



# 低温锻炼对冰温贮藏牡丹切花抗冷性的影响

曹 满, 施 江, 史国安\*

(河南科技大学牡丹学院, 洛阳市牡丹生物学重点实验室, 河南洛阳 471023)

**摘 要:**以牡丹品种‘玉面桃花’、‘清香白’和‘凤丹’切花为试验材料, 测定室温对照(15~18 °C 保湿贮藏 3 d, RTS)、低温锻炼[(4±1) °C 保湿贮藏 3 d, CAS]、冰温贮藏[(4±1) °C 保湿贮藏 3 d, 然后转入(-4±1) °C 保湿贮藏 3 d, ITS]3 种处理的牡丹切花花枝不同器官(花瓣、花药、子房、萼片、叶柄、叶片、茎秆)的过冷点(SCP)和冰点温度(FP), 以及花瓣和叶片束缚水与渗透调节物质含量变化, 明确低温锻炼对其切花抗冷能力的影响, 为牡丹切花储运及销售过程中冰温贮藏温度控制提供参考依据。结果表明:经 4 °C 低温锻炼 3 d 的牡丹切花与室温对照相比, 低温锻炼处理使 3 个牡丹切花不同组织的 SCP 和 FP 显著降低, 但花瓣和叶片的束缚水、可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量均得到提高;冷锻炼后转入冰温贮藏处理进一步提高了牡丹切花花瓣和叶片的束缚水和可溶性蛋白质含量。研究发现, 4 °C 低温锻炼显著提高了牡丹切花的抗冷性, 使花枝能够更好地适应 30~150 d 长期贮藏的-3~-4 °C 冰温环境。

**关键词:**牡丹; 切花; 器官; 低温锻炼; 冰温贮藏; 抗冷性

**中图分类号:** Q945.78

**文献标志码:** A

## Effects of Low-temperature Acclimation on Cold Resistance of Tree Peony Cut Flowers in Ice Temperature Storage

CAO Man, SHI Jiang, SHI Guoan\*

(Luoyang Key Laboratory of Peony Biology, College of Mudan, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023 China)

**Abstract:** Super-cooling point and freezing point of seven cut flower organs (petals, anthers, ovary, sepals, petioles, leaves and stems) from three tree peony varieties ‘Yumiantaohua’, ‘Qingxiangbai’ and ‘Feng-dan’ under the room temperature storage (in 15–18 °C storage for 3 d, RTS), coldacclimation storage [in (4±1) °C storage for 3 d, CAS] and ice temperature storage [first in (4±1) °C storage for 3 d, and then turned to (-4±1) °C storage for 3 d, ITS] conditions were studied, and contents of bound water, soluble protein, soluble sugar and proline in petals and leaves of tree peony cut flowers were also examined, respectively. Having been stored at 4 °C for 3d, the results of CAS showed that compared with the RTS, CAS significantly reduced the super-cooling points(SCP) and freezing points(FP) of most cut flower organs of these three tree peony, increased the contents of bound water, soluble protein, soluble sugar and proline in petals and leaves. And after ITS for 3 d, the contents of bound water and soluble protein are further increased in petals and leaves, respectively. Thus, the CAS treatment significantly improved the

收稿日期: 2017-05-29; 修改稿收到日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(31372098); 河南省自然科学基金(162300410075, 112300410081)

作者简介: 曹 满(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事牡丹生物学研究。E-mail: 1136453758@qq.com

\* 通信作者: 史国安, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事牡丹生物学研究。E-mail: gashi1963@163.com

cold resistance of tree peony cut flowers and favored the ITS. These results provide the technical basis for the regulation and control of ITS(−3 to −4 ℃) and for long time storage (30 to 150 d) of tree peony cut flowers.

**Key words:** tree peony; cut flower; organ; cold acclimation; ice temperature storage; cold resistance

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)在中国栽培历史悠久,其花雍容华贵、富丽堂皇,素有“国色天香”、“花中之王”的美称<sup>[1]</sup>,被广泛引种于世界各地<sup>[2-3]</sup>。随着社会发展和人民生活水平的提高,牡丹鲜切花越来越受到人们喜爱<sup>[4]</sup>。生产实践中,牡丹鲜切花是切取牡丹花蕾,降温,迅速预冷,去余热,插入切花预处理液,放入聚乙烯薄膜袋,装入包装箱移到冷库进行冰温长期贮藏<sup>[5]</sup>。冰温保存温度过低会造成植物组织发生组织内结冰,产生冻害,严重影响组织的生物活性;温度高又会造成组织呼吸代谢消耗,导致花期缩短,大大降低牡丹切花的观赏品质及商品性能。因此,确定合适的冰温冷藏温度是牡丹鲜切花商品化中急需解决的关键问题之一。

