

杨梅花,黄 祥,韩彦奇,等. 8 种睡莲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(23):123–128.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.23.018

# 8 种睡莲对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价

杨梅花<sup>1</sup>,黄 祥<sup>1</sup>,韩彦奇<sup>1</sup>,郭佳星<sup>1</sup>,李卓怡<sup>1</sup>,钟 敏<sup>2</sup>,徐迎春<sup>3</sup>,刘长青<sup>4</sup>

(1. 石河子大学农学院,新疆石河子 832003; 2. 石河子市园林研究所,新疆石河子 832003;

3. 南京农业大学园艺学院/农业农村部景观设计重点实验室,江苏南京 210095;

4. 新疆生产建设兵团林业和草原资源监测中心,新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:**为探究睡莲对低温胁迫的生理响应及其抗寒性,研究以 4 种耐寒睡莲:伊丽莎白睡莲(*N. ‘Princess Elizabeth’*)、雪白睡莲(*N. candida*)、科罗拉多睡莲(*N. ‘Colorado’*)、墨西哥黄睡莲(*N. mexicana* Zucc.), 4 种热带睡莲:黑美人睡莲(*N. ‘Black Beauty’*)、蒂娜睡莲(*N. ‘Tina’*)、九品香睡莲(*N. ‘hybrid’*)、伊斯兰达睡莲(*N. ‘Islamorada’*)的离体叶片为试验材料。在 10、5、0、-5 °C 低温胁迫下分别处理 4 h,以 15 °C 为对照,共 5 个温度梯度。通过测定相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、可溶性糖(SS)含量、可溶性蛋白(SP)含量、叶绿素(Chl)含量等生理指标,用隶属函数法对 8 种睡莲抗寒性进行综合评价。结果表明,REC 和 MDA 含量随温度降低均有不同程度的增幅,抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性和渗透调节物质(SS、SP)含量呈先升后降的趋势,Chl 含量持续降低。综合评价 8 种睡莲抗寒能力强弱依次为:科罗拉多>雪白睡莲>伊丽莎白>墨西哥黄、伊斯兰达、黑美人>九品香>蒂娜。

**关键词:**耐寒睡莲;热带睡莲;低温胁迫;抗寒性;隶属函数法

**中图分类号:**S682.320.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)23-0123-06

睡莲为睡莲科(Nymphaeaceae)睡莲属(*Nymphaea* L.)多年生水生植物,在多个领域被广泛应用<sup>[1]</sup>,具有观赏性<sup>[2]</sup>、食用性<sup>[3]</sup>、药用性<sup>[4]</sup>和生态修复<sup>[5-6]</sup>等重要的经济价值。根据其生态习性,可分为耐寒睡莲(hardy waterlily)和热带睡莲(tropical waterlily)。其中耐寒睡莲具有较高的抗寒性,主要分布在 20°N 以北的地域<sup>[7]</sup>,而热带睡莲主要分布于热带地区,其在花色、气味、用途上均优于耐寒睡莲,但耐寒能力差,在北方地区不能露地越冬,是限制其在北方地区引种栽培的主要因素。

在低温胁迫下,植物细胞的各项生理指标等会发生显著变化<sup>[8]</sup>。同时,植物的抗寒性由多个因素综合控制,抗寒机制复杂,抗寒性评价必须是多方面的<sup>[9]</sup>。目前,关于水生植物对低温胁迫的响应及抗寒性评价的研究颇多。梁雪等通过综合比较各

指标,得到了 3 种湿地植物的耐寒性强弱<sup>[10]</sup>。李欣等发现,荷花不同品种对低温胁迫的响应能力有一定差异<sup>[11]</sup>。吉琴针对 6 种睡莲叶片相关生理指标在低温胁迫下的变化特征,探讨了热带睡莲种间的抗寒性差异<sup>[12]</sup>。而针对不同生态类型睡莲的抗寒性生理研究及抗寒性综合评价却鲜有报道。

