

研究报告 Original Papers

七个切花红掌品种对低温胁迫的生理响应及耐低温能力评价

杨克彬*, 孟凡志*, 郭先锋**

山东农业大学林学院, 山东泰安271018

摘要: 以7个切花红掌(*Anthurium andraeanum*)品种为供试材料, 研究了低温胁迫对其离体佛焰苞与叶片形态以及叶片的质膜相对透性、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等指标的影响。在此基础上, 运用逻辑函数方程计算半致死温度(LT₅₀), 运用隶属函数法计算隶属函数值, 并根据两者结果分析各品种耐低温的能力。结果表明, 经6°C低温处理48 h后, 切花红掌品种‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’冷害症状最轻, ‘干杯’和‘玛丽西亚’冷害表现居中, ‘趣味’和‘天使’的冷害表现最重; 随着低温处理时间的延长, 各切花红掌品种的相对电导率(REC)以及丙二醛(MDA)和渗透调节物质含量逐渐上升; 抗氧化酶活性呈先上升后下降的趋势, 且增幅与到达峰值时间点不同。各品种的LT₅₀在-7.19~-5.21°C之间, 各指标隶属函数在0.017~0.981之间。根据各指标的相关性分析, REC、MDA含量、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性5个生理生化指标可作为切花红掌耐低温能力的评价指标。通过综合评价和聚类分析法对各品种进行耐低温排序, 将其分为3个等级: ‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’耐低温能力最强, ‘干杯’和‘玛丽西亚’次之, ‘趣味’和‘天使’耐低温能力最弱, 这与佛焰苞和叶片的冷害表现结果一致。

关键词: 切花红掌; 耐低温; 生理响应; 半致死温度(LT₅₀); 品种

红掌(*Anthurium andraeanum*)为天南星科花烛属多年生草本植物, 原产于南美洲热带雨林, 其花色鲜艳, 花形奇特, 观赏价值高, 既可盆栽观赏, 又能广泛应用于高档切花生产, 目前已成为国际市场上产值仅次于热带兰的第二大宗热带花卉(Khawlhrin等2012; Elibox和Umaharan 2014)。红掌生长适温为14°C以上, 气温长期低于12°C或者短期处于低于亚低温的环境(例如4°C)就会发生冷害(Elibox和Umaharan 2010; 田丹青等2011; Promyou等2012)。在我国北方地区冬季红掌温室都须进行加温处理, 由于各种不可控因素会有短暂的低于亚低温的温度出现, 常给商业生产和观赏利用带来严重的制约与损失。因此筛选出耐低温强的切花红掌品种在生产上具有十分重要的现实意义和应用价值。

到目前为止, 有关红掌耐低温生理研究不多, 仅有田丹青等(2011)和王宏辉等(2015)通过生理指标测定研究了不同盆栽品种的抗寒性并筛选了抗寒品种; 高惠兰等(2005)、乔永旭等(2010)和Promyou等(2012)研究了外源物质对于提高红掌抗寒性的作用。以上国内外的研究对象主要集中于盆栽红掌品种, 其品种耐低温能力评价标准并未成体系。关于切花红掌对于低温的响应以及耐低温品种评价筛选工作, 目前为止尚未见报道。近年来, 半致死温度与以生理生化指标形成的隶属函数评价相结合的方法因能更加客观地评价植物抗寒性而被人们广泛接受(曹冉和王海洋

2014), 然而此方法在红掌耐低温能力研究领域尚未运用。

本研究选用7个流行的切花红掌品种, 通过低温胁迫处理, 研究其形态变化、生理生化响应, 运用相关性分析筛选出评价红掌耐低温能力的主要指标, 并在此基础上对其耐低温能力进行综合评价, 以期阐明切花红掌响应低温胁迫的生理机理, 为红掌的耐低温能力评价提供一种科学方法, 同时为北方地区切花红掌生产时选用耐低温品种提供科学依据。

材料与方法

1 材料

供试材料为7个切花红掌(*Anthurium andraeanum* Linden ex André)品种: ‘天使’(‘Angel’)、‘干杯’(‘Cheers’)、‘火焰’(‘Fire’)、‘玛丽西亚’(‘Marysia’)、‘米多蕊’(‘Midori’)、‘趣味’(‘Spice’)和‘热情’(‘Tropical’)。种苗均为同一批次从荷兰安祖公司引进, 在山东农业大学林学站改良型日光温室内栽培。基质为珍珠岩, 栽培容器是W型种植槽。温室内温度维持在白天25~29°C、夜晚17~20°C; 相

收稿 2017-02-21 修定 2017-07-11

资助 国家林业局948项目(2012-4-57)和国家林业局林业行业标准制修订项目(2016-LY-024)。

* 并列第一作者。

** 通讯作者(E-mail: guoxf@sdau.edu.cn)。

对湿度为白天60%~70%、夜晚80%~90%;白天午间光照强度控制在 $(650\pm 100)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

试验期间取健康且长势一致植株的第一位功能叶(成熟可采切佛焰苞下方的第一枚叶片,肉穗花序2/3~3/4变色时视为成熟可采切)、幼叶和成熟佛焰苞,每个品种3次重复,每重复10株。先用蒸馏水冲洗干净,再放入超纯水中润洗,然后用滤纸擦干后,分别装入自封袋中备用。

2 方法

2.1 各品种冷害表现的观察

将备用的成熟佛焰苞和幼叶分别置于人工气象培养箱(RQH-450)中进行6°C低温处理,观察各品种的冷害症状。

2.2 生理生化指标的测定

将功能叶片置于6°C的低温恒温槽(天恒SDC-6)中进行低温处理,分别在0、12、24、36和48 h时取样,进行各项生理生化指标的测定,均3次重复。

采用许瑛和陈发棣(2008)的方法测定相对电导率(relative electrical conductivity, REC),用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量(Xu等2006),用葱酮比色法测定可溶性糖含量,用优化的考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量(Ali和Hahn2005),用氮蓝四唑(nitroblue tetrazolium, NBT)光化还原法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,用愈创木酚法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,用过氧化氢法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性(Cakmak和Marschner 1992)。