目前,国内外关于过冷点温度及冰点温度在植物上的研究多集中在食品储藏及粮食与园艺作物的抗冷性防护上<sup>[6-9]</sup>,而有关牡丹切花抗冷性的研究鲜有报道<sup>[10-11]</sup>。因此,本试验以牡丹品种‘玉面桃花’、‘清香白’和‘凤丹’切花为试验材料,研究低温锻炼对其切花抗冷能力的影响,以期为牡丹切花储运及销售过程中冰温贮藏温度控制提供实验依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材 料

从河南科技大学牡丹科研基地取处于绽口期的‘玉面桃花’、‘清香白’和‘凤丹’3个牡丹品种切花花枝,立即装入聚乙烯塑料袋(不扎口)保湿,然后放入泡沫聚乙烯盒中保温,尽快运回实验室。

### 1.2 低温锻炼及冰温贮藏处理

以早上 8:00 采收的牡丹切花花枝,每 6 枝切花为一组,进行 3 组贮藏处理。其中,第一组对照(室温 15~18 ℃)保湿贮藏 3 d,为室温贮藏组(RTS);将第二组切花用报纸包裹装入聚乙烯塑料袋放于冰箱(4±1)℃温区冷锻炼 3 d,为低温锻炼组(CAS);第三组先同第二组于冰箱 4±1 ℃温区冷锻炼 3 d后,接着转入(−4±1)℃温区继续贮藏 3 d,再在 4 ℃温区回温 1 d,为冰温贮藏组(ITS)。试验每处理组重复 3 次。

贮藏过程中,每处理组取样测定切花花枝的 7 个器官组织(花瓣、花药、子房、萼片、叶柄、叶片、茎

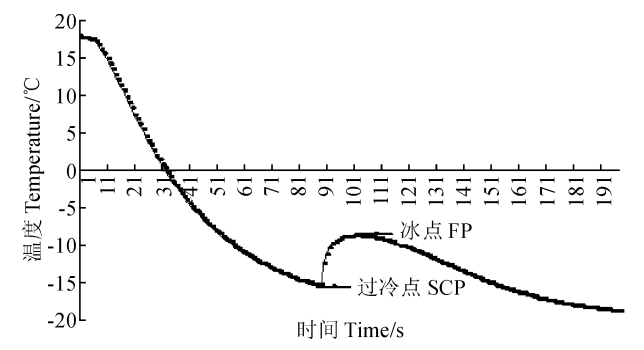


图 1 组织冻结曲线  
Fig. 1 Freezing temperature curve

杆)的过冷点和结冰点,每个器官重复测定 10 次;同时测定切花主要观赏器官花瓣和叶片自由水和束缚水含量,并取花瓣、叶片用液氮迅速冷冻储存至−40 ℃冰箱用于测定可溶性糖、可溶性蛋白质和脯氨酸含量。

### 1.3 生理指标测定

**1.3.1 过冷点及冰点温度** 利用热电偶测温仪(YAXIN-0232,北京雅欣仪器技术有限公司),按图 1 模式分别测定花器官的过冷点温度(SCP)及冰点温度(FP)<sup>[12-14]</sup>,采用微细钢针在表皮组织穿孔,插入热电偶测定电极,立即放入−20 ℃冰室,参比电极置于 0 ℃冰水,启动计算机记录冻结曲线。统计出不同花器官的 SCP 和 FP,以 FP 和 SCP 之差表示过冷能力(ΔE)<sup>[11]</sup>。

**1.3.2 自由水和束缚水含量** 按照赵世杰等<sup>[15]</sup>方法,用 0.5 cm<sup>−2</sup> 的打孔器分别钻取 300 片花瓣、叶片的组织小圆片平均分为 2 组,一组放入称量瓶 105 ℃杀青 5 min 然后于 85 ℃烘至恒重,计算出组织中水的总质量分数;另一组放入称量瓶加入 60%蔗糖溶液置于暗处 5 h,用阿贝折射仪测定溶液前后糖液的质量分数变化,计算出组织自由水的质量分数;组织束缚水的质量分数为水的总质量分数与自由水的质量分数的差值。

**1.3.3 渗透调节物质含量** 花瓣和叶片的可溶性糖含量用蒽酮比色法、可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝比色法和脯氨酸含量用茚三酮比色法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel2007 对实验数据进行统计学整理,用 SPSS20.0 软件对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各贮藏处理牡丹切花不同器官过冷点、冰点及过冷能力变化

