洲蓝巨睡莲 (*N. gigantea* Hook.)、‘芭芭拉’(‘Barbara Barnette’)、‘白蓝星’(‘White Colorata’)、‘保罗蓝’(‘Paul Stetson’)、‘贝蒂楼’(‘Betty Lou’)、‘查尔斯托马斯’(‘Charles Thomas’)、‘丹泉石’(‘Tanzanite’)、‘蒂娜’(‘Tina’)、‘粉黛’(‘Fen Dai’)、‘粉火烈鸟’(‘Pink Flamingo’)、‘粉钻’(‘Pink Diamond’)、‘盖瑞’(‘Gary’)、‘甘娜’(‘Madame Ganna Walska’)、‘公牛眼’(‘Bull’s Eye’)、‘黑美人’(‘Murasaki Shikibu’)、‘红蟹爪’(‘Nangkweg Red’)、‘狐火’(‘Foxfire’)、‘黄金国’(‘Eidorado’)、‘江南风韵’(‘Southern Charm’)、‘康弘’(‘Yasuhiro’)、‘拉萨米’(‘Rassamee jan’)、‘蓝金神蟹人’(‘Blue Gold Crab Man’)、‘蓝女神’(‘Wood’s Blue Goddess’)、蓝星睡莲 (*N. colarata* Peter)、‘蓝紫苑’(‘Blue Aster’)、‘鲁比’(‘Ruby’)、‘迈阿密玫瑰’(‘Miami Rose’)、‘帕拉米’(‘Paramee’)、‘潘燮’(‘Poosub’)、‘热带风情’(‘Tropic Punch’)、‘日冕红’(‘Corona Red’)、‘瑞秋’(‘Rachell Presnell’)、‘圣路易斯金’(‘St. Louis Gold’)、‘苏瓦娜’(‘Suwanna’)、‘泰国国王’(‘King of Siam’)、‘泰国

之星’(‘Star of Siam’)、‘希拉里’(‘Hilary’)、‘仙饌’(‘Ambrosia’)、小花睡莲(*N. micrantha* Guill. et Perr.)、‘雪崩’(‘Avalanche’)、‘血色火焰’(‘Scarlet Flame’)、‘伊斯兰达’(‘Islamorada’)、印度红睡莲(*N. rubra* Roxb. ex Andrews)、‘月光’(‘Moon Beam’)、增殖睡莲(*N. prolifera* Wiersema)和‘紫云’(‘Purple Cloud’)。实验所用的50份株龄相近的材料均由中国科学院植物研究所王竞生研究员鉴定。

1.2 方法

1.2.1 实验处理 于2018年10月,随机从上述各热带睡莲上采集生长状况基本一致、无病虫害的成熟叶片300 g。用蒸馏水冲洗干净,吸水纸吸干表面水分,并用打孔器在叶片上避开主脉的位置,取直径1 cm的叶块,置于密封袋后放入9610型低温循环仪(美国Polyscience公司)内进行低温处理。根据预实验结果,设定4℃、0℃、-6℃和-12℃4个温度处理,每个温度梯度间降温1 h,在降至每个低温节点时持续1.5 h。将低温处理后的叶片分成2份,一部分直接用于测定相对电导率,另一部分在室温下解冻后用于测定其他生理生化指标。每个处理设置3次重复。

1.2.2 相对电导率测定以及半致死温度计算 使用DDS-307电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司),并根据文献[12]中的电导法测定相对电导率;通过拟合Logistic方程 $y=k/(1+ae^{-bx})$ 计算半致死温度(LT_{50}),式中, y 为细胞伤害率, k 为细胞伤害率的饱和容量, x 为处理温度, a 和 b 为方程参数^[13]。

1.2.3 生理生化指标的测定 采用TBA法^[14]测定可溶性糖含量和丙二醛(MDA)含量;采用磺基水杨

酸法^[15]测定游离脯氨酸含量;采用氮蓝四唑法(NBT)^[16]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。上述指标均重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据处理

采用EXCEL 2016软件对实验数据进行处理,并采用SPSS 19.0软件对实验数据进行差异显著性分析、相关性分析和k均值聚类分析。

2 结果和分析

2.1 低温处理对热带睡莲叶片的相对电导率及半致死温度的影响

以不同低温处理下50份热带睡莲材料叶片的相对电导率为参数,带入回归方程求得各个材料的半致死温度(LT_{50})。获得的回归方程拟合度高,计算出的半致死温度可用于判断不同热带睡莲材料的耐寒性。

结果(表1)显示:随着温度降低,50份热带睡莲材料叶片的相对电导率呈升高的趋势,且在不同低温处理间存在显著差异。从 LT_{50} 值看,‘江南风韵’的 LT_{50} 值最低,为-5.85℃;‘潘燮’的 LT_{50} 值最高,为3.69℃,跨度达9.54℃。 LT_{50} 值小于等于-5℃的热带睡莲有埃及白睡莲、澳洲蓝巨睡莲、‘白蓝星’、‘查尔斯托马斯’、‘盖瑞’、‘甘娜’、‘江南风韵’和‘热带风情’,初步推测这8份材料的耐寒性较佳。 LT_{50} 值大于0℃的热带睡莲有‘丹泉石’、‘粉黛’、‘公牛眼’、‘康弘’、‘迈阿密玫瑰’、‘潘燮’、‘日冕红’、‘泰国之星’、小花睡莲和印度红睡莲10份材料。其余32份热带睡莲材料的 LT_{50} 值介于-5℃~0℃范围内。

表1 不同低温处理下50份热带睡莲材料叶片相对电导率及半致死温度(LT_{50})的比较($\bar{X}\pm SE$)

Table 1 Comparison on leaf relative conductivity and semi-lethal temperature (LT_{50}) of 50 tropical water lily materials under different low temperature treatments ($\bar{X}\pm SE$)

材料 ¹⁾ Material ¹⁾	不同低温处理下的叶片相对电导率/% ²⁾ Leaf relative conductivity under different low temperature treatments ²⁾				回归方程 Regression equation	拟合度 ³⁾ Fitting degree ³⁾	$LT_{50}/^{\circ}C$
	4℃	0℃	-6℃	-12℃			
1	12.78±0.66c	16.63±0.62c	52.65±0.45b	83.08±2.25a	$y=100/(1+3.54e^{-0.230x})$	0.975 **	-5.50
2	16.58±1.56c	24.54±0.97b	98.31±0.88a	98.83±0.60a	$y=100/(1+1.08e^{-0.435x})$	0.975 **	-0.19
3	10.09±0.66c	25.29±0.32b	82.94±0.65a	89.02±0.66a	$y=100/(1+2.45e^{-0.285x})$	0.935 **	-3.15
4	8.93±0.20c	11.81±1.53b	87.41±0.67a	96.11±1.36a	$y=100/(1+1.47e^{-1.143x})$	0.934 **	-0.34
5	9.42±1.91c	15.60±2.94bc	57.13±2.05b	85.10±1.66a	$y=100/(1+4.03e^{-0.261x})$	0.987 **	-5.34
6	17.11±0.46c	32.10±0.34b	82.10±0.07ab	92.46±0.62a	$y=100/(1+1.68e^{-0.269x})$	0.975 **	-1.92
7	11.87±1.03c	16.86±1.32bc	21.37±1.25b	94.31±0.39a	$y=100/(1+4.51e^{-0.280x})$	0.769 **	-5.39
8	16.37±1.84d	18.16±0.80cd	87.75±1.45b	93.84±0.98a	$y=100/(1+2.01e^{-0.310x})$	0.905 **	-2.25
9	7.83±1.87c	10.02±0.94bc	88.26±3.39a	88.72±4.67a	$y=100/(1+3.69e^{-0.332x})$	0.845 **	-3.94
10	10.00±0.34c	12.73±1.60c	46.76±0.86b	89.65±2.62a	$y=100/(1+4.51e^{-0.281x})$	0.955 **	-5.36
11	45.71±0.87c	66.03±1.85b	75.54±1.89ab	92.82±0.92a	$y=100/(1+0.62e^{-0.160x})$	0.960 **	3.02

续表1 Table 1 (Continued)