本研究以 4 种耐寒睡莲,雪白睡莲(*N. candida*)、伊丽莎白(*N. ‘Princess Elizabeth’*)、科罗拉多(*N. ‘Colorado’*)、墨西哥黄(*N. mexicana* Zucc.), 4 种热带睡莲黑美人(*N. ‘Black Beauty’*)、蒂娜(*N. ‘Tina’*)、九品香(*N. ‘hybrid’*)、伊斯兰达(*N. ‘Islamorada’*)为试验材料,在低温胁迫下测定其叶片相关生理指标,研究 8 种睡莲对低温胁迫的生理响应机制差异,并建立抗寒性综合评价体系,以期为睡莲的推广应用和选育抗寒性强的睡莲种质提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2021 年在石河子大学进行,地理坐标 86°3'9"E,44°17'49"N 附近,海拔 430 m。试验区年平均气温 7~8 °C,年日照 2 300~2 700 h,年降水量

收稿日期:2022-01-28

基金项目:石河子大学新品种培育专项(编号:YZZX202105);石河子大学高层次人才科研启动资金(编号:RCZK2018C04)。

作者简介:杨梅花(1979—),女,新疆石河子人,博士,副教授,从事园林植物逆境生理及分子育种研究。E-mail:ymh\_agr@shzu.edu.cn。  
通信作者:刘长青,高级农艺师,从事植物资源利用与有害生物防治研究。E-mail:btylq@163.com。

180 ~ 270 mm。

1.2 试验材料

试验共选用 4 种耐寒睡莲、4 种热带睡莲,其中雪白睡莲为分布在我国新疆的原生种(表 1)。8 种睡莲于 2021 年 4 月采用温室内自然光照的盆栽方式培养,盆深 50 cm,口径 45 cm,正常水肥管理,当植株长至 9 ~ 11 张叶片时,选取长势良好的植株,取样进行低温处理。

表 1 参试睡莲材料基本信息

名称	学名	类型
伊丽莎白	<i>N. ‘Princess Elizabeth’</i>	耐寒睡莲
雪白睡莲	<i>N. candida</i>	耐寒睡莲
科罗拉多	<i>N. ‘Colorado’</i>	耐寒睡莲
墨西哥黄	<i>N. mexicana</i> Zucc.	耐寒睡莲
黑美人	<i>N. ‘Black Beauty’</i>	热带睡莲
蒂娜	<i>N. ‘Tina’</i>	热带睡莲
九品香	<i>N. ‘hybrid’</i>	热带睡莲
伊斯拉达	<i>N. ‘Islamorada’</i>	热带睡莲

1.3 试验方法

本试验选取长势相同的浮水功能叶,取离体叶片,在 10、5、0、-5 ℃低温胁迫下分别处理 4 h,以 15 ℃为对照,共 5 个温度梯度,每处理重复 3 次。处理后的试验材料分为 2 个部分,一份叶片剪碎后测定电导率(REC)和叶绿素(Chl)含量指标,另一份液氮冻存后置于 -80 ℃保存,测定叶片丙二醛(MDA)含量、酶活性、可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)含量。

1.4 项目测定

相对电导率的测定采用电导仪法<sup>[13]</sup>;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[13]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性的测定分别采用氮蓝四唑还原法、愈创木酚法和紫外吸收法<sup>[13]</sup>;可溶性糖、可溶性蛋白含量的测定分别采用蒽酮比色法和考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[14]</sup>;叶绿素含量测定采用分光光度法<sup>[14]</sup>。

1.5 数据分析

通过隶属函数法计算各指标的隶属函数值,抗寒性负相关的参数(REC、MDA 含量)采用降型分布函数: $U(X_{ijk}) = (X_{\max} - X_{ijk}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,与抗寒性呈正相关的参数(叶绿素、SS、SP 含量, SOD、POD、CAT 酶活性)采用升型分布函数: $U(X_{ijk}) = (X_{ijk} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ <sup>[15]</sup>。隶属函数值乘以相

应的权重,累加求和得出综合评价值。运用 SPSS 22.0 对数据进行处理,采用 Excel 2016 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对睡莲细胞膜透性的影响

