

# 杏品种花器官过冷却点及结冰点的研究

孟庆瑞, 王文凤, 梁隐泉, 聂庆娟, 李彦慧, 杜绍华, 杨建民

(河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定 071001)

**摘要:** 【目的】弄清不同发育时期杏花、幼果过冷却点和结冰点变化, 不同花器官过冷却点和结冰点的差异, 为杏花期霜冻害机理的研究提供基础数据。【方法】以 3 个杏品种为试材, 利用能准确模拟自然界霜夜降温过程的人工霜箱, 测定不同发育时期花器官、幼果的过冷却点、结冰点, 统计杏花器官受冻情况。【结果】随杏花发育进程的推移, 3 个杏品种自大蕾期至幼果期过冷却点、结冰点呈现明显上升趋势, 表明抗寒力下降; 不同品种、不同花器官过冷却点、结冰点存在差异, 品种间表现为花器官过冷却点、结冰点越低, 抗性越强, 从过冷却点到结冰点的平均温度“跃升”值越大; 过冷却点并不表示一个确定值, 而是一个范围。花瓣过冷却点频率分布较雄蕊、雌蕊分散; 杏花器官通过保持过冷却状态回避低温伤害, 但对结冰十分敏感, 一旦结冰, 升温后花器官均受害而褐变。【结论】不同发育时期、不同品种不同花器官过冷却点和结冰点存在差异。

**关键词:** 杏树; 花器官; 过冷却点; 结冰点; 霜冻

## Study on Supercooling Point and Freezing Point in Floral Organs of Apricot

MENG Qing-rui, WANG Wen-feng, LIANG Yin-quan, NIE Qing-juan, LI Yan-hui, DU Shao-hua, YANG Jian-min

(College of Landscape Architecture and Tourism, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, Hebei)

**Abstract:** 【Objective】The aim of this study is to provide basic data for study on the mechanism of frost by making clear the changes of supercooling poin (SCP) and freezing point (FP) in flower and young fruit at different developmental stages of apricot, and the differences among floral organs. 【Method】Using an artificial climate chamber, SCP and FP in flower and young fruit at different developmental stage and the degree of freezing damage of floral organs in three apricot cultivars were studied. 【Result】With the development of flower buds, SCP and FP increased, which indicated that cold resistance decreased. SCP and FP varied with different floral organs. For different apricot cultivars, the lower SCP or FP of floral organs was, the more resistance the cultivar had, and the lager the interval between SCP and FP was. SCP was not a constant value, but a range. The frequency of SCP in petals was more dispersing than that in stamens and pistils. Floral organs could maintain a supercooling state to avoid ice formation, but they were sensitive to freezing. Once floral organs froze, they turned brown after thawing. 【Conclusion】SCP and FP varied with different developmental stages and different floral organs.

**Key words:** Apricot (*Prunus armeniaca* L.); Floral organs; Supercooling point; Freezing point; Frost

## 0 引言

【研究意义】近年来, 由于“暖冬”现象而引起的晚霜危害在中国北方杏产区发生频繁, 导致杏大面积减产, 甚至绝收, 给生产带来巨大损失<sup>[1-4]</sup>。因此, 深入研究杏抗寒机理, 对于选育优质、抗寒品种及预

防晚霜危害具有理论和实际意义。【前人研究进展】关于杏霜冻害机理的研究已取得一定进展, 如霜冻发生后对不同杏品种抗霜能力进行田间调查<sup>[5,6]</sup>, 利用低温冰箱设置不同低温, 研究霜冻对杏花器官、幼果生理生化和组织结构的影响<sup>[7-11]</sup>, 或通过电导法配以 Logistic 方程推导的半致死温度 (LT<sub>50</sub>), 及根据田间

收稿日期: 2007-01-10; 接受日期: 2007-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30471414)

作者简介: 孟庆瑞 (1976-), 女, 河北沧州人, 博士研究生。研究方向为抗寒生理和经济林栽培。E-mail: mqru@126.com。通讯作者杨建民 (1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为植物种质资源及抗性生理。Tel: 0312-7528798; E-mail: yangjm3706@sina.com