2.3 半致死温度的测定

设置温度梯度-1、-3、-5、-7、-9°C。将功能叶剪碎混和,并用超纯水进行漂洗,之后用干净纱布包裹叶片,放入玻璃试管中,置于4°C冰箱中过夜。次日于低温恒温槽中低温处理1.5 h后测定REC,3次重复。

根据REC拟合逻辑函数回归方程: $y=K/(1+ae^{-bx})$, 其中, y 代表细胞伤害率, x 代表处理温度, K 代表细胞伤害率的饱和容量,即 $K=100$, a 、 b 为方程参数。为确定 a 、 b 的值,将方程进行线性化处理, $\ln[(K-y)/y]=\ln a - bx$, 令 $y_1=\ln[(K-y)/y]$, 则转化为细胞伤害率(y_1)与处理温度(x)的直线方程,通过直线回归的方法,求得 a 、 b 的值及拟合度 R^2 ;半致死温度(LT_{50})= $\ln[(1/a)]/b$ (盖钧镒2000;许瑛和陈发棣2008)。

2.4 各品种隶属函数值的计算

对 LT_{50} 与各生理生化指标进行相关性分析,筛选出评价切花红掌耐低温能力的评价指标。

用隶属函数法综合筛选出的指标进行耐低温综合评价,与耐低温能力正相关者采用隶属函数 $R(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$,负相关者采用反隶属函数 $R(X_i)=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$,其中, $R(X_i)$ 代表供试材料某一指标的隶属度[$0<R(X_i)<1$], X_{\max} 指供试材料对应指标的最大值, X_{\min} 指供试材料对应指标的最小值,本实验中采用各指标的增长幅度计算隶属度。与耐低温能力呈正相关的参数可溶性蛋白含量、SOD活性、POD活性采用隶属函数计算,与耐低温能力呈负相关的参数REC、MDA含量采用反隶属函数计算。根据上述公式,分别计算出7个切花红掌品种各项指标平均值的隶属函数值后,作为平均隶属函数值进行品种耐低温能力综合评价。隶属函数值越大,说明该品种越耐低温(刘慧民等2014;曹冉和王海洋2014)。

3 品种耐低温能力的综合评价及数据处理

通过 LT_{50} 与隶属函数值对各切花红掌品种进行耐低温能力综合评价,并通过聚类分析对各品种进行耐低温能力分类。

采用Microsoft Excel 2013软件对数据进行处理和绘图,采用SPSS 21.0 (SPSS Inc.)统计分析软件对数据进行差异显著性、相关性检验以及聚类分析(最小显著差数法, $\alpha=0.05$)。

实验结果

1 切花红掌对于低温胁迫的响应

1.1 低温胁迫下红掌佛焰苞和幼叶的冷害症状

低温胁迫下7个品种所表现的冷害症状差异比较明显,包括出现冷害症状的时间以及冷害损伤程度。

据肉穗花序和佛焰苞冷害表现(图1-A和B)可知:低温处理12 h后,‘干杯’、‘玛丽西亚’、‘趣味’和‘天使’4个品种的肉穗花序开始出现褐色斑点。24 h后,另外3个品种的肉穗花序开始出现褐色斑点,前述4个品种花序上褐色斑点面积扩大,其中‘趣味’和‘天使’的佛焰苞表面也出现褐色斑点。48 h后,‘趣味’和‘天使’花序褐色部分达到2/3以上,且其佛焰苞表面出现大面积的褐色斑点,观赏价值完全丧失;‘干杯’和‘玛丽西亚’花序褐色部分达