材料 ¹⁾ Material ¹⁾	不同低温处理下的叶片相对电导率/% ²⁾ Leaf relative conductivity under different low temperature treatments ²⁾				回归方程 Regression equation	拟合度 ³⁾ Fitting degree ³⁾	LT ₅₀ /°C
	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C			
12	29.28±2.52c	52.89±0.83b	69.80±3.38a	73.16±2.22a	$y = 100 / (1 + 1.14e^{-0.115x})$	0.872 **	-1.15
13	31.54±1.00c	48.57±0.88b	85.63±1.53a	91.77±0.68a	$y = 100 / (1 + 0.96e^{-0.211x})$	0.963 **	0.49
14	10.89±1.49c	16.15±1.76bc	75.17±0.32b	94.15±1.20a	$y = 100 / (1 + 3.02e^{-0.326x})$	0.972 **	-3.40
15	19.37±1.23c	35.81±1.17b	50.13±7.44ab	79.46±0.29a	$y = 100 / (1 + 2.10e^{-0.165x})$	0.976 **	-4.48
16	10.41±0.23b	13.17±1.27b	77.35±1.26a	78.63±1.06a	$y = 100 / (1 + 3.51e^{-0.251x})$	0.855 **	-5.00
17	9.79±4.10c	20.01±2.39b	69.61±0.65a	73.89±2.46a	$y = 100 / (1 + 3.34e^{-0.221x})$	0.909 **	-5.47
18	48.68±0.87c	51.12±0.47bc	60.74±1.28b	93.45±2.51a	$y = 100 / (1 + 0.82e^{-0.163x})$	0.798 **	1.24
19	16.11±2.57cd	20.21±0.57c	52.87±3.05b	96.96±1.88a	$y = 100 / (1 + 2.96e^{-0.319x})$	0.905 **	-3.10
20	20.76±1.29cd	36.48±0.94c	77.54±0.86b	93.05±2.25a	$y = 100 / (1 + 1.49e^{-0.253x})$	0.995 **	-1.58
21	9.62±0.42c	11.51±0.60b	85.63±1.12a	89.86±0.77a	$y = 100 / (1 + 3.31e^{-0.319x})$	0.877 **	-3.74
22	29.80±1.82c	45.38±0.88b	56.74±1.10ab	78.94±1.24a	$y = 100 / (1 + 1.37e^{-0.129x})$	0.976 **	-2.42
23	14.50±0.75c	18.36±1.16c	21.64±1.08b	91.02±1.11a	$y = 100 / (1 + 4.03e^{-0.238x})$	0.748 **	-5.85
24	32.35±1.00c	46.93±0.85b	90.99±0.54a	95.78±1.94a	$y = 100 / (1 + 0.79e^{-0.260x})$	0.956 **	0.89
25	12.03±0.55c	23.39±1.66bc	85.95±2.06a	90.71±1.91a	$y = 100 / (1 + 2.21e^{-0.292x})$	0.922 **	-2.72
26	14.20±2.19c	36.02±1.06b	81.86±1.73a	84.94±0.65a	$y = 100 / (1 + 1.81e^{-0.231x})$	0.909 **	-2.57
27	27.17±1.02c	35.14±1.67b	91.19±1.09a	96.00±0.65a	$y = 100 / (1 + 1.03e^{-0.288x})$	0.935 **	-0.11
28	12.83±1.28c	19.92±1.78bc	82.30±4.57b	91.78±1.51a	$y = 100 / (1 + 2.40e^{-0.296x})$	0.944 **	-2.96
29	16.09±0.71c	22.93±1.80bc	69.20±1.00b	87.53±0.47a	$y = 100 / (1 + 2.38e^{-0.240x})$	0.978 **	-3.61
30	14.44±1.73c	18.05±1.40b	83.43±4.49a	88.73±1.04a	$y = 100 / (1 + 2.37e^{-0.274x})$	0.896 **	-3.15
31	45.54±1.23c	55.97±3.21b	71.35±1.65ab	98.06±0.55a	$y = 100 / (1 + 0.69e^{-0.246x})$	0.861 **	1.48
32	7.93±0.84c	14.25±2.38b	86.84±1.10a	89.54±1.06a	$y = 100 / (1 + 3.28e^{-0.324x})$	0.888 **	-3.66
33	26.39±0.94c	88.30±1.01b	92.63±1.41a	96.34±1.09a	$y = 100 / (1 + 0.42e^{-0.236x})$	0.768 **	3.69
34	20.17±1.99c	27.06±1.17cb	34.25±1.98b	77.74±1.25a	$y = 100 / (1 + 2.45e^{-0.155x})$	0.865 **	-5.77
35	58.76±2.83c	66.55±0.95b	71.19±1.49ab	88.49±0.80a	$y = 100 / (1 + 0.55e^{-0.990x})$	0.896 **	0.66
36	11.59±1.51c	22.01±1.49bc	92.30±1.92a	92.37±1.56a	$y = 100 / (1 + 2.02e^{-0.320x})$	0.866 **	-2.20
37	16.37±0.95c	39.98±1.02b	96.86±0.91a	97.39±0.78a	$y = 100 / (1 + 1.01e^{-0.361x})$	0.892 **	-0.02
38	34.55±1.14c	39.71±1.22b	93.39±1.29a	96.44±0.93a	$y = 100 / (1 + 1.28e^{-0.278x})$	0.911 **	-0.89
39	14.85±1.50c	26.60±1.26b	73.06±1.40a	84.69±1.54a	$y = 100 / (1 + 2.26e^{-0.229x})$	0.965 **	-3.56
40	31.39±1.89c	47.88±1.20b	95.40±0.37a	96.21±0.30a	$y = 100 / (1 + 0.69e^{-0.280x})$	0.891 **	1.31
41	17.95±0.63c	20.56±0.98c	90.11±0.95b	94.28±1.09ab	$y = 100 / (1 + 1.73e^{-0.309x})$	0.894 **	-1.77
42	14.16±1.99c	70.46±1.03b	79.27±1.40b	82.42±0.58ab	$y = 100 / (1 + 1.17e^{-0.183x})$	0.683 *	-0.84
43	40.70±0.65c	64.05±0.67b	84.51±0.95ab	96.79±0.45a	$y = 100 / (1 + 0.60e^{-0.231x})$	0.992 **	2.23
44	20.08±0.62c	39.26±0.24c	86.88±3.11b	93.43±1.59a	$y = 100 / (1 + 1.29e^{-0.267x})$	0.962 **	-0.94
45	13.37±1.93c	19.92±2.06b	81.35±0.53a	83.54±1.48a	$y = 100 / (1 + 2.48e^{-0.247x})$	0.880 **	-3.66
46	12.74±1.43c	19.80±2.87c	62.81±4.91b	79.27±1.31ab	$y = 100 / (1 + 2.70e^{-0.218x})$	0.961 **	-4.98
47	37.74±0.59c	62.32±2.79b	83.90±2.16a	91.62±1.40a	$y = 100 / (1 + 0.68e^{-0.180x})$	0.980 **	2.12
48	13.75±1.72b	15.76±1.03b	87.90±0.47a	89.99±1.33a	$y = 100 / (1 + 2.37e^{-0.294x})$	0.859 **	-2.93
49	15.05±1.42c	24.12±2.66b	84.05±1.47a	95.83±2.43a	$y = 100 / (1 + 1.93e^{-0.325x})$	0.973 **	-2.02
50	14.00±0.59c	20.94±1.58bc	83.91±0.64a	94.78±1.21a	$y = 100 / (1 + 2.16e^{-0.320x})$	0.959 **	-2.40

¹⁾ 1: 埃及白睡莲 *Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow; 2: ‘艾利克斯’ ‘Alexis’; 3: ‘安妮艾米特’ ‘Anne Emmet’; 4: 澳洲IM睡莲 *N. immutabilis* subsp. *immutabilis*; 5: 澳洲蓝巨睡莲 *N. gigantea* Hook.; 6: ‘芭芭拉’ ‘Barbara Barnette’; 7: ‘白蓝星’ ‘White Colorata’; 8: ‘保罗蓝’ ‘Paul Stetson’; 9: ‘贝蒂楼’ ‘Betty Lou’; 10: ‘查尔斯托马斯’ ‘Charles Thomas’; 11: ‘丹泉石’ ‘Tanzanite’; 12: ‘蒂娜’ ‘Tina’; 13: ‘粉黛’ ‘Fen Dai’; 14: ‘粉火烈鸟’ ‘Pink Flamingo’; 15: ‘粉钻’ ‘Pink Diamond’; 16: ‘盖瑞’ ‘Gary’; 17: ‘甘娜’ ‘Madame Ganna Walska’; 18: ‘公牛眼’ ‘Bull’s Eye’; 19: ‘黑美人’ ‘Murasaki Shikibu’; 20: ‘红蟹爪’ ‘Nangkweg Red’; 21: ‘狐火’ ‘Foxfire’; 22: ‘黄金国’ ‘Eidorado’; 23: ‘江南风韵’ ‘Southern Charm’; 24: ‘康弘’ ‘Yasuhiro’; 25: ‘拉萨米’ ‘Rassamee jan’; 26: ‘蓝金神蟹人’ ‘Blue Gold Crab Man’; 27: ‘蓝女神’ ‘Wood’s Blue Goddess’; 28: 蓝星睡莲 *N. colorata* Peter; 29: ‘蓝紫苑’ ‘Blue Aster’; 30: ‘鲁比’ ‘Ruby’; 31: ‘迈阿密玫瑰’ ‘Miami Rose’; 32: ‘帕拉米’ ‘Paramee’; 33: ‘潘曼’ ‘Poosub’; 34: ‘热带风情’ ‘Tropic Punch’; 35: ‘日冕红’ ‘Corona Red’; 36: ‘瑞秋’ ‘Rachell Presnell’; 37: ‘圣路易斯金’ ‘St. Louis Gold’; 38: ‘苏瓦娜’ ‘Suwanna’; 39: ‘泰国国王’ ‘King of Siam’; 40: ‘泰国之星’ ‘Star of Siam’; 41: ‘希拉里’ ‘Hilary’; 42: ‘仙饕’ ‘Ambrosia’; 43: 小花睡莲 *N. micrantha* Guill. et Perr.; 44: ‘雪崩’ ‘Avalanche’; 45: ‘血色火焰’ ‘Scarlet Flame’; 46: ‘伊斯兰达’ ‘Islamorada’; 47: 印度红睡莲 *N. rubra* Roxb. ex Andrews; 48: ‘月光’ ‘Moon Beam’; 49: 增殖睡莲 *N. prolifera* Wiersema; 50: ‘紫云’ ‘Purple Cloud’.