植物在遭遇突然的低温时,能够通过组织的过冷反应来适应外界环境变化。3 个牡丹品种各处理切花花枝不同器官的过冷点温度(SCP)、冰点温度(FP)和过冷能力( $\Delta E$ )有显著差异(表 1),表明 3 个牡丹品种花枝各器官的异质性差异明显;同时,经过低温锻炼(CAS)后,不同器官的御冷能力均比室温贮藏对照(RTS)有不同程度提高。其中,‘玉面桃花’切花 RTS 下萼片和叶片组织的 SCP 和 FP 较高,两组织的 SCP 分别为 $-3.94$  和 $-4.08$   $^{\circ}\text{C}$ ,其 FP 分别为 $-3.04$  和 $-3.33$   $^{\circ}\text{C}$ ,易受低温伤害;CAS 均不同程度降低各组织的 SCP 和 FP,不影响花瓣组织的  $\Delta E$ ,却显著提高了萼片组织的  $\Delta E$ 。‘清香白’切花 RTS 下花瓣和萼片组织的 SCP 和 FP 较高,其 SCP 分别为 $-3.98$  和 $-3.55$   $^{\circ}\text{C}$ ,FP 分别为 $-3.06$  和 $-3.04$   $^{\circ}\text{C}$ ;CAS 显著降低花瓣和萼片组织的 SCP 和 FP,且提高了组织的  $\Delta E$ 。‘凤丹’切花 RTS 下花瓣和萼片组织的 SCP 和 FP 较高,其 SCP 分别为 $-4.06$  和 $-4.22$   $^{\circ}\text{C}$ ,FP 分别为 $-2.80$  和 $-3.21$   $^{\circ}\text{C}$ ,最易受到低温的危害;CAS 对花瓣组织的 SCP 和 FP 影响不明显,能显著降低萼片组织的 SCP 和 FP 及提高组织的御冷能力。

另外,各品种牡丹花枝经过 CAS,再转入进行冰温冷藏(ITS)后,花枝整体表现良好没有冻害发生(数据未列出另文发表)。3 个牡丹品种‘玉面桃花’、‘清香白’和‘凤丹’切花花枝对低温最敏感的器官组织 SCP 和 FP 分别为 $-4.84$ 、 $-3.78$  和 $-4.37$   $^{\circ}\text{C}$ ,及 $-3.85$ 、 $-3.32$  和 $-3.13$   $^{\circ}\text{C}$ ,均在冷库控制的一 $3\sim-5$   $^{\circ}\text{C}$ 贮藏冰温范围之内。说明对低温锻炼处理牡丹切花再进行冰温冷藏是一项重要的技术措施。

### 2.2 各贮藏处理牡丹切花花瓣和叶片束缚水和自由水含量变化

在植物细胞中自由水和束缚水相对含量的高低与组织的代谢活性有关。当自由水含量升高时,代谢的活性升高,生长发育快;当束缚水含量升高时,细胞内的原生质变成凝胶状态,植物代谢活性减弱,抗寒性增强,且束缚水/自由水值越大,组织抗性越强。由表 2 可知,经 CAS 处理后 3 个品种牡丹切花花瓣和叶片自由水含量均比对照 RST 极显著减少,花瓣自由水分别下降了 43.74、29.92 和 32.37%,

叶片自由水分别下降了 42.25、36.80 和 32.36%,‘玉面桃花’下降幅度显著高于‘清香白’和‘凤丹’。说明 CAS 能通过改变组织内的自由水和束缚水的相对含量来提高组织的御冷能力。

而 ITS 处理的牡丹切花花瓣和叶片的束缚水含量进一步升高,束缚水/自由水比值比 CAS 前提高 8~15 倍,极显著提高牡丹切花花枝花瓣和叶片的束缚水/自由水比值。其中,‘玉面桃花’花瓣束缚水、束缚水/自由水比值升高幅度大于‘清香白’和‘凤丹’,说明‘玉面桃花’自身的抗冷性在此方面高于另外 2 个品种。说明 ITS 处理显著提高了牡丹切花花瓣和叶片的抗冷性,且提高花瓣抗冷性的效果优于叶片。