调查与百叶箱记录的最低温度建立关系确定杏花器官和幼果霜冻的临界温度<sup>[12-14]</sup>。但生产实际中杏花霜冻发生时期往往呈现不规律性,即霜冻害可能在杏花发育的不同时期发生,因此,研究杏花不同发育时期花器官及幼果抗霜的临界温度,对于深入研究杏花霜冻害机理具有重要的意义。【本研究切入点】目前,关于杏花不同发育时期花器官、幼果抗霜的临界温度及抗寒性的研究尚未见报道。【拟解决的关键问题】本试验采用能够准确模拟自然界霜夜降温过程的人工模拟霜箱<sup>[10,11,15]</sup>,以不同杏花器官、幼果为试材,研究杏花不同发育时期花器官、幼果的过冷却点和结冰点及对低温的反应。阐明杏花不同发育时期花器官、幼果的过冷却点、结冰点温度,为深入研究杏花期霜冻机理提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试材选自保定市满城绿龙杏生产园‘凯特’、‘金太阳’、‘红荷包’3个杏(*Prunus armeniaca* Linn.)品种,树龄5~6年生。分别于大蕾期、初花期、盛花期、幼果期(盛花后9d),随机取每个品种东、西、南、北4个方向树冠中部的1年生中果枝组成混合样。试验采用单株小区,重复3次。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 过冷却点、结冰点的测定** 试验以大蕾期、初花期的杏花花瓣,盛花期的花瓣、雄蕊、雌蕊,及盛花后9d的幼果的外果皮为测定部位。取杏枝条置人工霜箱内<sup>[15]</sup>,将PT-100型热电偶温度传感器探头安置在待测部位上,温度传感器与FrosTem40数据采集系统和微机连接,计算机每10s扫描1次,自动连续记录数据、分析组织表面温度变化,绘制温度变化曲线,精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。模拟自然界霜夜降温过程,以 $1^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}$ 的速度降温。试验设 $-1^{\circ}\text{C}\sim-7^{\circ}\text{C}$ 7个温度,待温度降到设定值保持0.5h,之后模拟日出前后升温过程,在 $-1\sim 1^{\circ}\text{C}$ 控制升温速度在 $1^{\circ}\text{C}/0.5\text{h}$ 。模拟升温到 $5^{\circ}\text{C}$ 以上,取出试验材料室内水培,24h后进行冻害调查。

由温度曲线可确定过冷却点和结冰点(图1)。当温度降到一定程度时,花器官细胞溶液从液态转变为固态时释放潜热,温度骤然上升,温度变化曲线出现峰值跳跃,该峰的起点温度就是过冷却点(T1)。回升到一定温度后,冰晶核形成,温度不再上升,晶体增长,放热与吸热处于平衡状态,此时温度即结冰

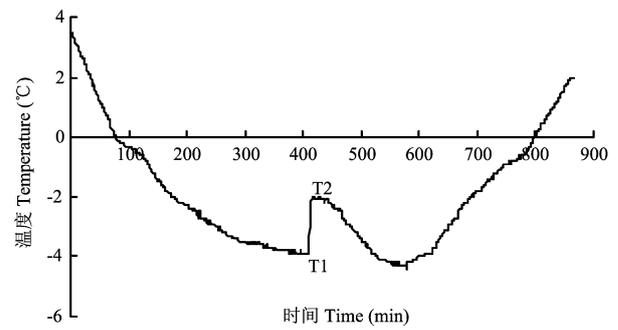


图1 组织温度变化曲线

Fig. 1 Variation curve of tissue temperature

点(T2)。

**1.2.2 花器官冻害调查** 低温处理后,分别对受冻情况进行统计,花瓣、雄蕊、雌蕊肉眼观察呈水浸状并变褐色者统计为受冻害,未变褐色统计为正常。

### 1.3 数据统计

数据处理采用SPSS统计分析软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同发育时期花及幼果的过冷却点及结冰点

对3个杏品种大蕾期、初花期和盛花期花瓣及幼果期幼果过冷却点、结冰点的研究结果(表1)表明,随花器官发育进程的推移,3个品种的过冷却点、结冰点呈上升趋势。3个品种幼果过冷却点和结冰点平均较大蕾期、初花期、盛花期花瓣高 $3.0^{\circ}\text{C}$ 、 $1.4^{\circ}\text{C}$ 、 $0.9^{\circ}\text{C}$ ,和 $2.6^{\circ}\text{C}$ 、 $1.4^{\circ}\text{C}$ 、 $0.8^{\circ}\text{C}$ ,不同物候期过冷却点、结冰点由低到高的顺序为大蕾期、初花期、盛花期、幼果期,即随发育进程的推移,花器官抗寒能力下降,方差分析差异达显著水平。

由表1还可以看出,花器官不同发育时期中,3个品种的过冷却点、结冰点均表现为‘凯特’ $>$ ‘金太阳’ $>$ ‘红荷包’。根据对花器官发育不同时期过冷却点和结冰点温度的研究结果,3个杏品种抗寒能力由弱到强的顺序为凯特、金太阳、红荷包。