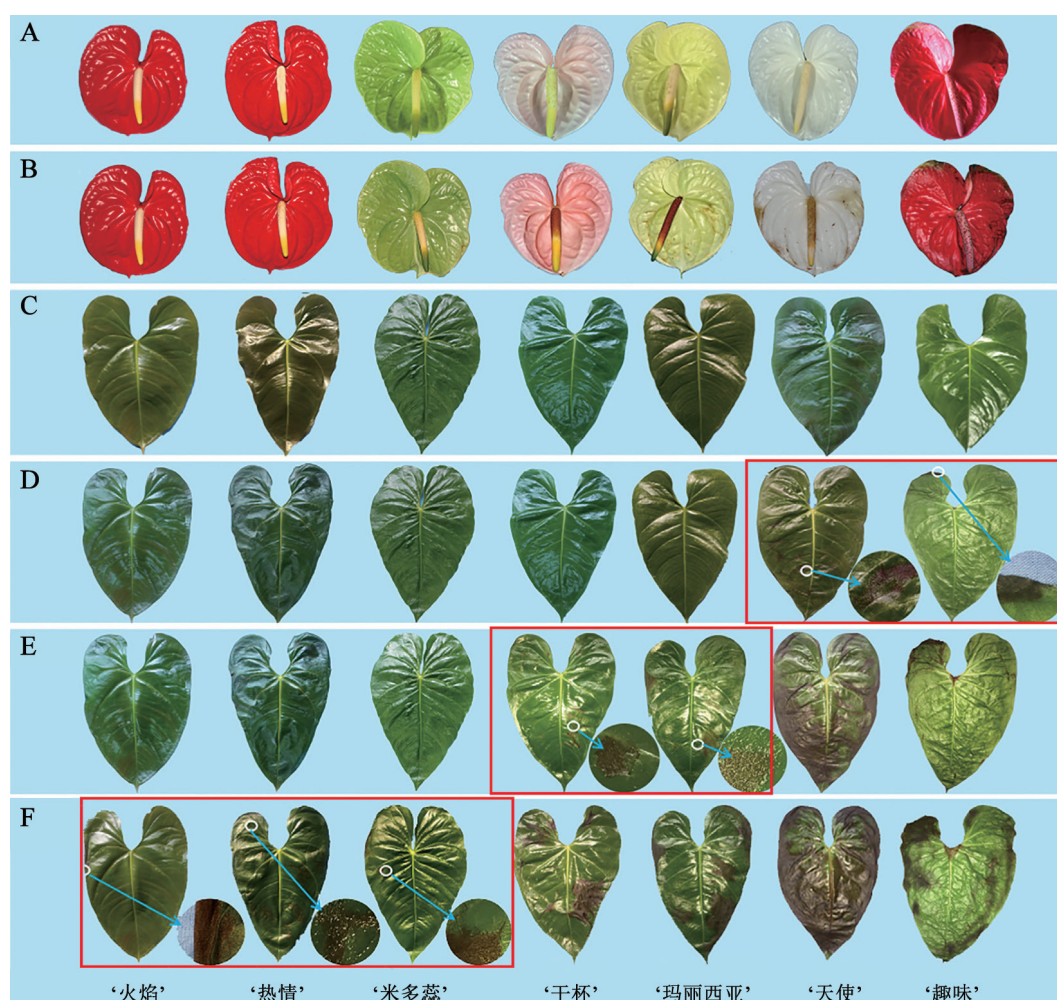


图1 低温胁迫下7个切花红掌品种的冷害症状

Fig.1 Symptoms of chilling injury in seven *A. andraeanum* cultivars

A: 佛焰苞对照组; B: 佛焰苞低温处理48 h; C: 幼叶对照组; D: 幼叶低温处理48 h; E: 幼叶低温处理96 h; F: 幼叶低温处理144 h。红框中展示的是各品种在该时间点出现的冷害症状。

到1/2以上, 观赏价值基本丧失; 而‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’花序褐色斑点略有加重, 观赏价值受到影响。

据幼叶冷害表现(图1-C~F)可知: 低温处理48 h后, ‘趣味’和‘天使’叶片表面出现面积大小不一的褐斑, 其余5个品种未出现冷害症状; 低温处理96 h后, ‘干杯’、‘玛丽西亚’叶片表面出现面积大小不一的褐斑, ‘天使’的褐色区域达到1/3以上, ‘趣味’叶缘出现水烫状萎缩; 低温处理144 h后, ‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’叶片表面出现面积大小不一的褐斑, 其余品种褐斑面积变大, 尤其是‘天使’褐斑面积达到90%以上, 同时, ‘趣味’在褐斑处发生干枯现象。

1.2 低温胁迫对红掌叶片REC的影响

由图2可知, 随着低温处理时间延长, 各品种REC持续上升, 且都在12 h后才快速上升, 但是处理48 h后各品种的增幅存在明显差异, ‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’较处理前增幅较小, 均未超过90%, 分别为77.22%、81.92%和85.07%, 而其他品种较处理前增幅较大, 其中, ‘趣味’和‘天使’最大, 均超过了100%, 分别为117.73%和123.84%, 说明‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’在低温胁迫下细胞膜受伤害的程度最小, 最耐低温; ‘趣味’和‘天使’同种条件下受伤害的程度最大, 最不耐低温。

1.3 低温胁迫对红掌叶片MDA含量的影响

由图3分析可知, MDA含量受低温影响较小,

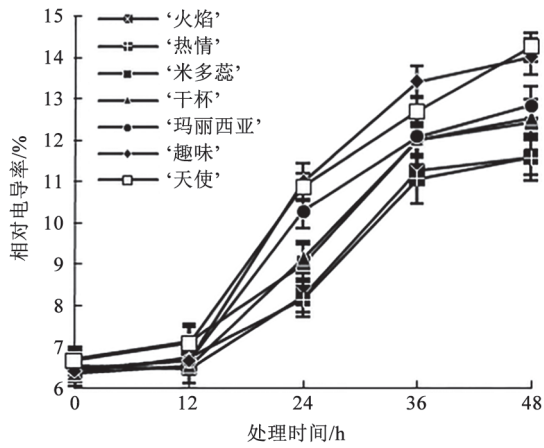


图2 低温胁迫对红掌叶片REC的影响
Fig.2 Effect of low temperature on REC in *A. andraeanum* leaves

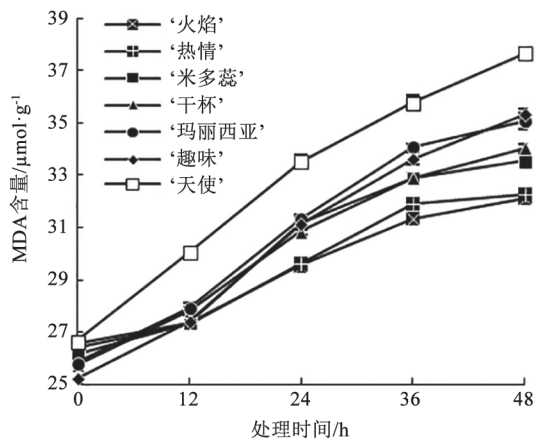


图3 低温胁迫对红掌叶片MDA含量的影响
Fig.3 Effect of low temperature on MDA content in *A. andraeanum* leaves

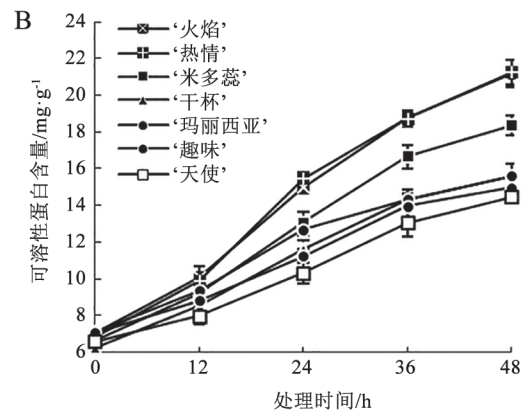
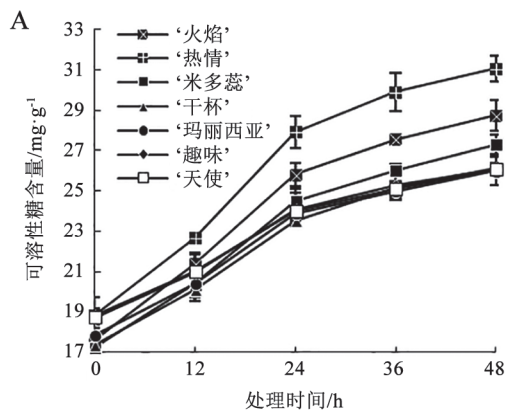