²⁾ 同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

³⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

2.2 低温处理对热带睡莲耐寒性相关指标的影响

不同低温处理下 50 份热带睡莲材料叶片的可溶性糖和丙二醛(MDA)含量的比较结果见表 2,游离脯氨酸含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性的比较结果见表 3。

2.2.1 低温处理对可溶性糖和 MDA 含量的影响
 结果(表 2)显示:50 份热带睡莲材料叶片的可溶性糖含量为 7.56~70.02 mg · g⁻¹。随着温度降低,可溶性糖含量的变化趋势整体可分为 3 类:第 1 类为稳定型,各低温处理间的可溶性糖含量差异不显著,包括埃及白睡莲、‘安妮艾米特’、‘芭芭拉’、‘白蓝星’、‘查尔斯托马斯’、‘红蟹爪’、‘狐火’、‘江南风韵’、‘康弘’、‘拉萨米’、‘蓝金神蟹人’、‘热带风情’、‘雪崩’、印度红睡莲和‘月光’ 15 份材料,其中,‘狐火’的可溶性糖含量变幅较小,总体变幅为 2.05%~

8.22%;第 2 类各低温处理间的可溶性糖含量存在显著差异,且总体呈先升后降或先降后升的趋势,包括‘艾利克斯’、澳洲 IM 睡莲、‘保罗蓝’、‘丹泉石’、‘蒂娜’、‘甘娜’、蓝星睡莲、‘蓝紫苑’、‘鲁比’、‘迈阿密玫瑰’、‘帕拉米’、‘潘燮’、‘日冕红’、‘圣路易斯金’、‘苏瓦娜’、‘泰国国王’、‘希拉里’、小花睡莲、‘血色火焰’、‘伊斯兰达’和增殖睡莲 21 份材料,其中,‘血色火焰’的可溶性糖含量变幅较大,最大变幅为 173.81%;第 3 类各低温处理间的可溶性糖含量存在显著差异,且呈上升或下降或波动变化的趋势,包括澳洲蓝巨睡莲、‘贝蒂楼’、‘粉黛’、‘粉火烈鸟’、‘粉钻’、‘盖瑞’、‘公牛眼’、‘黑美人’、‘黄金国’、‘蓝女神’、‘瑞秋’、‘泰国之星’、‘仙僮’和‘紫云’ 14 份材料,其中,‘盖瑞’的可溶性糖含量变幅较大,最大变幅为 67.01%。

表 2 不同低温处理下 50 份热带睡莲材料叶片可溶性糖和丙二醛(MDA)含量的比较($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Comparison on contents of soluble sugar and malonaldehyde (MDA) in leaves of 50 tropical water lily materials under different low temperature treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同低温处理下的可溶性糖含量/(mg · g ⁻¹) Soluble sugar content under different low temperature treatments				不同低温处理下的 MDA 含量/(mg · g ⁻¹) MDA content under different low temperature treatments			
	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C
	1	28.98±0.01a	26.82±0.01a	29.16±0.03a	38.34±0.04a	0.60±0.10a	0.67±0.06a	0.90±0.18a
2	44.10±0.01b	44.46±0.00b	70.02±0.02a	30.60±0.02c	2.53±0.29a	2.54±0.22a	1.49±0.48b	2.47±0.21a
3	36.36±0.01a	41.94±0.01a	41.40±0.04a	42.12±0.02a	1.33±0.03b	1.11±0.07b	1.81±0.15a	1.66±0.09a
4	33.48±0.01a	36.54±0.02a	25.74±0.02b	20.88±0.01b	1.32±0.02b	1.79±0.08a	0.95±0.01c	0.91±0.03c
5	14.94±0.00b	19.98±0.03ab	19.44±0.01ab	22.68±0.02a	0.84±0.17ab	1.12±0.29a	0.69±0.14ab	0.39±0.03b
6	24.48±0.01a	24.66±0.01a	27.36±0.00a	27.18±0.01a	0.96±0.14c	2.50±0.12a	2.28±0.07ab	1.94±0.20b
7	22.68±0.02a	19.08±0.01a	25.74±0.04a	17.82±0.01a	1.12±0.24ab	1.06±0.03ab	1.18±0.12a	0.81±0.01b
8	20.52±0.00b	24.30±0.01a	26.46±0.00a	18.18±0.01b	1.18±0.12a	1.28±0.19a	1.09±0.11a	1.06±0.01a
9	18.54±0.01b	23.76±0.02b	29.70±0.00a	30.60±0.01a	1.02±0.01b	1.05±0.08b	1.28±0.02a	1.28±0.02a
10	25.02±0.02a	27.90±0.02a	20.88±0.02a	21.96±0.01a	1.39±0.11a	1.32±0.11a	0.97±0.14b	0.99±0.02b
11	35.28±0.01a	25.92±0.01b	30.78±0.02ab	31.32±0.00a	1.99±0.08a	1.72±0.08b	1.52±0.01c	1.34±0.05d
12	43.20±0.01b	54.36±0.01a	45.72±0.01b	30.24±0.01c	1.36±0.35b	2.07±0.47a	1.91±0.04a	1.79±0.26ab
13	37.62±0.01b	43.38±0.01a	42.48±0.01a	43.02±0.00a	1.70±0.10b	2.18±0.07a	2.15±0.11a	1.72±0.11b
14	21.24±0.03ab	16.56±0.01b	26.46±0.01a	22.32±0.01ab	1.20±0.20b	1.90±0.17a	1.93±0.07a	0.96±0.06b
15	32.22±0.02ab	31.14±0.01b	42.30±0.04a	31.14±0.00b	0.97±0.20a	1.03±0.11a	1.19±0.30a	0.92±0.02a
16	17.46±0.01b	21.24±0.01a	24.84±0.03a	29.16±0.04a	0.63±0.07b	0.99±0.09ab	0.81±0.06b	1.20±0.26a
17	22.32±0.02b	29.52±0.02a	21.60±0.01b	19.98±0.01b	1.54±0.17ab	1.16±0.32b	1.00±0.15b	1.90±0.21a
18	34.56±0.02ab	35.10±0.01ab	31.32±0.04b	46.08±0.03a	1.31±0.09a	1.44±0.04a	1.43±0.16a	1.46±0.27a
19	28.08±0.01b	24.48±0.01b	36.00±0.01a	27.54±0.01b	1.04±0.07b	0.76±0.07c	1.88±0.15a	0.77±0.00c
20	28.62±0.02a	27.72±0.01a	32.22±0.02a	32.58±0.01a	0.86 ±0.03a	0.90±0.11a	0.78±0.09a	0.73±0.05a
21	27.36±0.01a	28.44±0.01a	26.82±0.01a	26.28±0.01a	1.40±0.19b	1.47±0.20b	1.99±0.04a	1.65±0.19ab
22	26.46±0.02b	25.56±0.02b	38.52±0.02a	33.30±0.02ab	0.95±0.19b	1.05±0.00b	1.45±0.10a	1.40±0.10a
23	26.82±0.02a	29.52±0.01a	23.58±0.01a	23.94±0.01a	0.71±0.01c	1.58±0.04a	1.41±0.14a	1.12±0.16b
24	46.62±0.03a	46.26±0.02a	45.72±0.01a	49.32±0.01a	1.27±0.02ab	1.36±0.15a	1.06±0.00c	1.10±0.06bc
25	28.62±0.03a	32.94±0.00a	33.48±0.01a	30.96±0.01a	0.58±0.05c	0.93±0.02b	1.20±0.15a	0.67±0.02c
26	31.14±0.02a	33.84±0.02a	35.64±0.04a	31.50±0.02a	0.90±0.06c	1.10±0.11ab	1.25±0.05a	0.99±0.05bc
27	30.60±0.01a	28.62±0.01a	22.50±0.01b	21.60±0.02b	1.31±0.22b	1.77±0.17a	1.68±0.13ab	0.76±0.13c

续表2 Table 2 (Continued)