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 REC 均呈上升趋势。在对照处理 15 ℃下,8 种睡莲叶片 REC 均保持在 20% ~ 30%。在 -5 ℃低温胁迫时,8 种睡莲叶片 REC 达到最大值,其中九品香睡莲叶片 REC 最大,为 84%,雪白睡莲叶片 REC 最小,为 67%。其中雪白睡莲叶片的 REC 在 -5 ℃低温胁迫下均小于其他 7 种睡莲叶片。8 种睡莲叶片 REC 达到最大值时相比对照增幅为蒂娜(225.0%) > 伊丽莎白(221.7%) > 雪白睡莲(204.5%) > 伊斯拉达(200.0%) > 科罗拉多(196.0%) > 九品香(189.7%) > 墨西哥黄(180.8%) > 黑美人(158.1%)(图 1-A)。

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 MDA 含量均呈上升趋势。在对照 15 ℃处理下,8 种睡莲叶片 MDA 含量保持在 0.03 ~ 0.05 μmol/g FW。在 -5 ℃低温胁迫时,8 种睡莲叶片 MDA 含量达到最大值,蒂娜睡莲叶片 MDA 含量最大,为 0.24 μmol/g FW,雪白睡莲叶片最小,为 0.14 μmol/g FW。其中雪白睡莲叶片的 MDA 含量在低温胁迫下均小于其他 7 种睡莲。8 种睡莲叶片 MDA 含量达到最大值时相比对照增幅为蒂娜(500.0%) > 伊斯拉达(475.0%) > 伊丽莎白(466.7%) > 黑美人(375.0%) > 雪白睡莲(366.7%) > 九品香(360.0%) > 科罗拉多、墨西哥黄(300.0%)(图 1-B)。

2.2 低温胁迫对睡莲抗氧化酶活性的影响

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 SOD 酶活性均呈先升后降趋势。九品香睡莲叶片在 5 ℃低温胁迫时 SOD 活性最大,其余睡莲在 10 ℃低温胁迫时 SOD 活性最大。8 种睡莲叶片 SOD 酶活性最大值均不同,雪白睡莲叶片 SOD 酶活性最大值最大,为 673.46 U/g FW,九品香睡莲叶片 SOD 酶活性最大值最小,为 454.99 U/g FW。8 种睡莲叶片 SOD 酶活性在达到最大值时相比对照增幅为雪白睡莲(33.6%) > 九品香(19.3%) > 蒂娜(18.7%) > 墨西哥黄(18.7%) > 黑美人(13.7%) > 伊丽莎白(13.0%) > 伊斯拉达(11.8%) > 科罗拉多(11.7%)(图 2-A)。

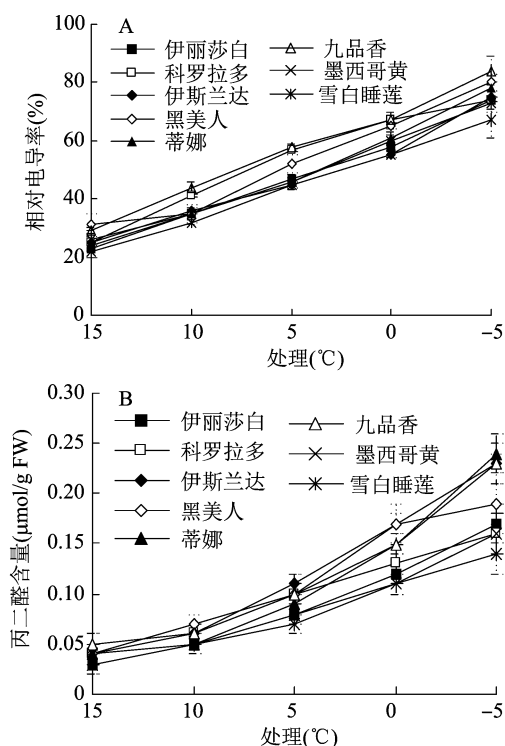


图1 低温处理下不同睡莲叶片的 REC、MDA 含量

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 POD 酶活性均呈先升后降趋势。在 10 °C 低温胁迫时,伊丽莎白、科罗拉多、伊斯拉达、九品香、墨西哥黄、雪白睡莲叶片 POD 酶活性达最大,黑美人、蒂娜睡莲叶片在 5 °C 低温胁迫时酶活性最大。8 种睡莲叶片 POD 酶活性最大值均不同,伊丽莎白睡莲叶片 POD 酶活性最大值最大,为 329.49 U/(g FW · min),九品香睡莲叶片 POD 酶活性最大值最小,为 152.05 U/(g FW · min)。8 种睡莲叶片 POD 酶活性在达到最大值时相比对照增幅为雪白睡莲 (56.7%) > 蒂娜 (53.9%) > 伊丽莎白 (36.1%) > 科罗拉多 (25.4%) > 伊斯拉达 (23.0%) > 墨西哥黄 (21.9%) > 黑美人 (21.3%) > 九品香 (18.8%) (图 2 - B)。