### 2.3 各贮藏处理牡丹切花可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量变化

首先,3 个牡丹切花的花瓣和叶片可溶性蛋白质含量无显著差异,CAS 处理均提高了 3 个牡丹品种切花花瓣和叶片可溶性蛋白质含量,提高的幅度因品种不同而异(表 3)。其中,经过 CAS 处理后,‘玉面桃花’切花花瓣和叶片可溶性蛋白质含量增加幅度最大,分别比相应 RTS 处理增加了 34.10%和 72.02%( $P<0.01$ );CAS 亦显著提高了‘清香白’和‘凤丹’切花花瓣和叶片可溶性蛋白质含量,‘清香白’增幅分别为 11.50%和 51.41%,‘凤丹’增幅分别为 20.95%和 51.24%;CAS 处理花瓣可溶性蛋白质含量提高的幅度小于相应叶片。同时,牡丹切花花枝花瓣和叶片可溶性蛋白质含量在 ITS 条件下也进一步升高,‘玉面桃花’增幅分别为 79.64%和 195.15%,‘清香白’增幅分别为 28.08%和 210.42%,‘凤丹’增幅分别为 42.30%和 74.80%,以适应冰温环境。

其次,CAS 处理前后各品种牡丹切花花瓣和叶片可溶性糖含量亦存在一定的差异性。其中,‘玉面桃花’和‘凤丹’切花花瓣可溶性糖含量在 CAS 处理下均比室温贮藏对照显著提高,而‘清香白’则略有降低;3 个牡丹品种切花叶片可溶性糖含量在 CAS 处理下均比室温贮藏对照有所增加。同时,与室温贮藏对照相比,‘玉面桃花’花瓣和叶片可溶性糖含量在 ITS 处理下略微降低,‘清香白’和‘凤丹’则在 ITS 处理下均显著升高。

再次,CAS 处理显著提高了各品种牡丹切花花瓣和叶片脯氨酸含量。ITS 处理前后 3 个牡丹品种切花花瓣和叶片脯氨酸含量变化存在一定的差异。其中,与 RTS 对照相比,ITS 处理极显著地提高了

表 1 牡丹切花不同器官过冷点、冰点及过冷能力比较  
Table 1 Comparisons of SCP, FP and  $\Delta E$  in different parts of tree peony cut flowers

| 品种<br>Variety        | 器官<br>Organ | 过冷点温度<br>Super-cooling point(SCP)/ $^{\circ}\text{C}$ |               | 冰点温度<br>Freezing point (FP)/ $^{\circ}\text{C}$ |             | 过冷能力<br>Super-cooling capacity( $\Delta E$ )/ $^{\circ}\text{C}$ |             |
|----------------------|-------------|---|---------------|---|-------------|--|-------------|
|                      |             | RTS   | CAS           | ITS   | RTS         | CAS  | ITS         |
| 玉面桃花<br>Yumiantaohua | 花瓣 Petal    | -7.02±0.40b   | -6.32±0.64b   | -5.72±0.42a                                     | -6.02±0.21b | -4.85±0.62a  | -4.56±0.82a |
|                      | 花药 Anther   | -6.80±0.23a   | -10.27±0.83b  | -12.54±0.77c                                    | -4.66±0.57a | -8.02±0.54b  | -8.06±0.57c |
|                      | 子房 Ovary    | -5.51±0.51a   | -10.78±0.35b  | -8.33±0.79a                                     | -4.17±0.76a | -7.60±0.45b  | -7.02±0.86a |
|                      | 萼片 Sepal    | -3.94±0.22a   | -4.62±0.42b   | -5.69±0.76c                                     | -3.04±0.84a | -3.24±0.70a  | -4.05±0.57b |
|                      | 叶柄 Petiole  | -10.17±0.76a  | -12.35±0.63ab | -14.10±0.61b                                    | -7.11±0.80a | -8.16±0.74b  | -8.21±0.78b |
|                      | 叶片 Leaf     | -4.08±0.81a   | -5.78±0.57a   | -4.84±0.66a                                     | -3.33±0.86a | -4.84±0.57a  | -3.85±0.70a |
|                      | 茎秆 Stem     | -9.19±0.31a   | -11.26±0.86b  | -16.05±0.90c                                    | -6.03±0.86b | -7.02±0.70b  | -5.55±0.34a |
|                      |             |   |               |   |             |  |             |
| 清香白<br>Qingxiangbai  | 花瓣 Petal    | -3.98±0.41a   | -5.13±0.43b   | -4.90±0.16a                                     | -3.06±0.85a | -3.87±0.34a  | -3.75±0.36a |
|                      | 花药 Anther   | -5.90±0.95a   | -12.01±0.88b  | -5.42±0.78a                                     | -7.33±0.57b | -8.36±0.73c  | -4.49±0.81a |
|                      | 子房 Ovary    | -6.59±0.88b   | -12.44±0.79c  | -3.78±0.55a                                     | -5.10±0.38b | -6.54±0.72b  | -3.32±0.66a |
|                      | 萼片 Sepal    | -3.55±0.35a   | -5.69±0.80ab  | -6.77±0.95b                                     | -3.04±0.93a | -4.81±0.40b  | -5.84±0.73c |
|                      | 叶柄 Petiole  | -9.95±0.98a   | -11.42±0.64b  | -12.25±0.57b                                    | -5.75±0.33a | -6.57±0.58b  | -7.58±0.71b |
|                      | 叶片 Leaf     | -7.24±0.40b   | -9.19±0.39c   | -5.49±0.74a                                     | -6.99±0.39b | -8.02±0.34b  | -4.74±0.64a |
|                      | 茎秆 Stem     | -13.16±0.76a  | -14.70±0.99b  | -14.94±0.37b                                    | -9.31±0.87b | -10.34±0.73c   | -8.35±0.68a |
|                      |             |   |               |   |             |  |             |
| 凤丹<br>Fengdan        | 花瓣 Petal    | -4.06±0.22a   | -4.24±0.35ab  | -4.37±0.44b                                     | -2.80±0.67a | -2.82±0.66a  | -3.13±0.22b |
|                      | 花药 Anther   | -9.04±0.41b   | -19.21±0.68c  | -8.20±0.81a                                     | -8.28±0.75b | -12.95±0.92c   | -5.81±0.30a |
|                      | 子房 Ovary    | -8.94±0.99a   | -10.50±0.67c  | -9.34±0.82b                                     | -4.63±0.35b | -5.84±0.86b  | -3.21±0.72a |
|                      | 萼片 Sepal    | -4.22±0.93a   | -15.25±0.72b  | -5.98±0.33a                                     | -3.21±0.94a | -13.48±0.66b   | -4.20±0.78a |
|                      | 叶柄 Petiole  | -7.89±0.93a   | -10.08±0.81c  | -8.95±0.35b                                     | -4.75±0.34a | -5.81±0.75b  | -4.64±0.83a |
|                      | 叶片 Leaf     | -6.11±0.33a   | -6.15±0.35a   | -8.56±0.71b                                     | -5.70±0.34a | -5.45±0.52a  | -8.17±0.51b |
|                      | 茎秆 Stem     | -9.72±0.97a   | -23.44±0.51c  | -11.01±0.94b                                    | -5.55±0.73b | -18.98±0.86c   | -3.96±0.40a |
|                      |             |   |               |   |             |  |             |