图4 低温胁迫对红掌叶片可溶性糖(A)和可溶性蛋白(B)含量的影响
Fig.4 Effect of low temperature on contents of soluble sugar (A) and soluble protein (B) in *A. andraeanum* leaves

虽然随着低温处理时间的延长,各品种都呈逐渐上升的趋势,但是快速上升的时间点及增幅存在差异。‘火焰’和‘热情’上升较缓慢,低温胁迫12 h后才快速上升,而其他品种在低温胁迫开始后增幅便较大。处理48 h后,除了‘趣味’和‘天使’,其余5个品种MDA含量的增长幅度均未超过40%,其中,‘火焰’和‘热情’的增幅最小,未超过25%,分别为21.01%和22.06%。

1.3 低温胁迫对红掌叶片渗透调节物质含量的影响

由图4-A可知,在低温处理期间各品种的可溶性糖含量逐渐增加,但增幅存在明显差异。7个品种均在低温处理开始后便快速增加,但是‘火焰’和‘热情’的增幅明显大于其余品种。此外,7个品种均在12~24 h期间增幅最大;低温处理48 h后,‘火焰’和‘热情’较处理前增幅最大,为63.38%和64.98%,而‘趣味’和‘天使’较小,均未超过40%,仅为39.52%和38.78%。

可溶性蛋白含量受低温影响较大,在低温胁迫下,叶片中可溶性蛋白含量明显增加(图4-B)。在低温处理过程中,‘火焰’和‘热情’在12 h后可溶性蛋白增长速度明显加快,而其余品种的变化趋势平稳,且各品种在处理后期增幅变小。低温处理48 h后,各品种较处理前增幅均在100%以上,其中,‘火焰’和‘热情’的增幅最大,分别达到200.85%和210.07%,而其余品种均未超过200%,‘趣味’最小,仅为111.60%。

1.4 低温胁迫对红掌叶片抗氧化酶活性的影响

从图5-A可以看出,7个切花红掌品种在低温处理下SOD活性变化规律基本一致,随着低温处

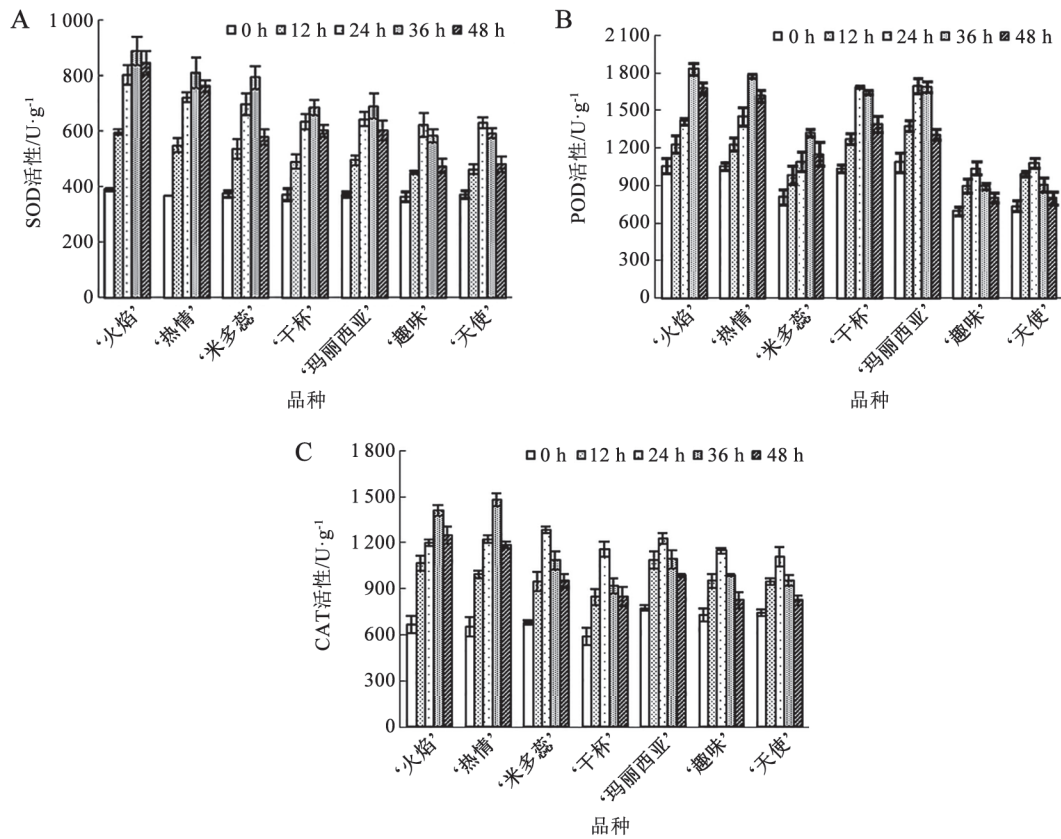


图5 低温胁迫对红掌叶片SOD (A)、POD (B)和CAT (C)活性的影响
 Fig.5 Effect of low temperature on activities of SOD (A), POD (B) and CAT (C) in *A. andraeanum* leaves

理时间的延长, SOD活性先上升后下降, 但是各品种达到峰值的时间与增幅明显不同。‘趣味’和‘天使’在低温处理24 h时便达到峰值, 且增幅均未超过70%, 分别为69.99%和68.63%。而其他品种均在低温处理36 h时才达到峰值, 且增幅较大, 其中, ‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’最大, 增幅均在100%以上, 分别为127.57%、120.65%和111.91%。

7个切花红掌品种在低温处理下, 随处理时间的延长, POD活性呈先增加后下降的趋势(图5-B), 但是各品种达到峰值的时间与增幅明显不同。‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’在低温处理36 h时达到峰值, 而其他品种均在低温处理24 h时就达到了峰值, 其中, ‘干杯’和‘玛丽西亚’在24 h与36 h的POD活性几乎一致, 说明两者的峰值出现在24~36 h之间; 各品种的POD活性在达到峰值时, 比处理前增幅明显不同, ‘趣味’和‘天使’较小, 均在50%以下, 分别为49.39%和46.97%, 而其余品种较大, 其中‘火焰’和‘热情’最大, 分别达到73.22%和68.32%。