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 CAT 酶活性均呈先升后降趋势。伊斯拉达、九品香睡莲叶片在 10 °C 低温胁迫时 CAT 酶活性最大,其余睡莲叶片在 5 °C 低温胁迫时酶活性最大。8 种睡莲叶片 CAT 酶活性最大值均不同,雪白睡莲叶片 CAT 酶活性最大值最大,为 3 532.54 μmol/g FW,蒂娜睡莲叶片 CAT 酶活性最大值最小,为 2 471.91 μmol/g FW。8 种睡莲叶片 CAT 酶活性在达到最大值时相比对照增幅为雪白睡莲 (51.8%) > 黑美人 (40.4%) > 伊斯拉达 (38.0%) > 科罗拉多 (34.7%) > 伊丽莎白

(28.7%) > 九品香 (23.0%) > 墨西哥黄 (19.0%) > 蒂娜 (3.8%) (图 2 - C)。

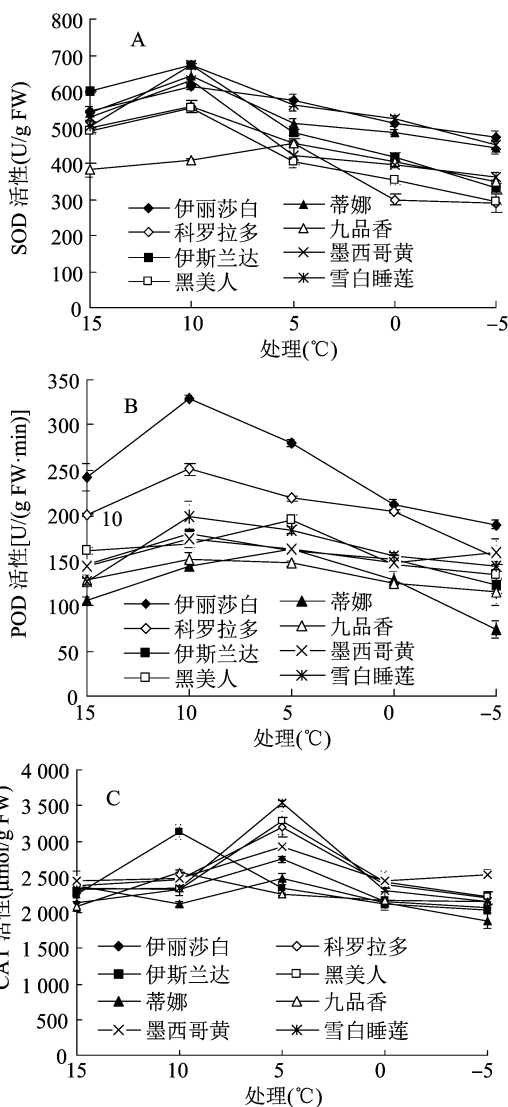


图2 低温处理下不同睡莲叶片的 SOD、POD、CAT 活性

### 2.3 低温胁迫对睡莲可溶性渗透调节物质的影响

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 SS 含量均呈先升后降趋势。科罗拉多、九品香、雪白睡莲叶片在 5 °C 低温胁迫时 SS 含量最高,其余睡莲叶片在 10 °C 低温胁迫时 SS 含量最高。8 种睡莲叶片 SS 含量最大值均不同,伊斯拉达睡莲叶片 SS 含量最大值最大,为 36.68 mg/g FW,雪白睡莲叶片 SS 含量最大值最小,为 13.40 mg/g FW。8 种睡莲叶片 SS 含量达到最大值时相比对照增幅为伊斯拉达 (207.7%) > 雪白睡莲 (114.7%) > 黑美人 (113.5%) > 墨西哥黄 (99.3%) > 科罗拉多 (68.1%) > 蒂娜 (53.7%) > 九品香 (45.2%) > 伊丽莎白 (38.6%) (图 3 - A)。