注: RTS, 室温对照(15~18 $^{\circ}\text{C}$  保湿贮藏 3 d); CAS, 低温锻炼[(4±1) $^{\circ}\text{C}$  保湿贮藏 3 d]; ITS, 冰温贮藏[(4±1) $^{\circ}\text{C}$  保湿贮藏 3 d]后转入(-4±1) $^{\circ}\text{C}$  保湿贮藏 3 d]; 同行 3 个处理间不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );下同  
Note: RTS, Under the room temperature storage (in 15~18 $^{\circ}\text{C}$  storage 3 d); CAS, Cold acclimation storage [(in 4±1) $^{\circ}\text{C}$  storage 3 d]; ITS, Ice temperature storage [first in (4±1) $^{\circ}\text{C}$  storage 3 d, and then turned to (-4±1) $^{\circ}\text{C}$  storage 3 d]; The different normal letters in the same row represent significant difference at 0.05 level. The same as below

表 2 牡丹切花花瓣和叶片水分含量变化

Table 2 Changes of water content in petal and leaves of three tree peony cut flowers

| 品种<br>Variety        | 器官<br>Organ | 自由水 Free water/% |             |             | 束缚水 Bound water/% |             |             | 束缚水 Bound water/自由水 Free water |            |             |
|----------------------|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|--------------------------------|------------|-------------|
|                      |             | RTS              | CAS         | ITS         | RTS               | CAS         | ITS         | RTS                            | CAS        | ITS         |
| 玉面桃花<br>Yumiantaohua | 花瓣 Petal    | 77.16±0.66A      | 43.41±1.51B | 4.02±0.66C  | 9.42±3.11C        | 36.02±1.03B | 61.46±266A  | 0.12±0.06C                     | 0.83±0.08B | 15.29±0.66A |
|                      | 叶片 Leaf     | 71.86±0.86A      | 41.50±7.08B | 8.55±4.29C  | 6.58±0.28C        | 26.91±7.38B | 43.47±5.62A | 0.09±0.04C                     | 0.65±0.06B | 5.08±0.74A  |
| 清香白<br>Qingxiangbai  | 花瓣 Petal    | 78.89±0.71A      | 55.29±0.19B | 8.60±1.36C  | 7.47±1.01C        | 22.26±0.71B | 61.05±1.57A | 0.09±0.03C                     | 0.40±0.10B | 7.10±0.99A  |
|                      | 叶片 Leaf     | 72.14±0.96A      | 45.59±1.09B | 11.86±2.02C | 6.17±0.54C        | 19.57±0.36B | 47.86±0.87A | 0.09±0.10C                     | 0.43±0.09B | 4.04±0.76A  |
| 凤丹<br>Fengdan        | 花瓣 Petal    | 75.79±0.99A      | 51.26±1.79B | 6.70±2.17C  | 9.66±1.13C        | 28.38±2.22B | 62.97±2.49A | 0.13±0.08C                     | 0.55±0.34B | 9.40±0.81A  |
|                      | 叶片 Leaf     | 71.88±0.86A      | 44.21±2.83B | 9.06±2.22C  | 6.80±0.62C        | 24.89±4.79B | 55.14±0.98A | 0.09±0.10C                     | 0.56±0.72B | 6.09±0.81A  |