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同低温处理下的可溶性糖含量/(mg·g ⁻¹)				不同低温处理下的MDA含量/(mg·g ⁻¹)			
	Soluble sugar content under different low temperature treatments				MDA content under different low temperature treatments			
	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C
28	20.16±0.01b	26.82±0.00a	21.96±0.01b	20.70±0.01b	0.93±0.03b	0.71±0.04c	1.39±0.08a	0.66±0.01c
29	28.62±0.01b	40.86±0.02a	40.68±0.01a	26.46±0.02b	1.12±0.14b	1.79±0.11a	1.49±0.06a	0.79±0.15c
30	34.92±0.01a	39.78±0.00a	26.28±0.00b	24.30±0.02b	1.17±0.20ab	1.24±0.10a	0.90±0.05bc	0.62±0.07c
31	28.44±0.01b	40.68±0.03a	36.00±0.01ab	30.60±0.00b	1.33±0.09ab	1.57±0.13a	1.41±0.12a	1.13±0.04b
32	25.74±0.01ab	31.14±0.01a	23.40±0.02bc	18.00±0.01c	0.93±0.13a	0.99±0.12a	1.06±0.15a	0.93±0.08a
33	33.30±0.02b	44.46±0.00a	46.44±0.02a	44.28±0.02a	1.66±0.09a	1.58±0.02a	1.41±0.28a	1.31±0.05a
34	28.98±0.03a	26.64±0.01a	29.70±0.02a	25.92±0.02a	0.90±0.06c	1.22±0.05b	1.70±0.01a	1.00±0.09c
35	28.98±0.01b	28.80±0.00b	37.98±0.01a	30.06±0.00b	1.04±0.02b	0.86±0.01c	1.29±0.08a	1.12±0.02b
36	20.70±0.01b	27.36±0.01a	29.16±0.01a	30.42±0.04a	1.36±0.19a	1.45±0.05a	1.48±0.05a	1.21±0.09a
37	39.06±0.01a	30.60±0.01b	28.80±0.01b	29.70±0.01b	2.35±0.20a	1.67±0.15b	1.21±0.03c	1.13±0.08c
38	34.92±0.02c	44.10±0.02ab	50.76±0.03a	37.26±0.00bc	0.90±0.02b	1.23±0.09a	1.20±0.09a	0.90±0.00b
39	12.24±0.01b	13.14±0.01b	17.46±0.00a	11.34±0.01b	0.56±0.06a	0.50±0.05ab	0.49±0.01ab	0.40±0.02b
40	40.14±0.03a	34.92±0.03ab	34.02±0.01ab	28.26±0.01b	2.18±0.12a	1.91±0.11ab	1.80±0.14b	1.22±0.11c
41	30.42±0.02a	30.96±0.00a	30.78±0.00a	19.44±0.02b	1.18±0.09a	1.00±0.20a	0.88±0.10a	0.99±0.11a
42	29.88±0.02b	23.94±0.01c	39.42±0.02a	35.28±0.00a	1.17±0.09c	1.60±0.21bc	1.81±0.18ab	2.26±0.25a
43	36.90±0.02a	27.90±0.02b	27.54±0.01b	31.50±0.00ab	2.73±0.13a	1.86±0.07b	1.58±0.17bc	1.44±0.07c
44	26.28±0.01a	24.30±0.01a	28.08±0.01a	25.02±0.01a	1.83±0.12b	1.26±0.11c	2.22±0.10a	1.60±0.06b
45	7.56±0.01b	11.34±0.01b	25.02±0.02a	20.70±0.01a	0.85±0.08a	0.96±0.08a	0.96±0.22a	1.14±0.04a
46	24.48±0.01a	27.90±0.02a	18.90±0.00b	15.66±0.01b	0.91±0.08bc	1.34±0.04a	1.07±0.10b	0.87±0.05c
47	21.42±0.02a	18.72±0.01a	19.08±0.00a	16.56±0.00a	2.00±0.15a	1.74±0.07a	1.33±0.03b	1.05±0.15b
48	21.60±0.03a	26.10±0.01a	25.56±0.02a	23.76±0.03a	0.95±0.02ab	1.15±0.08a	0.99±0.14ab	0.82±0.02b
49	15.66±0.01c	23.58±0.00a	20.34±0.01ab	18.54±0.00bc	1.52±0.08a	1.50±0.14a	0.84±0.07b	0.69±0.07b
50	24.48±0.02a	16.38±0.01b	17.82±0.01b	15.48±0.01b	1.62±0.22a	0.85±0.08b	0.28±0.05c	0.57±0.05bc

¹⁾ 同一指标同行中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same row of the same index indicate the significant ($P<0.05$) difference.

²⁾ 1: 埃及白睡莲 *Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow; 2: ‘艾利克斯’ ‘Alexis’; 3: ‘安妮艾米特’ ‘Anne Emmet’; 4: 澳洲IM睡莲 *N. immutabilis* subsp. *immutabilis*; 5: 澳洲蓝巨睡莲 *N. gigantea* Hook.; 6: ‘芭芭拉’ ‘Barbara Barnette’; 7: ‘白蓝星’ ‘White Colorata’; 8: ‘保罗蓝’ ‘Paul Stetson’; 9: ‘贝蒂楼’ ‘Betty Lou’; 10: ‘查尔斯托马斯’ ‘Charles Thomas’; 11: ‘丹泉石’ ‘Tanzanite’; 12: ‘蒂娜’ ‘Tina’; 13: ‘粉黛’ ‘Fen Dai’; 14: ‘粉火烈鸟’ ‘Pink Flamingo’; 15: ‘粉钻’ ‘Pink Diamond’; 16: ‘盖瑞’ ‘Gary’; 17: ‘甘娜’ ‘Madame Ganna Walska’; 18: ‘公牛眼’ ‘Bull’s Eye’; 19: ‘黑美人’ ‘Murasaki Shikibu’; 20: ‘红蟹爪’ ‘Nangkweg Red’; 21: ‘狐火’ ‘Foxfire’; 22: ‘黄金国’ ‘Eidorado’; 23: ‘江南风韵’ ‘Southern Charm’; 24: ‘康弘’ ‘Yasuhiro’; 25: ‘拉萨萨’ ‘Rassamee jan’; 26: ‘蓝金神蟹人’ ‘Blue Gold Crab Man’; 27: ‘蓝女神’ ‘Wood’s Blue Goddess’; 28: 蓝星睡莲 *N. colorata* Peter; 29: ‘蓝紫苑’ ‘Blue Aster’; 30: ‘鲁比’ ‘Ruby’; 31: ‘迈阿密玫瑰’ ‘Miami Rose’; 32: ‘帕拉米’ ‘Paramee’; 33: ‘潘变’ ‘Poosub’; 34: ‘热带风情’ ‘Tropic Punch’; 35: ‘日冕红’ ‘Corona Red’; 36: ‘瑞秋’ ‘Rachell Presnell’; 37: ‘圣路易斯金’ ‘St. Louis Gold’; 38: ‘苏瓦娜’ ‘Suwanna’; 39: ‘泰国国王’ ‘King of Siam’; 40: ‘泰国之星’ ‘Star of Siam’; 41: ‘希拉里’ ‘Hilary’; 42: ‘仙饷’ ‘Ambrosia’; 43: 小花睡莲 *N. micrantha* Guill. et Perr.; 44: ‘雪崩’ ‘Avalanche’; 45: ‘血色火焰’ ‘Scarlet Flame’; 46: ‘伊斯兰达’ ‘Islamorada’; 47: 印度红睡莲 *N. rubra* Roxb. ex Andrews; 48: ‘月光’ ‘Moon Beam’; 49: 增殖睡莲 *N. prolifera* Wiersema; 50: ‘紫云’ ‘Purple Cloud’.

结果(表2)还显示:50份热带睡莲材料叶片的MDA含量为0.28~2.73 mg·g⁻¹。随着温度降低,可溶性糖含量的变化趋势整体可分为3类:第1类为稳定型,各低温处理间的MDA含量差异不显著,包括埃及白睡莲、‘保罗蓝’、‘粉钻’、‘公牛眼’、‘红蟹爪’、‘帕拉米’、‘潘变’、‘瑞秋’、‘希拉里’和‘血色火焰’10份材料,其中,‘帕拉米’的MDA含量变幅较小,总体变幅为0.0%~13.98%;第2类各低温处理间的MDA含量存在显著差异,且总体呈先升后降或先降后升的趋势,包括澳洲IM睡莲、澳洲蓝巨睡莲、‘芭芭拉’、‘查尔斯托马斯’、‘蒂娜’、‘粉黛’、‘粉火烈鸟’、‘甘娜’、‘狐火’、‘黄金国’、‘江南风韵’、‘拉

萨米’、‘蓝金神蟹人’、‘蓝女神’、‘蓝紫苑’、‘鲁比’、‘迈阿密玫瑰’、‘热带风情’、‘苏瓦娜’、‘伊斯兰达’、‘月光’和‘紫云’22份材料,其中,‘芭芭拉’的MDA含量变幅较大,最大变幅为160.42%;第3类各低温处理间的MDA含量存在显著差异,且总体呈上升或下降或波动变化的趋势,包括‘艾利克斯’、‘安妮艾米特’、‘白蓝星’、‘贝蒂楼’、‘丹泉石’、‘盖瑞’、‘黑美人’、‘康弘’、蓝星睡莲、‘日冕红’、‘圣路易斯金’、‘泰国国王’、‘泰国之星’、‘仙饷’、小花睡莲、‘雪崩’、印度红睡莲和增殖睡莲18份材料,其中,小花睡莲的MDA含量变幅较大,最大变幅为89.58%。