随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片 SP 含量均呈先升后降趋势。伊斯拉达睡莲叶片在 5 ℃ 低温胁迫时 SP 含量最高,其余睡莲叶片在 10 ℃ 低温胁迫时 SP 含量最高。8 种睡莲叶片 SP 含量最大值均不同,九品香睡莲叶片 SP 含量最大值最大,为 9.59 mg/g FW,伊斯拉达睡莲叶片 SP 含量最小,为 7.4 mg/g FW。8 种睡莲叶片 SP 含量在达到最大值时相比对照增幅为雪白睡莲(212.4%)>九品香(209.4%)>蒂娜(200.0%)>墨西哥黄(151.9%)>黑美人(95.5%)>伊斯拉达(76.6%)>科罗拉多(50.9%)>伊丽莎白(38.1%)(图 3-B)。

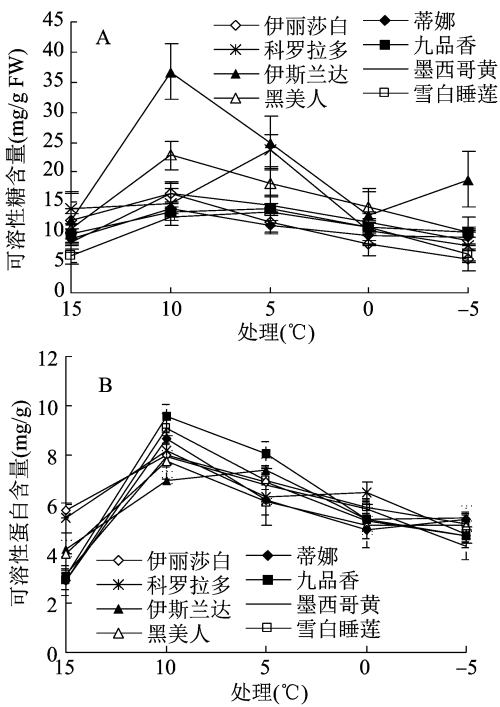


图3 低温处理下不同睡莲叶片的可溶性糖、可溶性蛋白含量

2.4 低温胁迫对叶绿素总含量的影响

由图 4 可知,随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片的 Chl 含量逐渐下降,其下降的速率随着温度的降低而减小。在 15 ℃ 下,除科罗拉多睡莲,其他 7 种睡莲叶片 Chl 含量均保持在 1.5 mg/g FW 左右。在 -5 ℃ 低温胁迫时 Chl 含量达到最小值,其中科罗拉多睡莲叶片 Chl 含量最大值最大,为 2.4 mg/g FW,伊斯拉达睡莲叶片 Chl 含量最大值最小,为 1.33 mg/g FW。科罗拉多睡莲叶片的 Chl 含量在低温胁迫下均高于其他 7 种睡莲叶片。8 种睡莲叶片 Chl 含量达到最低值时相比对照降幅为黑美人(66.5%)>伊丽莎白(64.6%)>蒂娜(58.3%)>墨西哥黄(56.5%)>科罗拉多(50.0%)>伊斯拉

达(49.6%)>九品香(40.0%)>雪白睡莲(37.5%)。

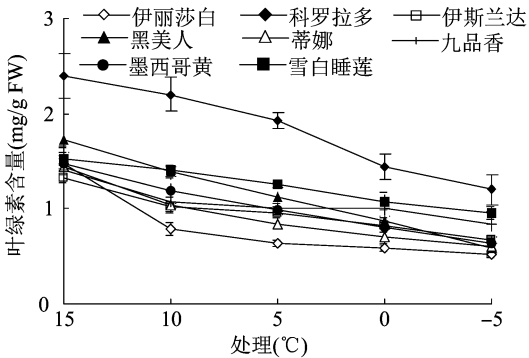


图4 低温处理下睡莲叶片的叶绿素总含量

2.5 抗寒性综合评价

2.5.1 抗寒性综合评价体系的建立 抗寒性综合评价体系中,提取累计贡献率达到 80% 以上的主成分进行综合评价<sup>[16]</sup>。由表 2 可知,前 3 个指标贡献率分别为 36.277%、26.689%、17.365%,累计贡献率为 80.331%。以前 3 个主成分分析各指标的权重,由表 3 可知,睡莲叶片中抗寒性相关性最大的指标是 CAT 活性、Chl 含量,其次是 SP、SS 含量。