注:同行 3 个处理间不同大写字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ );下同

Note: The different capital letters in the same row represent significant difference at 0.01 level. The same as below

表 3 牡丹切花可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量变化

Table 3 Changes of soluble protein, soluble sugar and proline contents in petal and leaves of three tree peony cut flowers

| 品种<br>Variety        | 器官<br>Organ | 可溶性蛋白质 Soluble protein/(mg·g <sup>-1</sup> ) |              |              | 可溶性糖 Soluble sugar/(mg·g <sup>-1</sup> ) |             |             | 脯氨酸 Proline/(μg·g <sup>-1</sup> ) |              |              |
|----------------------|-------------|--|--------------|--------------|--|-------------|-------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
|                      |             | RTS  | CAS          | ITS          | RTS                                      | CAS         | ITS         | RTS                               | CAS          | ITS          |
| 玉面桃花<br>Yumiantaohua | 花瓣 Petal    | 16.01±0.97C                                  | 21.47±0.47B  | 28.76±0.25A  | 5.07±0.13b                               | 5.76±0.78a  | 4.77±0.40b  | 23.78±0.64B                       | 31.13±0.93A  | 24.97±0.48B  |
|                      | 叶片 Leaf     | 7.22±0.34C                                   | 12.42±0.83B  | 21.31±0.53A  | 4.51±0.51a                               | 4.98±0.10a  | 4.46±0.69a  | 22.46±0.92B                       | 27.82±0.52A  | 22.39±0.84A  |
| 清香白<br>Qingxiangbai  | 花瓣 Petal    | 16.95±0.92cB                                 | 18.90±0.23bB | 21.71±0.83aA | 5.07±0.18b                               | 4.70±0.19b  | 6.06±0.57a  | 14.38±0.76cB                      | 22.79±0.32aA | 17.76±0.33bB |
|                      | 叶片 Leaf     | 7.10±0.53C                                   | 10.75±0.34B  | 22.04±0.78A  | 4.75±0.76b                               | 5.48±0.59ab | 6.17±0.37a  | 14.25±0.87cB                      | 27.69±0.54aA | 17.36±0.85bB |
| 凤丹<br>Fengdan        | 花瓣 Petal    | 17.28±0.66C                                  | 20.90±0.17B  | 24.59±0.39A  | 2.41±0.52b                               | 3.72±0.37a  | 3.21±0.95ab | 15.57±0.61C                       | 39.15±0.52A  | 31.60±0.39B  |
|                      | 叶片 Leaf     | 8.90±0.28cB                                  | 13.46±0.76bA | 16.11±0.72aA | 2.81±0.59B                               | 4.52±0.79A  | 4.18±0.68A  | 16.83±0.44C                       | 35.24±0.64A  | 29.94±0.22B  |

‘凤丹’切花花瓣和叶片脯氨酸含量,增幅分别为102.95%和77.90%,‘清香白’也分别显著升高了23.50%和21.82%,而‘玉面桃花’没有显著变化。

3 讨 论

组织结冰导致植物组织因缺水而受到损伤,可明显降低粮食作物及园艺植物的生长速率甚至致死,是影响很多植物生存及分布的限制因子<sup>[16-17]</sup>。在低温来临时,植物体通过调节自身代谢,释放出潜热来缓解低温冻害现象的发生,进而避开组织结冰,使其适应低温环境,免除过冷对机体的伤害<sup>[18-19]</sup>,这种当外界环境温度低于结冰点温度而植物组织没有出现结冰的现象称为植物过冷现象,是植物在低温寒冷条件下自我保护的重要机制<sup>[20]</sup>。组织的过冷能力( $\Delta E$ ),即植物通过过冷现象以便适应不良环境的缓冲特性,是植物适应多变低温环境的结果。较强的过冷能力使生物体在低温下处于过冷却状态而不结冰,从而获得耐寒性<sup>[21-23]</sup>。