7个切花红掌品种在低温处理下, CAT活性与SOD和POD活性具有相似的变化规律, 随着低温处理时间的延长先升高后降低, 但是各品种达到峰值的时间与增幅明显不同(图5-C)。‘火焰’和‘热情’在低温处理36 h时才达到峰值, 而其他品种均在低温处理24 h时就达到了峰值; 各品种的CAT活性在达到峰值时, 较处理前增幅明显不同, ‘火焰’和‘热情’的增长幅度最大, 分别达到111.42%和127.08%, 而其他品种增幅较小, 均未超过100%, ‘天使’的增加幅度最小, 甚至未超过50%, 仅为49.18%。

2 切花红掌品种的耐低温能力综合评价

运用计算逻辑函数方程各参数($\ln a$ 、 b 、 R^2)得到的 LT_{50} 进行综合评价。7个切花红掌品种的 LT_{50} 依次为‘火焰’(-7.19°C) < ‘热情’(-7.02°C) < ‘米多蕊’(-6.82°C) < ‘干杯’(-6.30°C) < ‘玛丽西亚’(-6.18°C) < ‘趣味’(-5.69°C) < ‘天使’(-5.21°C), 说明‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’在7个品种中最耐低温, ‘干杯’和‘玛丽西亚’次之, ‘天使’和‘趣味’最不耐低温。

为了筛选出可靠的耐低温鉴定指标, 对各品种的 LT_{50} 与7个耐低温能力相关的生理指标进行相关性分析, 得到相关系数矩阵(表1)。分析可得, REC、MDA含量、可溶性蛋白含量、SOD活性和POD活性较其他指标更适合作为切花红掌耐低温的评价指标。运用隶属函数法对选中的生理指标进行综合评价, 7个切花红掌品种的耐低温能力顺

序依次为: ‘火焰’>‘热情’>‘米多蕊’>‘干杯’>‘玛丽西亚’>‘趣味’>‘天使’(表2), 其中, ‘热情’同‘火焰’之间差距较小, 说明这两个品种的耐低温能力相近。两种评价方法结果相同, 同时也与佛焰苞和叶片冷害症状表现相一致。

通过聚类分析, 将切花红掌品种按耐低温能力强弱分为3类(表2和图6), ‘火焰’、‘热情’和‘米多

表1 红掌各生理生化指标与 LT_{50} 相关性分析

Table 1 Correlation analysis between physiological factors and LT_{50} in *A. andraeanum*

指标	LT_{50}	REC	MDA含量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	SOD活性	POD活性	CAT活性
LT_{50}	1	—	—	—	—	—	—	—
REC	0.991**	1	—	—	—	—	—	—
MDA含量	0.967**	0.955**	1	—	—	—	—	—
可溶性糖含量	-0.879**	-0.877**	-0.933**	1	—	—	—	—
可溶性蛋白含量	-0.906**	-0.887**	-0.974**	0.898**	1	—	—	—
SOD活性	-0.959**	-0.947**	-0.977**	0.836*	0.957**	1	—	—
POD活性	-0.966**	-0.964**	-0.978**	0.954**	0.919**	0.933**	1	—
CAT活性	-0.889**	-0.867**	-0.947**	0.974**	0.948**	0.868*	0.930**	1

“*”和“**”分别表示相关性水平达到5%和1%。

表2 七个红掌品种的 LT_{50} 和隶属函数值

Table 2 LT_{50} and membership function of seven *A. andraeanum* cultivars

品种	$LT_{50}/^{\circ}C$	隶属函数值					平均值	排名	分类
		REC	MDA含量	可溶性蛋白含量	SOD活性	POD活性			
‘火焰’	-7.19±0.14	1.00	1.00	0.91	1.00	1.00	0.981	1	强
‘热情’	-7.02±0.54	0.90	0.95	1.00	0.88	0.81	0.909	2	强
‘米多蕊’	-6.82±0.48	0.83	0.64	0.67	0.73	0.60	0.695	3	强
‘干杯’	-6.30±0.65	0.58	0.45	0.38	0.26	0.59	0.452	4	中
‘玛丽西亚’	-6.18±0.66	0.55	0.27	0.08	0.28	0.34	0.303	5	中
‘趣味’	-5.69±0.74	0.13	0.06	0.00	0.02	0.09	0.061	6	弱
‘天使’	-5.21±0.62	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.017	7	弱

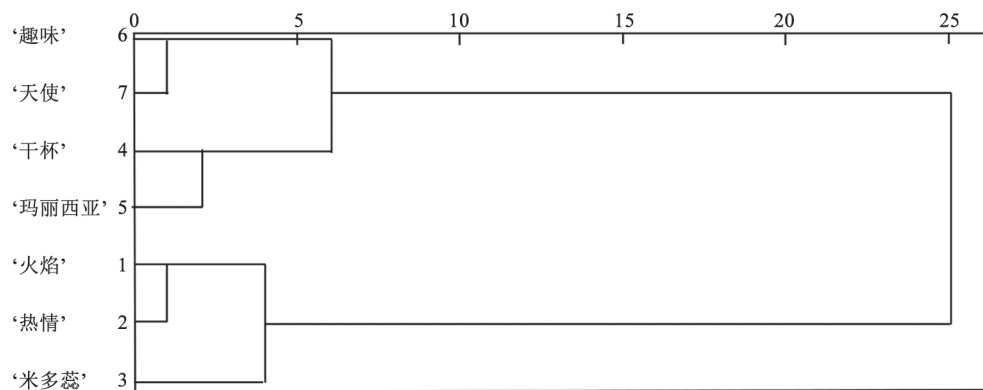


图6 七个红掌品种耐低温能力聚类分析

Fig.6 Clustering graph of seven *A. andraeanum* cultivars based on the tolerance to coldness