2.2.2 低温处理对游离脯氨酸含量和 SOD 活性的影响 结果(表 3)显示:多数热带睡莲材料叶片的游离脯氨酸含量在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 上下浮动。随着温度降低,可溶性糖含量的变化趋势整体可分为 3 类:第 1 类为稳定型,各低温处理间的游离脯氨酸含量差异不显著,包括埃及白睡莲、‘安妮艾米特’、‘查尔斯托马斯’、‘丹泉石’、‘甘娜’、‘公牛眼’、蓝星睡莲、‘迈阿密玫瑰’、‘瑞秋’和小花睡莲 10 份材料,其中,‘丹泉石’的游离脯氨酸含量变幅较小,总体变幅为 0.68%~3.29%;第 2 类各低温处理间的游离脯氨酸含量存在显著差异,且呈先升后降或先降后升的趋势,包括澳洲蓝巨睡莲、‘白蓝星’、‘保罗蓝’、‘贝蒂楼’、‘蒂娜’、‘粉火烈鸟’、‘盖瑞’、‘黑美人’、‘狐

火’、‘黄金国’、‘康弘’、‘拉萨米’、‘蓝女神’、‘鲁比’、‘潘燮’、‘日冕红’、‘泰国国王’、‘泰国之星’、‘希拉里’、‘仙馐’、‘伊斯兰达’、印度红睡莲、‘月光’、增殖睡莲和‘紫云’ 25 份材料,其中,‘紫云’的游离脯氨酸含量变幅度较大,最大变幅为 177.54%;第 3 类各低温处理间的游离脯氨酸含量存在显著差异,且呈上升或下降或波动变化的趋势,包括‘艾利克斯’、澳洲 IM 睡莲、‘芭芭拉’、‘粉黛’、‘粉钻’、‘红蟹爪’、‘江南风韵’、‘蓝金神蟹人’、‘蓝紫苑’、‘帕拉米’、‘热带风情’、‘圣路易斯金’、‘苏瓦娜’、‘雪崩’和‘血色火焰’ 15 种,其中,‘雪崩’的游离脯氨酸含量变幅度较大,最大变幅为 109.92%。

结果(表 3)还显示:50 份热带睡莲材料的 SOD

表 3 不同低温处理下 50 份热带睡莲材料叶片游离脯氨酸含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性的比较($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Comparison on free proline content and superoxide dismutase (SOD) activity of leaves of 50 tropical water lily materials under different low temperature treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同低温处理下的游离脯氨酸含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$				不同低温处理下的 SOD 活性/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$			
	Free proline content under different low temperature treatments				SOD activity under different low temperature treatments			
	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C
1	91.80±6.38a	88.92±6.23a	86.30±1.22a	94.24±11.52a	70.95±2.67ab	71.13±1.99ab	75.40±4.58a	66.73±0.94b
2	63.24±1.70c	151.12±8.84a	107.39±14.18b	131.10±14.85ab	67.61±1.56a	63.44±3.43a	68.45±1.35a	62.60±4.48a
3	111.16±18.32a	112.42±29.78a	86.73±2.93a	86.58±1.69a	57.13±6.55b	66.91±1.33ab	79.89±3.79a	67.29±8.61ab
4	85.72±5.18c	89.15±1.37c	127.09±7.79b	156.57±9.50a	65.24±1.19a	66.40±6.00a	69.50±1.82a	66.28±4.82a
5	80.49±7.89a	100.09±7.34ab	75.85±11.93b	72.59±6.85b	73.16±3.24a	60.13±16.13a	71.09±3.50a	65.65±2.06a
6	73.54±0.89b	99.58±2.83a	69.52±11.69b	94.53±8.57a	66.94±8.40ab	71.97±1.11a	67.18±7.83ab	55.81±2.28b
7	111.75±10.19b	173.98±10.85a	160.07±10.36a	106.26±8.79b	71.06±3.27a	71.81±1.67a	65.33±0.93b	61.98±0.95b
8	99.43±15.15b	73.25±0.55b	137.20±6.01a	147.97±15.60a	68.93±2.84a	68.06±3.46a	60.69±1.18b	67.91±0.94a
9	76.23±2.60b	129.30±15.54a	176.00±12.98a	151.04±33.77a	75.96±1.25a	59.91±5.12b	61.09±2.46b	69.88±1.41a
10	104.32±12.54a	92.26±5.38a	106.87±16.43a	92.43±11.06a	84.54±3.16a	57.81±2.69b	61.44±6.45b	62.74±2.10b
11	161.12±6.55a	157.92±4.17a	163.12±4.06a	159.00±1.05a	62.74±1.33ab	69.77±3.11a	61.36±4.30b	64.80±1.46ab
12	101.09±5.72b	116.20±0.80a	80.58±4.81c	77.09±8.92c	80.33±5.65a	62.44±2.11bc	57.52±2.27c	66.16±2.61b
13	166.91±12.75a	115.53±7.90bc	133.84±17.40b	97.55±12.85c	61.40±4.49a	60.50±2.88a	59.45±3.55a	65.68±2.95a
14	107.45±6.10ab	129.01±11.75a	105.35±22.16ab	83.53±11.29b	68.28±1.68ab	72.41±3.33a	72.03±4.79a	60.49±3.93b
15	106.90±11.96b	122.58±7.17ab	98.17±6.35b	166.29±32.51a	71.23±6.40a	60.34±2.60b	66.40±3.16ab	67.51±1.68ab
16	84.62±11.16c	132.14±5.02b	172.33±5.75a	76.41±6.71c	75.47±5.03a	67.89±3.28a	69.99±3.20a	72.11±2.18a
17	83.53±12.08a	72.67±12.22a	73.77±15.29a	62.18±6.16a	73.09±2.77a	68.56±1.96a	70.12±0.64a	69.37±1.92a
18	127.01±3.56a	123.13±1.64a	121.51±5.54a	125.82±1.27a	54.61±3.37a	55.27±3.02a	54.36±2.59a	57.93±7.46a
19	94.73±1.32ab	97.32±4.24ab	110.70±13.95a	87.08±0.27b	69.22±2.04b	64.27±2.42b	80.21±1.76a	68.55±3.69b
20	93.06±9.20b	67.16±3.43c	126.10±2.99a	106.20±7.29b	56.40±3.95a	60.33±2.25a	61.63±7.22a	67.50±4.08a
21	132.82±10.22c	184.37±1.95a	156.17±11.00b	149.63±1.75bc	72.21±3.54a	64.32±3.72ab	65.42±5.52ab	59.66±4.42b
22	135.47±5.12b	173.35±2.70a	131.48±3.38b	103.93±6.59c	69.88±2.00a	65.32±3.72a	69.76±2.11a	57.33±2.62b
23	136.05±5.68b	151.06±0.75a	104.45±6.89c	158.20±5.71a	64.95±2.84b	66.58±5.10b	75.25±7.30a	76.92±2.37a
24	111.23±9.52ab	122.01±3.94a	118.53±9.11ab	95.19±11.75b	64.07±1.43b	74.97±4.22a	67.20±1.21b	51.19±2.32c
25	96.12±12.82b	145.33±15.54a	102.09±4.99b	91.03±4.20b	52.24±0.47d	83.68±0.77a	74.40±3.34b	63.89±1.44c
26	72.44±11.31a	60.15±6.69b	76.03±8.91a	75.81±14.97a	66.28±3.66b	66.40±3.94b	62.51±2.68b	71.10±7.26a
27	122.89±10.45c	182.26±5.49b	211.24±4.51a	137.41±11.53c	52.64±3.15c	61.43±2.77b	70.95±1.22a	63.06±3.48b
28	78.61±13.65a	79.75±11.18a	58.16±14.33a	55.62±10.29a	70.22±4.22a	63.90±1.82a	65.46±3.29a	67.13±0.16a
29	166.82±3.74a	131.41±13.29b	125.74±12.22b	87.73±9.47c	76.84±1.59b	88.55±1.43a	63.64±3.16c	54.74±1.25d

续表3 Table 3 (Continued)