表 2 8 种睡莲材料抗寒性指标的特征根和贡献率

成份	特征根	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
1	2.902	36.277	36.277
2	2.135	26.689	62.966
3	1.389	17.365	80.331

表 3 8 种睡莲材料抗寒性指标的权重

指标	权重	指标	权重
REC	0.14	CAT 活性	0.21
MDA 含量	0.18	SP 含量	0.20
SOD 活性	0.12	SS 含量	0.20
POD 活性	0.18	Chl 含量	0.21

2.5.2 各指标隶属度值及抗寒性综合指数 抗寒性综合指数是各指标隶属度与各指标权重的乘积,综合指数的大小反映综合抗寒性能力的差异<sup>[17]</sup>,综合指数值越大,表明睡莲抗寒性越强。从表 4 可知,在 8 种睡莲中,科罗拉多的抗寒能力最强,蒂娜抗寒能力最差,抗寒能力强弱依次为科罗拉多(0.64)>雪白睡莲(0.54)>伊丽莎白(0.52)>墨西哥黄、伊斯拉达、黑美人(0.48)>九品香(0.47)>蒂娜(0.43)。

表 4 8 种睡莲材料各指标隶属度值及抗寒性综合指数

种名	隶属度值								综合指数
	REC	MDA 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	SP 含量	SS 含量	Chl 含量	
科罗拉多	0.48	0.34	0.36	0.50	0.39	0.53	0.25	0.69	0.64
雪白睡莲	0.34	0.28	0.66	0.34	0.40	0.44	0.23	0.36	0.54
伊丽莎白	0.40	0.29	0.67	0.70	0.23	0.47	0.15	0.16	0.52
墨西哥黄	0.40	0.28	0.48	0.32	0.40	0.41	0.19	0.27	0.48
伊斯拉达	0.39	0.40	0.43	0.29	0.28	0.33	0.41	0.22	0.48
黑美人	0.40	0.36	0.33	0.32	0.35	0.37	0.25	0.31	0.48
九品香	0.54	0.43	0.28	0.23	0.20	0.52	0.17	0.30	0.47
蒂娜	0.41	0.39	0.63	0.18	0.18	0.41	0.14	0.22	0.43

### 3 讨论与结论

REC 和 MDA 含量的变化反映细胞膜的损伤程度<sup>[18-19]</sup>,可作为植物抗寒性鉴定的指标。本试验中随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片的 REC 与 MDA 含量均呈上升趋势。这与张艳侠等在 5 个石榴品种的抗寒性评价中 REC 与 MDA 含量变化趋势<sup>[20]</sup>相同。反映出在低温胁迫下,睡莲细胞膜受到损伤,透性增大而引起了 REC 的变化。其中,蒂娜睡莲叶片 REC 增幅最大,黑美人睡莲叶片的 REC 增幅最小。同时,植物脂质过氧化产物 MDA 大量积累,其浓度越高对植物细胞的损害越大。其中,蒂娜睡莲叶片 MDA 含量增幅最大,墨西哥黄睡莲叶片的 MDA 含量增幅最小。本试验中,蒂娜睡莲叶片 REC 和 MDA 含量变化幅度均为最大,表明其细胞膜的损伤程度为最大,在一定程度上反映了其抗寒能力较弱。雪白睡莲的 REC 与 MDA 含量在低温胁迫下均保持最小值,也可反映其抗寒能力较强。