蕊’属于强耐低温品种,‘干杯’和‘玛丽西亚’属于中耐低温品种,‘趣味’和‘天使’属于弱耐低温品种。

讨 论

1 切花红掌耐低温品种评价与筛选的必要性

红掌作为热带花卉,在北方生产过程中冬季低温成为限制其生长发育的重要因素(乔永旭2010;王宏辉等2015)。一旦发生冷害,红掌的佛焰苞和叶片观赏品质就会下降,甚至引起整个植株因生理失衡而死亡。冬季温室加温导致生产成本升高,因此筛选出耐低温能力强的品种可降低冬季加温温度,减少成本投入,同时耐低温强的品种在遇到冷害时受害轻,损失减少。本研究通过各品种的 LT_{50} 和综合评价发现,各品种的 LT_{50} 相差 $2^{\circ}C$ 且耐低温能力有显著差异,‘火焰’、‘热情’和‘米多蕊’最耐低温,其余品种较弱。

2 切花红掌对于低温胁迫的生理响应

低温胁迫下,在植物的体内会发生一系列异常的生理生化反应(Morsy等2007),包括质膜系统的破坏,渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的变化,并通过体表的冷害症状表现出来。

本研究中,各切花红掌品种经过一段时间的低温胁迫后出现冷害症状——佛焰苞和幼叶出现褐色斑点(图1),且出现的时间点与受冷害程度不同,该表现与田丹青等(2011)和Promyou等(2012)的研究结果一致。本研究中生理生化指标得出的结论与冷害症状的结果一致,因此冷害症状为通过生理生化指标的变化评价耐低温能力的方法提供了表征依据。同时本研究发现,相较于生理生化指标,表征现象有一定延后性,耐低温品种的叶片在低温处理144 h后才出现冷害表现,说明冷害表征的表现需经过一段时间的体内生理生化反应。

当植物受到低温胁迫时,细胞膜最先受到伤害,引起质膜透性的变化。REC作为鉴定质膜透性的主要指标用来评价植物抗寒性,在农作物、观赏植物和草坪草中得到了广泛认可,研究认为REC增加越多,说明细胞受损越严重,即植物的抗寒性越差(王琪和于晓南2013;翟飞飞等2013)。本研究中,随低温胁迫时间的延长,REC持续升高,这与佛手(*Citrus medica* var. *sarcodactylis*) (郭卫东等2009)和地被菊(*Dendranthema* × *grandiflorum*) (李娜等

2010)等园艺植物的研究结果相一致。可溶性糖和蛋白作为细胞渗透调节保护物质,在本研究中两者的含量明显增加,提高了细胞保水能力和维持了细胞膜的相对透性(Karimzadeh等2005),对细胞膜起到了保护作用,减少了电解质的外渗,降低了REC。我们注意到,各品种可溶性糖和蛋白含量的增幅是有差异的,耐低温能力越强,增幅越大,导致细胞膜受害程度低,REC小,这与在福禄考(*Phlox paniculata*) (曲彦婷等2016)和冬青(*Ilex* sp.) (曾雯等2016)等植物中得到的结果一致。

诸多研究表明,低温胁迫导致植物体内产生大量活性氧自由基,引起膜脂过氧化、发生冷害,MDA作为膜脂过氧化产物成为鉴别低温胁迫对植物膜危害程度的重要指标之一(邓仁菊等2014)。本研究中,各品种的叶片MDA含量均随低温胁迫时间的延长而逐渐增加,与REC的变化趋势一致。POD是植物体内分解活性氧自由基防止细胞受损的保护酶,并和SOD等酶一起使活性氧自由基维持在一定的浓度上,避免细胞膜的过氧化,防止活性氧自由基的毒害。而各品种耐低温能力的不同,导致POD等酶活性有差异,从而使各品种的细胞膜的过氧化程度不同,耐低温较强的品种酶活性强,细胞膜的过氧化程度低,这与各品种MDA含量的变化相一致。

值得注意的是,本研究中,REC和MDA含量在处理前后的增幅较小,最大增幅不超过100%,同时抗氧化酶活性一直高于处理前,不同于田丹青等(2011)“REC和MDA含量增幅较大,抗氧化酶活性处理后期低于处理前”的研究结果。这可能是由于前人研究主要针对盆栽红掌幼苗,而本研究则针对定植3年后的开花大苗,其苗龄大,植株成熟,保护机制完善,适应性强,从而耐低温能力强。相同条件下,低温对幼苗盆栽伤害的程度比成苗严重。

3 切花红掌耐低温的综合评价

植物耐低温能力是受多种因素同时影响的复杂性状,指标单一化很难真实准确反映植物耐低温的实质,因此用多个指标进行植物耐低温能力的综合评价是必要的。本文根据与 LT_{50} 的相关性大小确定了判断切花红掌耐低温能力主要的5个指标: REC、MDA含量、可溶性蛋白含量、SOD活性和POD活性。结合 LT_{50} 与隶属函数法得出的隶属函数值建立了综合评价方法,此方法已经广

泛应用于地被菊(许瑛和陈发棣2008)、西番莲(*Passiflora edulis*) (董万鹏等2015)和杜鹃花(*Rhododendron* sp.) (刘冰等2016)等园艺作物领域。切花红掌耐低温能力综合评价方法的建立, 将为切花红掌的耐低温品种选育和生产发展提供更加简便的鉴定方法。