牡丹花期经常遭遇-5℃倒春寒甚至雨雪冰冻天气,牡丹花各器官组织均存在着明显的过冷现象来抵御低温危害<sup>[11]</sup>。当牡丹各器官组织温度下降到0℃以下低温时,组织内通过释放潜热使水分并不立即结冰,即仍保持过冷状态,以避免低温对组织带来伤害。本试验结果表明,与室温贮藏对照相比,低温锻炼使3个牡丹品种的过冷点、冰点温度显著降低,各组织器官的御冷能力均有不同程度的增加,转入冰温储藏各牡丹花枝未出现冻害现象。通过对比牡丹切花的花器官的 SCP、FP 和  $\Delta E$  的差异,品种‘玉面桃花’的适应能力强于品种‘清香白’和‘凤丹’;对于同一品种而言,其主要的观赏器官花瓣和

叶片的抗冷能力较低,在切花贮藏生产实践中,应注意其冰温储藏温度范围的设定。

低温锻炼后植物组织自由水含量相对减少,束缚水含量相对增加,从而增强植物的抗冷性<sup>[24]</sup>,本试验结果和前人研究结果一致。与室温贮藏对照相比,低温锻炼以及接着进行的冰温贮藏大幅度降低了组织的自由水含量,同时相应极显著地增加了束缚水含量。另外,可溶性糖和脯氨酸作为植物组织的环境信号、渗透调节剂和冰冻保护剂<sup>[25]</sup>,低温锻炼也相应提高了3个牡丹品种切花花瓣和叶片可溶性糖与脯氨酸含量,而冰温储藏后‘玉面桃花’变化则不显著。说明3个牡丹品种切花适应低温的生理机制有一定的差异。

在牡丹切花贮藏实践上,牡丹切花采摘后先进行降温预冷,至4℃进行低温锻炼,再继续降温至冰温储藏环境,在保证牡丹切花的商品观赏性的前提下,尽可能地减少组织的呼吸消耗,可以有效地延长牡丹切花的安全贮藏期达30~150 d,为牡丹切花的后续销售工作提供了有效的技术保障<sup>[5]</sup>。但冰温贮藏温度的确定存在一定的盲目性,为避免牡丹切花花瓣等敏感组织免受低温伤害,维持其最佳观赏价值,今后应对不同品种牡丹切花抗冷的生理分子适应机制的进一步研究,应围绕模拟不同低温环境温度及温度降低速率开展,观察花瓣及其它组织的适应情况,测定其相应的过冷及冰晶形成、能量代谢、抗冻基因表达和瓶插品质变化。深入研究这些问题不仅能够进一步了解牡丹切花的低温耐受机制,而且对降低切花牡丹储运过程中造成的经济损失也具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 李嘉钰. 中国牡丹与芍药[M]. 北京:中国林业出版社, 1999.

[2] 伍春贤,刘海涛. 我国牡丹栽培的历史[J]. 花卉, 2015, (2): 28-29.

WU C X, LIU H T. The cultivation history of the tree peony in China[J]. *Flowers*, 2015, (2): 28-29.

[3] 吴新盛, 杨尹章. 牡丹的栽培技术与养护管理[J]. 现代园艺, 2017, (10): 17-17.

[4] 孟海燕. 牡丹切花规模化贮藏技术基础研究[D]. 河南洛阳:河南科技大学, 2012.

[5] 史国安,郭香凤,包满珠. 一种用于长期贮藏牡丹及芍药鲜切花的工艺方法[P]. 中国专利:201110350910. 9

[6] JAMES C, SEIGNEMARTIN V, JAMES S J. The freezing and super-cooling of garlic (*Allium sativum* L.) [J]. *Int J Refri*, 2009, **32**(2): 253-260.

[7] 马文涛,樊卫国. 贵州野生柑橘的抗寒性测定和综合评价[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(10): 2 063-2 069.

MA W T, FAN W G. Determination and comprehensive evaluation on cold-tolerance of wild citrus from Guizhou[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2014, **34**(10): 2 063-2 069.

[8] 范月仙,王 鹏,李生泉,等. 临界生长温度锻炼对棉苗抗冷性的影响[J]. 棉花学报, 2011, **23**(1): 90-93.

FAN Y X, WANG P, LI S Q, *et al*. Effect of acclimating at the critical growth temperature on chilling resistance of cotton

seedlings[J]. *Cotten Science*, 2011, **23**(1): 90-93.

[9] 令 凡, 焦 健, 李朝周, 等. 不同油橄榄品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性综合评价[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(3): 508-515.