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同低温处理下的游离脯氨酸含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)				不同低温处理下的 SOD 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)			
	Free proline content under different low temperature treatments				SOD activity under different low temperature treatments			
	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C	4 °C	0 °C	-6 °C	-12 °C
30	66.24±4.48c	89.75±7.83b	127.52±5.11a	118.36±10.25a	75.07±2.48a	66.11±3.50bc	68.48±2.56b	61.53±0.89c
31	156.78±3.00a	158.05±1.21a	156.00±2.30a	156.24±2.91a	57.70±1.82c	76.81±5.02a	69.82±0.94b	54.89±0.42c
32	98.44±3.11ab	77.33±10.69c	108.69±11.08a	84.15±5.62bc	63.98±1.75a	66.19±7.13a	75.29±3.80a	68.57±2.96a
33	82.73±1.66c	162.45±1.31a	130.66±2.63b	126.66±2.61b	64.42±2.35a	58.19±2.82ab	55.68±3.27b	58.10±2.41ab
34	90.76±6.78bc	79.54±5.29c	106.52±1.15a	99.38±7.63ab	75.58±5.42a	67.04±2.03ab	64.66±2.50b	65.84±4.23ab
35	114.34±6.36ab	102.99±2.86b	124.89±10.44a	128.76±9.49a	66.35±1.84b	69.88±1.15a	69.87±0.03a	66.15±0.42b
36	97.70±2.59a	106.79±10.58a	97.52±2.47a	100.07±0.77a	63.25±1.57b	64.69±3.25b	75.74±3.70a	65.51±0.98b
37	159.28±6.95b	104.76±5.57c	193.26±3.41a	92.04±3.85d	45.97±7.01b	64.77±7.47a	67.62±5.19a	63.06±3.48a
38	84.18±8.90b	119.66±10.88a	117.10±15.62a	126.58±11.26a	68.23±5.18a	76.91±3.94a	44.67±2.07b	52.24±3.36b
39	92.74±8.20b	97.50±6.36b	149.85±5.69a	89.74±4.73b	62.53±4.39a	68.34±0.59a	62.28±5.91a	62.00±2.55b
40	88.30±9.58d	126.26±1.93c	294.27±4.28a	222.59±3.47b	71.33±2.05a	67.27±1.99ab	70.99±3.05a	58.75±1.66b
41	115.45±10.11a	177.69±11.54b	110.81±2.05b	83.19±7.60c	72.91±0.69a	77.44±6.27a	76.68±1.07a	78.26±2.31a
42	118.82±0.59c	121.96±3.41c	164.99±6.47a	137.66±6.76b	66.25±1.57a	64.36±1.54a	68.74±3.70a	58.51±0.98b
43	140.88±7.58a	123.74±11.86a	121.14±14.25a	149.08±11.78a	69.64±2.01ab	66.39±2.12b	72.88±0.74a	61.89±1.96c
44	76.69±6.86c	135.69±14.21b	114.24±11.04b	160.99±5.00a	73.88±2.00a	65.99±2.60b	73.76±2.11a	64.66±4.42b
45	110.63±6.87c	72.94±2.63d	134.53±1.79a	122.31±2.12b	72.96±7.36a	76.72±5.28a	74.24±6.65a	79.62±3.01a
46	58.07±7.46d	93.05±10.86c	160.46±2.84a	127.38±1.74b	68.64±1.90b	75.85±4.52a	75.22±3.69a	69.53±1.08b
47	93.29±5.06b	166.79±8.74a	91.40±9.00b	76.76±1.19b	62.92±0.56b	57.06±3.52b	70.83±2.28a	60.18±2.21b
48	105.17±5.10bc	128.32±9.64b	160.25±19.33a	99.76±0.00c	62.10±3.94a	60.32±0.72a	63.62±4.35a	61.89±1.85a
49	76.13±2.66bc	121.58±0.98a	87.99±11.07b	67.85±4.71c	69.43±2.17b	69.60±2.17b	78.34±4.21a	75.03±2.44ab
50	60.07±13.37bc	166.72±1.68a	112.57±8.63b	67.69±6.87bc	78.94±4.02ab	83.85±1.97a	71.82±9.82ab	65.20±3.32b

1) 同一指标同行中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row of the same index indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2) 1: 埃及白睡莲 *Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow; 2: ‘艾利克斯’ ‘Alexis’; 3: ‘安妮艾米特’ ‘Anne Emmet’; 4: 澳洲 IM 睡莲 *N. immutabilis* subsp. *immutabilis*; 5: 澳洲蓝巨睡莲 *N. gigantea* Hook.; 6: ‘芭芭拉’ ‘Barbara Barnette’; 7: ‘白蓝星’ ‘White Colorata’; 8: ‘保罗蓝’ ‘Paul Stetson’; 9: ‘贝蒂楼’ ‘Betty Lou’; 10: ‘查尔斯托马斯’ ‘Charles Thomas’; 11: ‘丹泉石’ ‘Tanzanite’; 12: ‘蒂娜’ ‘Tina’; 13: ‘粉黛’ ‘Fen Dai’; 14: ‘粉火烈鸟’ ‘Pink Flamingo’; 15: ‘粉钻’ ‘Pink Diamond’; 16: ‘盖瑞’ ‘Gary’; 17: ‘甘娜’ ‘Madame Ganna Walska’; 18: ‘公牛眼’ ‘Bull’s Eye’; 19: ‘黑美人’ ‘Murasaki Shikibu’; 20: ‘红蟹爪’ ‘Nangkwa Red’; 21: ‘狐火’ ‘Foxfire’; 22: ‘黄金国’ ‘Eidorado’; 23: ‘江南风韵’ ‘Southern Charm’; 24: ‘康弘’ ‘Yasuhiro’; 25: ‘拉萨米’ ‘Rassamee jan’; 26: ‘蓝金神蟹人’ ‘Blue Gold Crab Man’; 27: ‘蓝女神’ ‘Wood’s Blue Goddess’; 28: 蓝星睡莲 *N. colorata* Peter; 29: ‘蓝紫苑’ ‘Blue Aster’; 30: ‘鲁比’ ‘Ruby’; 31: ‘迈阿密玫瑰’ ‘Miami Rose’; 32: ‘帕拉米’ ‘Paramee’; 33: ‘潘燮’ ‘Poosub’; 34: ‘热带风情’ ‘Tropic Punch’; 35: ‘日冕红’ ‘Corona Red’; 36: ‘瑞秋’ ‘Rachell Presnell’; 37: ‘圣路易斯金’ ‘St. Louis Gold’; 38: ‘苏瓦娜’ ‘Suwanna’; 39: ‘泰国国王’ ‘King of Siam’; 40: ‘泰国之星’ ‘Star of Siam’; 41: ‘希拉里’ ‘Hilary’; 42: ‘仙饌’ ‘Ambrosia’; 43: 小花睡莲 *N. micrantha* Guill. et Perr.; 44: ‘雪崩’ ‘Avalanche’; 45: ‘血色火焰’ ‘Scarlet Flame’; 46: ‘伊斯兰达’ ‘Islamorada’; 47: 印度红睡莲 *N. rubra* Roxb. ex Andrews; 48: ‘月光’ ‘Moon Beam’; 49: 增殖睡莲 *N. prolifera* Wiersema; 50: ‘紫云’ ‘Purple Cloud’.

活性差异不大,数值较为集中。随着温度降低,可溶性糖含量的变化趋势整体可分为3类:第1类为稳定型,各低温处理间的 SOD 活性差异不显著,包括‘艾利克斯’、澳洲 IM 睡莲、澳洲蓝巨睡莲、‘粉黛’、‘盖瑞’、‘甘娜’、‘公牛眼’、‘红蟹爪’、蓝星睡莲、‘帕拉米’、‘希拉里’、‘血色火焰’和‘月光’13份材料,其中,‘月光’的 SOD 活性变幅较小,总体变幅为 0.34%~5.47%;第2类各低温处理间的 SOD 活性存在显著差异,且呈先升后降或先降后的趋势,包括埃及白睡莲、‘安妮艾米特’、‘芭芭拉’、‘白蓝星’、‘保罗蓝’、‘贝蒂楼’、‘查尔斯托马斯’、‘蒂娜’、‘粉火烈鸟’、‘粉钻’、‘康弘’、‘拉萨米’、‘蓝女神’、‘蓝紫苑’、‘迈阿密玫瑰’、‘潘燮’、‘热带风情’、‘日冕

红’、‘瑞秋’、‘圣路易斯金’、‘泰国国王’、‘伊斯兰达’、增殖睡莲和‘紫云’24份材料,其中,‘蓝紫苑’的 SOD 活性变幅度较大,最大变幅为 61.76%;第3类各低温处理间的 SOD 活性存在显著差异,且呈上升或下降或波动变化的趋势,包括‘丹泉石’、‘黑美人’、‘狐火’、‘黄金国’、‘江南风韵’、‘蓝金神蟹人’、‘鲁比’、‘苏瓦娜’、‘泰国之星’、‘仙饌’、小花睡莲、‘雪崩’和印度红睡莲13份材料,其中,‘黑美人’的 SOD 活性变幅度较大,最大变幅为 24.80%。

2.3 相关性分析

基于50份热带睡莲材料的半致死温度 (LT_{50}) 在 3.69 °C ~ -5.85 °C 范围内,选取 4 °C、0 °C 和 -6 °C 低温处理下各生理生化指标的均值进行相关性分析,结