SOD、POD 和 CAT 酶是植物重要的抗氧化保护酶系统的保护酶<sup>[21-24]</sup>。本试验中 SOD、POD 和 CAT 酶活性呈先升后降趋势,表明低温胁迫破坏了植物正常的氧化代谢,活性氧产生过快导致积累,抗氧化酶活性因而增强;但随着温度的进一步降低,SOD、POD 和 CAT 酶活性均有下降,推测可能是细胞结构受到了破坏,保护酶系统清除活性氧的能力降低。这与陈明辉等研究低温处理下果树的抗氧化酶活性变化趋势<sup>[25]</sup>一致。本研究中,科罗拉多、九品香和蒂娜的睡莲叶片分别在 SOD、POD 和 CAT 酶活性的测定中增幅最小,雪白睡莲叶片 SOD、POD 和 CAT 酶活性增幅均为最大,表明其在低温胁迫下细胞抗氧化能力最强,推测雪白睡莲对低温变化的适应性较强。

SS、SP 是重要的有机渗透调节物质<sup>[26-27]</sup>。本试验中 8 种睡莲叶片 SS 和 SP 含量呈先升后降趋势。在低温胁迫初期,睡莲叶片 SS 和 SP 含量升高,调节了其细胞渗透压,增强了其抗寒能力,但随着温度的进一步降低,细胞膜被破坏,有机渗透调节物质外渗,SS 和 SP 含量下降。这与刘杜玲等对早实核桃的研究结果<sup>[28]</sup>一致。本试验中,伊斯拉达睡莲和雪白睡莲叶片在 SS、SP 含量中分别增幅最大,伊丽莎白睡莲叶片 SS 和 SP 含量增幅均最小。伊丽莎白为耐寒性睡莲,其 SS、SP 含量增幅却远小于热带的伊斯拉达睡莲 SS 含量增幅,推测原因是伊丽莎白叶片本身 SS 含量较高,受到低温胁迫后,细胞组织中 SS 含量小幅度提高即可降低膜内细胞受低温的伤害。

叶绿素是反映低温胁迫下植物光合作用能力的重要指标<sup>[29]</sup>。本试验中,随胁迫温度的降低,8 种睡莲叶片的 Chl 含量逐渐下降,并且逐渐趋于平缓,推测低温加速了叶绿素的分解,导致睡莲叶片内 Chl 含量减少。其中黑美人睡莲叶片 Chl 含量下降幅度最大,雪白睡莲叶片 Chl 含量下降幅度最小,在一定程度上表明雪白睡莲的抗寒性较强,黑美人睡莲的抗寒性较弱。而科罗拉多睡莲叶片 Chl 含量在试验中均保持最大值,可反映其抗寒能力最强。

植物在逆境胁迫过程中,多种因素影响其生理指标的变化<sup>[30-31]</sup>,因此不能用单个指标来评价睡莲植物的抗逆性。本研究结果中 CAT 活性、Chl、SP、SS 含量可作为评价睡莲抗寒性的主要指标。这与姜丽娜等研究的小麦抗寒性主要评价指标<sup>[9]</sup>不完全一致,表明抗寒性评价指标的权重在不同物种中存在差异。

植物抗寒能力的研究具有重要的应用价值<sup>[32]</sup>。本研究通过对 8 种睡莲叶片的相关生理指标进行分

析,采用隶属函数法对其抗寒性进行综合评价。结果表明,抗寒能力为科罗拉多>雪白睡莲>伊丽莎白>墨西哥黄、伊斯拉达、黑美人>九品香>蒂娜。本研究结果可为睡莲抗寒性选育推广和裁培养护提供科学方法和相关理论依据。