LING F, JIAO J, LI C Z, *et al.* Physiological response and comparensive evaluation of cold resistance under cold stress for different varieties of *Olea europaea*[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2015, **35**(3): 508-515.

[10] 史国安, 孟海燕, 李委涛, 等. 牡丹花器官结冰点和过冷却点的研究[J]. 园艺学报, 2011, **38**(S): 2 627-2 627.

SHI G A, MENG H Y, LI W T, *et al.* Research on the freezing point and cooling point of tree peony flower organs [J]. *Acta Horti Sin*, 2011, **38**(S): 2 627-2 627.

[11] 王 玮, 张旭东, 施 江, 等. 不同品种牡丹萌芽过程中组织抗冷性的变化. 北方园艺, 2013, (6): 52-56.

WANG W, ZHANG X D, SHI J, *et al.* Changes of cold resistance of floral organs during sprout in different tree peony cultivars[J]. *Northern Horticulture*, 2013, (6): 52-56.

[12] 尚海涛, 凌建刚, 朱 麟, 等. 葡萄冰点测定及冰温贮藏实验的研究[J]. 制冷学报, 2014, **35**(5): 55-60.

SHANG H T, LING J G, ZHU L, *et al.* Study on freezing points and ice temperature storage of grape[J]. *J Refrigeration*, 2014, **35**(5): 55-60.

[13] 孙晓光, 张晓曼, 孟庆瑞, 等. 仁用杏抗晚霜优异品种花器官抗寒性研究[J]. 中国果树, 2016, (1): 11-14.

[14] 王 静, 张晓煜, 杨 洋, 等. 宁夏主要果树花器官及幼果霜冻临界温度比较研究[J]. 北方园艺, 2015, (7): 9-13.

WANG J, ZHANG X Y, YANG Y, *et al.* Comparative study of critical temperature suffering frost of floral organs and young fruit of the main fruit trees in Ningxia Province [J]. *Northern Horticulture*, 2015, (7): 9-13.

[15] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.

[16] PEARCE RS. Plant freezing and damage[J]. *Ann Bot*, 2001, **87**: 417-424.

[17] TELLO ALONSO H A, PERALTA J M, RUBOIOLO A C, *et al.* Prediction of the freezing point of multicomponent liquid refrigerant solutions[J]. *J Food Engin*, 2011, **104**(1): 143-148.

[18] KHANI A, MOHARRAMIPOUR S. Cold hardiness and supercooling capacity in the overwintering larvae of the codling moth, *Cydia pomonella* [J]. *J Insect Sci*, 2010, **10**(83): 1-12.

[19] ARIAS N S, SCHOLZ F G, GOLDSTEIN G, *et al.* The cost of avoiding freezing in stems: trade-off between xylem resistance to cavitation and supercooling capacity in woody plants[J]. *Tree Physiology*, 2017, **37**(9): 1 251-1 262.

[20] WILSON P W, HENEGHAN A F, HAYMET A D J. Ice nucleation in nature: supercooling point(SCP) measurements and the role of heterogeneous nucleationq[J]. *Cryobiology*, 2003, **46**: 88-98.

[21] JAMES C, HANSER P, JAMES S J. Super-cooling phenomenon in fruits, vegetables and sea foods[C]. 11th Int Congress Engin Food (ICEF), 2011, Athens: 22-26.

[22] SOUDI S H, MOHARRAMIPOUR S. Cold Tolerance and supercooling capacity in overwintering adults of elm leaf beetle *Xanthogaleruca luteola* (coleoptera: chrysomelidae)[J]. *Envirom Entomol*, 2011, **40**(6): 1 546-1 553.

[23] ISSARTEL J, VOITURON Y, ODAGESCU V. Freezing or super-cooling: how does an aquatic subterranean crustacean survive exposures at subzero temperatures[J]. *J Exp Biol*, 2006, **209**(6): 3 469-3 475.

[24] 魏秀清, 许 玲, 章希娟, 等. 莲雾对低温胁迫的生理响应及抗寒性分析[J]. 果树学报, 2016, **33**(1): 73-80.

WEI X Q, XÜ L, ZHANG X J, *et al.* Physiological responses of wax apple to low temperatures and its cold resistance [J]. *J Fruit Science*, 2016, **33**(1): 73-80.

[25] 王以斌, 缪锦来, 姜英辉, 等. 脯氨酸和可溶性糖在 Antarctic 冰藻低温适应机制中的作用[J]. 生物技术通报, 2016, **32**(2): 198-202.

WANG Y B, MIU J L, JIANG Y H, *et al.* Roles of proline and soluble sugar in the cold-adaptation of antarctic ice microalgae [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, **32**(2): 198-202.

(编辑: 裴阿卫)