果见表 4。结果显示:热带睡莲材料的 LT_{50} 值与可溶性糖含量、丙二醛(MDA)含量、游离脯氨酸含量呈极显著正相关,与超氧化物歧化酶(SOD)活性呈极显著负相关,相关系数分别为 0.460、0.578、0.395 和 -0.440。MDA 含量与可溶性糖含量呈极显著正相关,与游离脯氨酸含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.468 和 0.350。表明热带睡莲会通过多种生理生化反应来应对低温胁迫,且部分生理生化指标间存在显著关联性。

2.4 聚类分析

半致死温度(LT_{50})是衡量植物耐寒性的重要依据,因此选 LT_{50} 值作为重要筛选因子,同时为避免产

表 4 低温处理下 50 份热带睡莲材料生理生化指标间的相关系数¹⁾
Table 4 Correlation coefficients among physiological and biochemical indexes of 50 tropical water lily materials under low temperature treatment¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	LT_{50}	SS	MDA	Pro	SOD
LT_{50}	1.000				
SS	0.460 **	1.000			
MDA	0.578 **	0.468 **	1.000		
Pro	0.395 **	0.141	0.350 *	1.000	
SOD	-0.440 **	-0.274	-0.210	-0.160	1.000

¹⁾ LT_{50} : 半致死温度 Semi-lethal temperature; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; MDA: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; Pro: 游离脯氨酸含量 Free proline content; SOD: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 5 基于生理生化指标的 50 份热带睡莲材料的 k 均值聚类分析

Table 5 k-means cluster analysis on 50 tropical water lily materials based on physiological and biochemical indexes

类别 Cluster	材料 ¹⁾ Material ¹⁾	各指标在不同低温处理下的均值 ²⁾ Average of each index under different low temperature treatments ²⁾			
		LT_{50}	SS	MDA	SOD
		I	18, 24, 27, 31, 33, 37, 38, 47	1.05	34.92
II	2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 21, 40, 42, 43, 44	-0.69	33.66	24.59	66.20
III	4, 5, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 22, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 35, 36, 39, 48	-3.16	26.64	14.24	66.42
IV	1, 16, 17, 19, 23, 29, 41, 45, 46, 49, 50	-3.94	24.66	14.73	72.52

¹⁾ 1: 埃及白睡莲(*Nymphaea lotus* (Linn.) Willdenow; 2: ‘艾利克斯’ ‘Alexis’; 3: ‘安妮艾米特’ ‘Anne Emmet’; 4: 澳洲 IM 睡莲 *N. immutabilis* subsp. *immutabilis*; 5: 澳洲蓝巨睡莲 *N. gigantea* Hook.; 6: ‘芭芭拉’ ‘Barbara Barnette’; 7: ‘白蓝星’ ‘White Colorata’; 8: ‘保罗蓝’ ‘Paul Stetson’; 9: ‘贝蒂楼’ ‘Betty Lou’; 10: ‘查尔斯托马斯’ ‘Charles Thomas’; 11: ‘丹泉石’ ‘Tanzanite’; 12: ‘蒂娜’ ‘Tina’; 13: ‘粉黛’ ‘Fen Dai’; 14: ‘粉火烈鸟’ ‘Pink Flamingo’; 15: ‘粉钻’ ‘Pink Diamond’; 16: ‘盖瑞’ ‘Gary’; 17: ‘甘娜’ ‘Madame Ganna Walska’; 18: ‘公牛眼’ ‘Bull’s Eye’; 19: ‘黑美人’ ‘Murasaki Shikibu’; 20: ‘红蟹爪’ ‘Nangkwa Red’; 21: ‘狐火’ ‘Foxfire’; 22: ‘黄金国’ ‘Eidorado’; 23: ‘江南风韵’ ‘Southern Charm’; 24: ‘康弘’ ‘Yasuhiro’; 25: ‘拉萨米’ ‘Rassamee jan’; 26: ‘蓝金神蟹人’ ‘Blue Gold Crab Man’; 27: ‘蓝女神’ ‘Wood’s Blue Goddess’; 28: 蓝星睡莲 *N. colarata* Peter; 29: ‘蓝紫苑’ ‘Blue Aster’; 30: ‘鲁比’ ‘Ruby’; 31: ‘迈阿密玫瑰’ ‘Miami Rose’; 32: ‘帕拉米’ ‘Paramee’; 33: ‘潘曼’ ‘Poosub’; 34: ‘热带风情’ ‘Tropic Punch’; 35: ‘日冕红’ ‘Corona Red’; 36: ‘瑞秋’ ‘Rachell Presnell’; 37: ‘圣路易斯金’ ‘St. Louis Gold’; 38: ‘苏瓦娜’ ‘Suwanna’; 39: ‘泰国国王’ ‘King of Siam’; 40: ‘泰国之星’ ‘Star of Siam’; 41: ‘希拉里’ ‘Hilary’; 42: ‘仙饌’ ‘Ambrosia’; 43: 小花睡莲 *N. micrantha* Guill. et Perr.; 44: ‘雪崩’ ‘Avalanche’; 45: ‘血色火焰’ ‘Scarlet Flame’; 46: ‘伊斯兰达’ ‘Islamorada’; 47: 印度红睡莲 *N. rubra* Roxb. ex Andrews; 48: ‘月光’ ‘Moon Beam’; 49: 增殖睡莲 *N. prolifera* Wiersema; 50: ‘紫云’ ‘Purple Cloud’.

²⁾ LT_{50} : 半致死温度 Semi-lethal temperature ($^{\circ}\text{C}$); SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); MDA: 丙二醛含量 Malondialdehyde content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); SOD: 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$).

生大的误差,选用与 LT_{50} 值的相关系数绝对值大于 0.4 的指标[可溶性糖含量、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性]作为 k 均值聚类分析的依据,结果(表 5)显示:50 份材料聚为 I、II、III、IV 4 类。

I 类为不耐寒型,包括‘公牛眼’、‘康弘’、‘蓝女神’、‘迈阿密玫瑰’、‘潘曼’、‘圣路易斯金’、‘苏瓦娜’和印度红睡莲 8 份材料。 LT_{50} 值大多高于 0°C , 均值为 1.05°C ;可溶性糖含量的均值最大,MDA 含量的均值较大,SOD 活性的均值最小。

II 类为弱耐寒型,包括‘艾利克斯’、‘安妮艾米特’、‘芭芭拉’、‘丹泉石’、‘蒂娜’、‘粉黛’、‘粉红烈鸟’、‘狐火’、‘泰国之星’、‘仙饌’、小花睡莲和‘雪崩’ 12 份材料。 LT_{50} 值在 $-3.74^{\circ}\text{C} \sim 3.02^{\circ}\text{C}$ 之间,均值为 -0.69°C ,除‘丹泉石’、‘粉黛’和‘泰国之星’外,该类其他材料的 LT_{50} 值均低于 0°C ;可溶性糖含量的均值较大,MDA 含量的均值最大,SOD 活性的均值较小。

III 类为中等耐寒型,包括澳洲 IM 睡莲、澳洲蓝巨睡莲、‘白蓝星’、‘保罗蓝’、‘贝蒂楼’、‘查尔斯托马斯’、‘粉钻’、‘红蟹爪’、‘黄金国’、‘拉萨米’、‘蓝金神蟹人’、蓝星睡莲、‘鲁比’、‘帕拉米’、‘热带风情’、‘日冕红’、‘瑞秋’、‘泰国国王’和‘月光’ 19 份材料。 LT_{50} 均值为 -3.16°C ,仅‘日冕红’的 LT_{50} 值高于 0°C ,该类其他材料的 LT_{50} 值大多低于 -2°C ;可溶

性糖和 MDA 含量的均值较小, SOD 活性的均值较大。

IV类为强耐寒型,包括埃及白睡莲、‘盖瑞’、‘甘娜’、‘黑美人’、‘江南风韵’、‘蓝紫苑’、‘希拉里’、‘血色火焰’、‘伊斯兰达’、增殖睡莲和‘紫云’11份材料; LT_{50} 值在 $-5.85\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -1.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,均值为 $-3.94\text{ }^{\circ}\text{C}$;可溶性糖和 MDA 含量的均值较小, SOD 活性的均值最大。

总体上看,耐寒性越强的材料的可溶性糖和 MDA 含量越低, SOD 活性越高。

3 讨论和结论

传统的植物耐寒性测定方法通常将半致死温度或某种单一指标作为评价依据^[17-18],例如在葡萄(*Vitis vinifera* Linn.)^[19]、杜鹃花(*Rhododendron simsii* Planch.)^[20]和鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)^[21]的耐寒性比较研究中均利用电解质外渗法测定半致死温度,证明半致死温度均值作为植物耐寒性基本指标具有可靠性^[22]。然而,尽管半致死温度可以在一定程度上反映植物抗寒性,但植物抗寒能力是植物体内多物质参与抗逆反应的综合作用的结果^[23],并不由单一因子决定^[24],植物的耐寒性也会受到其他因子影响。相关实验结果表明:可溶性糖含量^[25]、丙二醛(MDA)含量^[26]、超氧化物歧化酶(SOD)活性^[27]均与植物的抗寒性密切相关^[28]。本研究结果显示:‘查尔斯托马斯’按照其半致死温度 $-5.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 来判断应属于耐寒性较强的材料,然而其 SOD 活性在低温胁迫中表现出显著下降的趋势,最大降幅达到 31.62%,可能是由于细胞中的功能蛋白受到低温破坏,在低温环境中调节能力较弱,无法适应低温环境^[29]。同样,‘希拉里’半致死温度为 $-1.77\text{ }^{\circ}\text{C}$,初步判断其耐寒性一般,然而其 MDA 含量在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温胁迫中无显著差异,说明其细胞质膜受到低温胁迫损害较小,在低温下可继续发挥活性氧清除系统的作用,能较好地适应低温环境^[30-31]。