#### 参考文献:

- [1]黄国振,邓惠勤,李祖修. 睡莲[M]. 北京:中国林业出版社,2009.
- [2]田 敏,苏 群,刘 霞,等. 云南引进睡莲品种的性状评价及优良切花品种筛选[J]. 江苏农业科学,2020,48(3):162-166.
- [3]Sun C Q, Chen F D, Teng N J, et al. Comparative analysis of the complete chloroplast genome of seven *Nymphaea* species[J]. *Aquatic Botany*, 2021, 170:103353.
- [4]郭羽轩,董惠娟,刘 涛,等. 睡莲花总黄酮对四氯化碳诱导大鼠肝纤维化的防治作用[J]. 中草药,2020,51(19):4983-4990.
- [5]唐宇力,钱 萍,张海珍,等. 8 种观赏水生植物对重金属 Cd 和 Pb 的吸收固定能力[J]. 环境工程学报,2017,11(9):5313-5319.
- [6]杨英豪. 重金属镉胁迫对睡莲生理生态效应的研究[D]. 南京:南京农业大学,2013.
- [7]中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第二十七卷[M]. 北京:科学出版社,1979:6-12.
- [8]金龙飞,杨蒙迪,周丽霞,等. 9 个油棕品种抗寒性的生理生化鉴定[J]. 江苏农业科学,2021,49(8):132-136.
- [9]姜丽娜,张黛静,宋 飞,等. 不同品种小麦叶片对拔节期低温的生理响应及抗寒性评价[J]. 生态学报,2014,34(15):4251-4261.
- [10]梁 雪,贺 锋,徐 洪,等. 三种湿地植物抗寒性的初步研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(12):2466-2472.
- [11]李 欣,江 君,徐 君,等. 经低温锻炼后荷花不同品种对低温胁迫的生理响应差异分析[J]. 植物资源与环境学报,2015,24(4):76-82.
- [12]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.
- [13]李桂荣,程珊珊,张少伟,等. 葡萄抗寒相关生理生化指标灰色关联分析[J]. 东北林业大学学报,2018,46(10):40-47,53.
- [14]王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15]苏李维,李 胜,马绍英,等. 葡萄抗寒性综合评价方法的建立[J]. 草业学报,2015,24(3):70-79.
- [16]何嘉琦. 秋石斛耐寒性评价体系的建立及应用[D]. 海口:海南大学,2017:25.
- [17]宋静爽,王 静,刘周斌,等. 辣椒苗期对低温胁迫的响应及耐冷评价体系的建立[J]. 分子植物育种,2020,18(22):7537-7546.
- [18]李晓宇,杨成超,彭建东,等. 杨树苗期抗寒性综合评价体系的构建[J]. 林业科学,2014,50(7):44-51.
- [19]孙世航. 猕猴桃抗寒性评价体系的建立与应用[D]. 北京:中国农业科学院,2018:23.
- [20]张艳琦,罗 华,侯乐峰,等. 五个石榴品种的抗寒性评价[J]. 浙江农业学报,2015,27(4):549-554.
- [21]杨 丹,田新会,杜文华. 红三叶新品系生理生化指标对低温的响应机理[J]. 草地学报,2019,27(1):163-169.
- [22]曹佳乐,延 娜,樊军锋,等. 4 个白杨派新无性系抗寒性鉴定和综合评价[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):130-134,139.
- [23]董万鹏,罗 充,龙秀琴,等. 低温胁迫对西番莲抗寒生理指标的影响[J]. 植物生理学报,2015,51(5):771-777.
- [24]赵 嫚,陈仕勇,李亚萍,等. 外源 GABA 对盐胁迫下金花菜种子萌发及幼苗抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(2):310-316.
- [25]陈明辉,程世平,张志录,等. 不同品种果蔗幼苗对低温的生理响应及耐寒性评价[J]. 华南农业大学学报,2018,39(2):40-46.
- [26]欧 欢. 不同扁桃品种抗寒性研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2019.
- [27]王 娜,王奎玲,刘庆华,等. 四种常绿阔叶树种的抗寒性[J]. 应用生态学报,2016,27(10):3114-3122.
- [28]刘杜玲,张博勇,孙红梅,等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价[J]. 园艺学报,2015,42(3):545-553.
- [29]周蕴薇,刘艳萍,戴思兰. 用叶绿素荧光分析技术鉴定植物抗寒性的剖析[J]. 植物生理学通讯,2006,42(5):945-950.
- [30]韩立群,马 凯,丁军伟,等. 低温处理下新疆野生核桃的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北林学院学报,2019,34(5):98-101,126.
- [31]胡曼筠,金晓玲,曾 雯,等. 华中冬青雌雄株抗寒生理指标筛选及评价[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(5):59-64.
- [32]李文明,辛建攀,魏驰宇,等. 植物抗寒性研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(12):6-11.