参考文献

- Ali MB, Hahn EJ, Paek KY (2005). Effects of temperature on oxidative stress defense systems, lipid peroxidation and lipoxygenase activity in *Phalaenopsis*. *Plant Physiol Bioch*, 43 (3): 213–223
- Cakmak I, Marschner H (1992). Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol*, 98: 1222–1227
- Cao R, Wang HY (2014). Comprehensive evaluation of 11 evergreen broad-leaved tree species for their cold tolerance. *J Southwest Univ-Nat Sci*, (8): 57–64 (in Chinese with English abstract) [曹冉, 王海洋(2014). 11种常绿阔叶树的抗寒力研究. 西南大学学报(自然科学版), (8): 57–64]
- Deng RJ, Fan JX, Wang YQ, Jin JF, Liu T (2014). Physiological responses of pitaya (*Hylocereus* spp.) seedlings to chilling stress and comprehensive evaluation of their cold resistance. *Plant Physiol J*, 50 (10): 1529–1534 (in Chinese with English abstract) [邓仁菊, 范建新, 王永清, 金吉芬, 刘涛(2014). 火龙果幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性综合评价. 植物生理学报, 50 (10): 1529–1534]
- Dong WP, Luo C, Long XQ, Hu J, Li Y (2015). Effects of low temperature stress on physiological indexes of cold resistance of *Passiflora edulis*. *Plant Physiol J*, 51 (5): 771–777 (in Chinese with English abstract) [董万鹏, 罗充, 龙秀琴, 胡静, 李艳(2015). 低温胁迫对西番莲抗寒生理指标的影响. 植物生理学报, 51 (5): 771–777]
- Elibox W, Umaharan P (2010). Cultivar differences in the deterioration of vase-life in cut-flowers of *Anthurium andraeanum* is determined by mechanisms that regulate water uptake. *Sci Hortic*, 124: 102–108
- Elibox W, Umaharan P (2014). Genetic basis for productivity in *Anthurium andraeanum* Hort. *HortScience*, 49 (7): 859–863
- Gai J (2000). *Methods of Experimental Statistics*. Beijing: China Agriculture Press, 211–212 (in Chinese) [盖钧镒(2000). 试验统计方法. 北京: 中国农业出版社, 211–212]
- Gao HL, Liu ZY, Ye JS, Chen RH (2005). Effect of cold hardening on membrane lipid peroxidation and activities of cell defense enzyme in leaves of *Anthurium andraeanum* Lind under low temperature stress. *Fujian J Agr Sci*, 20 (2): 108–112 (in Chinese with English abstract) [高惠兰, 柳振誉, 叶静水, 陈瑞贺(2005). 冷锻炼对低温胁迫下红掌叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响. 福建农业学报, 20 (2): 108–112]
- Guo WD, Zhang ZZ, Jiang XW, Chen MG, Zheng JS, Chen WR (2009). Semilethal temperature of fingered citron (*Citrus medica* var. *sarcodactylis* Swingle) under low temperature stress and evaluation on their cold resistance. *Acta Hortic Sin*, 36 (1): 81–86 (in Chinese with English abstract) [郭卫东, 张真真, 蒋小韦, 陈民管, 郑建树, 陈文荣(2009). 低温胁迫下佛手半致死温度测定和抗寒性分析. 园艺学报, 36 (1): 81–86]
- Karimzadeh G, Darvishzadeh R, Jalali-Javaran M, Dehghani H (2005). Gold-induced accumulation of protein in the leaves of spring and winter barley cultivars. *Acta Biol Hung*, 56 (1–2): 83–96
- Khawlhing N, Thanga J, Lalnunmawia F (2012). Plant performance of *Anthurium andraeanum* as affected by shade conditions and different conventional nutrient sources. *J Hortic For*, 4 (2): 22–26
- Li N, Fang WM, Chen FL, Chen SM, Chen Y (2010). Physiological indexes in florets of two winter cut *Chrysanthemum* cultivars under low temperature and their cold tolerance. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 30 (4): 645–651 (in Chinese with English abstract) [李娜, 房伟民, 陈发棣, 陈素梅, 陈煜(2010). 切花寒菊小花对低温胁迫的生理响应及其抗寒性分析. 西北植物学报, 30 (4): 645–651]
- Li S, Li S, MA S, Dai C, Shi Z, Tang B, Zhao S, Pu Y (2015). A comprehensive assessment method for cold resistance of grape vines. *Acta Pratacult Sin*, 24 (3): 70–79 (in Chinese with English abstract) [苏李维, 李胜, 马绍英, 戴彩虹, 时振振, 唐斌, 赵生琴, 蒲彦涛(2015). 葡萄抗寒性综合评价方法的建立. 草业学报, 24 (3): 70–79]
- Liu B, Zeng S, Zhou H, Xia YP (2016). A study on cold tolerance difference and its mechanisms in azalea cultivars. *Acta Hortic Sin*, 43 (2): 295–306 (in Chinese with English abstract) [刘冰, 曹莎, 周泓, 夏宜平(2016). 杜鹃花品种耐寒性比较及其机制研究. 园艺学报, 43 (2): 295–306]
- Liu HM, Zhang Q, Su Q, Liu JX, Che DD (2014). Studies on evaluation and screening of cold resistance during seedling stage in ghteen species of varieties of *Spiraea*. *Acta Hortic Sin*, 41 (12): 2427–2436 (in Chinese with English abstract) [刘慧民, 仇茜, 苏青, 刘计璇, 车代弟(2014). 18种绣线菊苗期耐寒性评价与筛选. 园艺学报, 41 (12): 2427–2436]
- Morsy MR, Jouve L, Hausman JF, Hoffmann L, Stewart JM (2007). Alteration of oxidative and carbohydrate metabolism under abiotic stress in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes contrasting in chilling tolerance. *J Plant Physiol*, 164 (2): 157–167
- Promyou S, Ketsa S, van Doorn WG (2012). Salicylic acid alleviates chilling injury in anthurium (*Anthurium andraeanum* L.) flowers. *Postharvest Biol Technol*, 64: 104–110
- Qiao Y (2010). Effect of salicylic acid on physiological index of *Anthurium andraeanum* leaves at low temperature. *J Northeast For Univ*, 38 (2): 11–12 (in Chinese with English abstract) [乔永旭(2010). 低温处理过程中水杨酸对红掌叶片生理指标的影响. 东北林业大学学报, 38 (2): 11–12]
- Qu YT, Xiong Y, Han H, Li Y, Zuo YH (2016). Physiological response to low temperature stress and comprehensive evaluation of cold resistance on different *Phlox* varieties. *Plant Physiol J*, 52 (4): 487–496 (in Chinese with English abstract) [曲彦婷, 熊燕, 韩辉, 李洋, 左豫虎(2016). 不同福禄考品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性综合评价. 植物生理学报, 52 (4): 487–496]
- Shao Y, Xu J, Xue L, Zhang R, Wu C, Lu G (2013). Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and

- photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species. *Acta Ecol Sin*, 33 (14): 4237–4247 (in Chinese with English abstract) [邵怡若, 许建新, 薛立, 张柔, 吴彩琼, 卢广超(2013). 低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响. *生态学报*, 33 (14): 4237–4247]
- Tian DQ, Ge YY, Pan GM, Shen XL, He Y, Zhang Z, Liu XJ, Zhu ZJ (2011). Morphological and physiological characteristics of different cultivars of *Anthurium andraenum* under chilling stress. *Acta Horti Sin*, 38 (6): 1173–1179 (in Chinese with English abstract) [田丹青, 葛亚英, 潘刚敏, 沈晓岚, 何勇, 张智, 刘晓静, 朱祝军(2011). 低温胁迫对3个红掌品种叶片形态和生理特性的影响. *园艺学报*, 38 (6): 1173–1179]
- Tian JH, Wang HX, Zhang ZH, Gao Y (2015). Effects of chilling stress on antioxidant system and ultrastructure walnut cultivars. *Chin J Appl Ecol*, 26 (5): 1320–1326 (in Chinese with English abstract) [田景花, 王红霞, 张志华, 高仪(2015). 低温逆境对不同核桃品种抗氧化系统及超微结构的影响. *应用生态学报*, 26 (5): 1320–1326]
- Wang H, Guo J, Fang W, Chen L, Zhang D (2015). Evaluation on cold and heat resistances of ten cultivars of *Anthurium andraenum*. *J Plant Resour Environ*, 24 (2): 40–47 (in Chinese with English abstract) [王宏辉, 顾俊杰, 房伟民, 陈发棣, 张栋梁(2015). 10个红掌品种的抗寒性与耐热性评价. *植物资源与环境学报*, 24 (2): 40–47]
- Wang Q, Yu XN (2013). Physiological response to low temperature stress and evaluation of cold resistance of three color-leafed trees. *J Beijing For Univ*, 35 (5): 104–109 (in Chinese with English abstract) [王琪, 于晓南(2013). 3种彩叶树对低温的生理响应及抗寒性评价. *北京林业大学学报*, 35 (5): 104–109]
- Xu S, Li J, Zhang X, Wei H, Cui L (2006). Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress. *Environ Exp Bot*, 56: 274–285
- Xu Y, Chen FD (2008). The LT_{50} and cold tolerance adaptability of chrysanthemum during a natural drop in temperature. *Acta Horti Sin*, 35 (4): 559–564 (in Chinese with English abstract) [许璞, 陈发棣(2008). 菊花8个品种的低温半致死温度及其耐寒适应性. *园艺学报*, 35 (4): 559–564]
- Yang Q, Zhang Z, Rao J, Wang Y, Sun Z, Ma Q, Dong X (2013). Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in ‘Hayward’ kiwifruit by enhancing antioxidant enzyme activity and regulating endogenous hormones levels. *J Sci Food Agr*, 93: 3691–3699
- Zeng W, Jin WL, Xing W, Hu MY (2016). Comparison of cold resistance among nine evergreen *Ilex* cultivars. *Plant Physiol J*, 52 (1): 55–61 (in Chinese with English abstract) [曾雯, 金晓玲, 邢文, 胡曼筠(2016). 9个常绿杂交冬青的抗寒能力比较. *植物生理学报*, 52 (1): 55–61]
- Zhai FF, Han L, Liu JX, Xian YQ, Ju GS, Li W, Zhang SW, Sun ZY (2013). Assessing cold resistance of mutagenic strains of perennial ryegrass under artificial low-temperature stress. *Acta Pratacult Sin*, 22 (6): 268–279 (in Chinese with English abstract) [翟飞飞, 韩蕾, 刘俊祥, 钱永强, 巨关升, 李伟, 张少伟, 孙振元(2013). 人工低温胁迫下多年生黑麦草诱变株系的抗寒性研究. *草业学报*, 22 (6): 268–279]

Physiological response to low temperature stress and comprehensive evaluation of low temperature tolerance among seven cut *Anthurium andraeanum* cultivars

YANG Ke-Bin*, MENG Fan-Zhi*, GUO Xian-Feng**

College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018

Abstract: Seven cultivars of cut *Anthurium andraeanum* were used to investigate the effect of low temperature stress on isolated spathe and leaf morphology, relative membrane permeability, contents of osmotic solutes, activities of antioxidant enzymes and other indicators. Semi-lethal temperature (LT_{50}) was calculated using logistic equation, subordinate function value was calculated using subordinate function method, and the low temperature tolerance of seven cultivars was evaluated comprehensively by them. The results show that after 48 h treatment under 6°C, chilling injury symptoms of 'Fire', 'Tropical' and 'Midori' were the lightest, 'Cheers' and 'Marysia' were in the middle, and 'Spice' and 'Angel' were the hardest. In addition, with the treatment time of lower temperature prolonged, relative electric conductivity (REC) and the contents of malondialdehyde (MDA) and osmotic solutes increased, and the activities of antioxidant enzymes increased firstly, then decreased, and both the increases and time for arrival of the peak value were different. LT_{50} was between -7.19°C and -5.21°C, and the membership function was between 0.017 and 0.981. Based on correlation analysis among the indices, it was shown that REC, contents of MDA and soluble sugar and activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidases (POD) could be used as indices to evaluate low temperature tolerance. Using subordinate function values and cluster analysis to low temperature tolerance of all varieties, the cultivars were divided into three grades: low temperature tolerances of 'Fire', 'Tropical' and 'Midori' were strongest, those of 'Cheers' and 'Marysia' were in the middle, and those of 'Spice' and 'Angel' were weakest, which was the same as result of symptoms of chilling injury.

Key words: cut *Anthurium andraeanum*; low temperature tolerance; physiological response; semi-lethal temperature (LT_{50}); cultivar

Received 2017-02-21 Accepted 2017-07-11

This work was supported by Project 948 from the State Forestry Administration of China (Grant No. 2012-4-57), and Forestry Industry Standard Revision Project from the State Forestry Administration of China (Grant No. 2016-LY-024).

*Co-first authors.

**Corresponding author (E-mail: guoxf@sdau.edu.cn).