相关性分析结果显示:热带睡莲材料的 MDA 含量与可溶性糖含量呈极显著正相关。二者都通过细胞渗透调节^[32]与酶活性^[33]参与低温胁迫反应。从整体变化趋势看,随着温度从 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$,在实验初期阶段,各材料为了应对低温胁迫,选择水解更多淀粉提高细胞的渗透压^[34],同时低温使活性氧

清除系统的酶活性降低,导致材料在该阶段逐渐积累了大量的 MDA 和可溶性糖;在实验后期由于胁迫加剧,植物细胞膜因结构遭到破坏而透性丧失,无法维持细胞正常生理功能^[35],导致该阶段材料的 MDA 和可溶性糖含量下降或产生波动;有些耐寒性较差的材料,在实验初期 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时细胞结构就遭到严重低温破坏^[36],其 MDA 或可溶性糖含量在实验初期剧增至顶峰,后呈持续下降趋势,如‘蓝女神’和‘泰国之星’等。而耐寒性较强的材料,水解反应相对稳定,细胞维持原有的代谢机制便可以应对胁迫,在整个降温过程中 MDA 和可溶性糖含量均无显著变化,如埃及白睡莲和‘红蟹爪’等。说明耐寒性较强的材料的 MDA 和可溶性糖含量大多处于较低水平。

通过比较半致死温度可以得出热带睡莲材料的耐寒性,但结果带有局限性,无法实现更系统、更科学的分级。为了克服单一指标的缺陷,进一步指导热带睡莲的生产推广,本研究在前人研究的基础上^[37-38],采用相关性分析筛选出与半致死温度关联度较高的 3 个指标,即可溶性糖含量、MDA 含量和 SOD 活性,基于上述 4 个生理生化指标进行 k 均值聚类分析,建立的评价体系能更全面地反映植物的真实抗寒能力。本研究结果显示:50 份热带睡莲材料可分为不耐寒型、弱耐寒型、中等耐寒型和强耐寒型 4 类,总体上看,耐寒性越强的材料的可溶性糖和 MDA 含量越低, SOD 活性越高。其中,埃及白睡莲表现出强耐寒性,‘狐火’表现为弱耐寒性,这一结论与吉琴^[39]的研究结果相似。依据研究测定的半致死温度及评价体系,结合中国气候地理相关研究,可为不同地区引种耐寒性的热带睡莲提供参考。

此外,由于本文研究的是 50 份热带睡莲离体叶片在人工低温处理下的生理生化反应,与整个植株在自然低温下的生理生化反应有一定的差距,并且没有对低温下发生的生理生化反应进行全面研究,不能代替复杂自然条件下的低温情况。因此,热带睡莲种质资源在全国范围内的引种栽培应根据当地的养护条件以及田间种植试验数据,调整不同热带睡莲的养护措施,具体还有待后续的深入研究。

参考文献:

- [1] 黄国振,邓惠勤,李祖修,等.睡莲[M].北京:中国林业出版社,2008:3-10.
- [2] 吉建斌,李清清,赵广胜,等.京津冀地区睡莲栽培技术[J].现代农业科技,2014(23):178-179.

- [3] 吴问广,董林林,陈士林.药用植物分子育种研究方向探讨[J].中国中药杂志,2020,45(11):2714-2719.
- [4] 黄国振,邓惠勤,邹秀文.热带睡莲简易人工杂交授粉技术[J].中国花卉盆景,1998(7):16-17.
- [5] 李淑娟,尉倩,陈尘,等.中国睡莲属植物育种研究进展[J].植物遗传资源学报,2019,20(4):829-835.
- [6] 袁茹玉.不同品种睡莲花挥发物组成及其茶汤功能成分和抗氧化活性评价[D].南京:南京农业大学,2014:16-17.
- [7] 董柳青.香水莲花提取物调节脂代谢作用研究[D].杭州:浙江大学,2017:15-17.
- [8] 王微.香水莲花提取物改善阿尔兹海默症学习记忆能力的作用研究[D].杭州:浙江大学,2019:31-41.
- [9] 贾建华.美丽的水质净化能手——睡莲[J].中国花卉盆景,2003(8):13.
- [10] 李妙,龙岳林,姚季伦,等.4种观赏性水生植物对居住区水体的净化效果[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2010,36(2):115-119.
- [11] RUSNAM, EFRIZAL. The ability of water plants to reduce the level of mercury pollution in water quality in irrigation [J]. International Journal of Waste Resources, 2016, 6(2): 1000225.
- [12] 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.
- [13] 赵亚洲,卓丽环,张琰.2种红枫的高温半致死温度与耐热性[J].上海农业学报,2006,22(2):51-53.
- [14] 王妍,胡胜,付文成,等.一种快速测定可溶性糖的新方法:TBA法[J].井冈山大学学报(自然科学版),2013,34(3):37-40.
- [15] 张殿忠,汪沛洪,赵会贤.测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法[J].植物生理学通讯,1990(4):62-65.
- [16] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:163-165.
- [17] 和红云,田丽萍,薛琳.植物抗寒性生理生化研究进展[J].天津农业科学,2007,13(2):10-13.
- [18] 许瑛,陈发棣.菊花8个品种的低温半致死温度及其抗寒适应性[J].园艺学报,2008,35(4):559-564.
- [19] 白茹,高登涛,刘怀锋,等.电导法协同Logistic方程比较12个葡萄砧木的抗寒性[J].石河子大学学报(自然科学版),2014,32(5):657-660.
- [20] 刘冰,曹莎,周泓,等.杜鹃花品种耐寒性比较及其机制研究[J].园艺学报,2016,43(2):295-306.
- [21] 王冠群,李丹青,张佳平,等.德国鸢尾6个品种的耐寒性比较[J].园艺学报,2014,41(4):773-780.
- [22] 丁红映,王明,谢洁,等.植物低温胁迫响应及研究方法进展[J].江苏农业科学,2019,47(14):31-36.
- [23] WANG L H, LI X, LIU W, et al. A study on resistance and purifying ability of SO₂ on four warm-season turfgrasses [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(1): 225-233.
- [24] 王钦.低温对草坪植物生命过程的影响[J].草业科学,1993,10(4):62-65.
- [25] 彭金光,孙玉宏,师瑞红,等.10℃低温对西瓜幼苗耐性生理指标的影响[J].安徽农学通报,2006,12(10):42-45.
- [26] 薛延丰,刘兆普.钙离子对海盐和NaCl胁迫下菊芋幼苗生理特征的响应[J].水土保持学报,2006,20(3):177-181.
- [27] WEI Z W, WANG D X, HE L C. Effect of superoxide dismutase on cold acclimation of alfalfa [J]. Pratactural Science, 2006, 23(7): 15-18.
- [28] 谢丽芬.葡萄砧木抗寒性鉴定及抗寒机理的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007:25-37.
- [29] 房用,李秀芬,慕宗昭,等.茶树抗寒性研究进展[J].经济林研究,2004,22(2):69-72.
- [30] 苏明洁,蔡仕珍,邓辉茗,等.镉和酸雨对苦楝幼苗细胞膜透性及渗透调节物质含量的影响[J].环境科学学报,2017,37(11):4436-4443.
- [31] UEMURA M, TOMINAGA Y, NAKAGAWARA C, et al. Responses of the plasma membrane to low temperatures [J]. Physiologia Plantarum, 2006, 126: 81-89.
- [32] 潘崇环.植物的抗寒性[J].生物学通报,1964(6):1-3.
- [33] 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.
- [34] 彭金光,孙玉宏,师瑞红,等.10℃低温对西瓜幼苗耐性生理指标的影响[J].安徽农学通报,2006,12(10):42-45.
- [35] 江福英,李延,翁伯琦.植物低温胁迫及其抗性生理[J].福建农业学报,2002,17(3):190-195.
- [36] 王瑞,马凤鸣,李彩凤,等.低温胁迫对玉米幼苗脯氨酸、丙二醛含量及电导率的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(5):20-23.
- [37] 黄祥,楚光明,徐迎春,等.2种睡莲不同部位对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J].江苏农业科学,2022,50(9):128-134.
- [38] 张尚雄,尼玛平措,徐雅梅,等.3个披碱草属牧草对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J].草业科学,2016,33(6):1154-1163.
- [39] 吉琴.低温胁迫对不同热带睡莲品种抗寒生理的影响[J].上海农业学报,2016,32(5):114-118.

(责任编辑:郭严冬)