### 2.2 不同花器官过冷却点及结冰点

从表2可见,盛花期花器官过冷却点变化范围 $-3.0^{\circ}\text{C}\sim-4.2^{\circ}\text{C}$ ,结冰点变化范围在 $-2.0^{\circ}\text{C}\sim-2.7^{\circ}\text{C}$ 。不同花器官过冷却点和结冰点也存在差异,花瓣、雄蕊、雌蕊过冷却点平均为 $-3.8^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.4^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.2^{\circ}\text{C}$ ,结冰点平均为 $-2.6^{\circ}\text{C}$ 、 $-2.1^{\circ}\text{C}$ 、 $-2.0^{\circ}\text{C}$ ,即花瓣过冷却点和结冰点最低,雄蕊次之,雌蕊最高,花瓣、雄蕊、雌蕊从过冷却点到结冰点的平均温度

表 1 不同发育时期花及幼果过冷却点和结冰点 (°C, X±SE, n=20~30)

Table 1 Supercooling point and freezing point in apricot flowers and young fruits at different developmental stages

发育时期 Developmental stages	过冷却点 Supercooling point (°C)			结冰点 Freezing point (°C)		
	红荷包 Honghebao	金太阳 Golden sun	凯特 Katy	红荷包 Honghebao	金太阳 Golden sun	凯特 Katy
大蕾期 Buds	-6.3±0.02 dC	-6.0±0.06 dC	-5.2±0.07cC	-4.6±0.19 cC	-4.4±0.12dC	-4.0±0.18dC
初花期 First blossom	-4.5±0.04cB	-4.3±0.08 cB	-4.0±0.18 bB	-3.4±0.08 bBC	-3.1±0.02cB	-3.1±0.08 cB
盛花期 Full blossom	-4.2±0.03bB	-3.6±0.08 bAB	-3.5±0.04 bB	-2.7±0.16 abAB	-2.4±0.07 bAB	-2.4±0.13 bB
幼果期 Fruits	-3.3±0.02aA	-2.9±0.02 aA	-2.3±0.03 aA	-2.1±0.08 aA	-1.8±0.16 aA	-1.3±0.04 aA

同列数字后不同大、小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平。下同

Different common capital and small letters after data within the same column indicate the significance difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same as below

表 2 不同花器官过冷却点及结冰点 (°C, X±SE, n=20~30)

Table 1 Supercooling point and freezing point in different floral organs of apricot

花器官 Floral organs	过冷却点 Supercooling point (°C)			结冰点 Freezing point (°C)		
	红荷包 Honghebao	金太阳 Golden sun	凯特 Katy	红荷包 Honghebao	金太阳 Golden sun	凯特 Katy
花瓣 Petal	-4.2±0.07 bB	-3.7±0.08 bB	-3.5±0.05 bB	-2.7±0.03 cB	-2.5±0.04 bB	-2.5±0.05 bB
雄蕊 Stamen	-3.6±0.02 aA	-3.3±0.04 aA	-3.3±0.04 bAB	-2.3±0.02 bAB	-2.1±0.03 aA	-2.0±0.02 aA
雌蕊 Pistil	-3.4±0.03 aA	-3.2±0.07 aA	-3.0±0.05 aA	-2.0±0.02 aA	-2.0±0.01 aA	-2.1±0.07 aA

“跃升”值分别为 1.23°C、1.27°C、1.17°C，这可能与器官组织水分含量有关。

不同品种花器官从过冷却点到结冰点的温度“跃升”值不同，以花瓣为例，‘凯特’、‘金太阳’、‘红荷包’3个品种分别跃升了 1.0°C、1.2°C、1.5°C，即过冷却点越低，“跃升”值越大。表明不同花器官抗寒性因品种不同而异，依据花瓣、雄蕊、雌蕊过冷却点、结冰点推断，品种抗寒性由弱到强为‘凯特’、‘金太阳’、‘红荷包’。

### 2.3 杏花器官过冷却点频率分布

过冷却点不是确定值，而是一个范围。以‘红

荷包’花器官为例，以 0.5°C为区间统计过冷却点频率如图 2 所示，保持过冷却状态的能力因花器官不同而异，花瓣过冷却点最高值为-2.8°C，最低为-6.3°C。-2.8~-3.2°C区间仅 5 朵花花瓣达过冷却点温度，随着温度降低频率逐渐增加，-3.8~-4.2°C时频率达最大值 29，之后逐渐降低，至-6.3~-6.7°C频率为 3；雄蕊、雌蕊过冷却点变化范围分别为-2.6°C~-5.6°C，-2.5°C~-5.2°C，频率分布最高的区间分别为-3.6~-4.0°C和-3.2~-3.6°C。表明雄蕊、雌蕊过冷却点较花瓣高 1°C~2°C，可见抗霜冻能力以花瓣最强，雌蕊最弱。

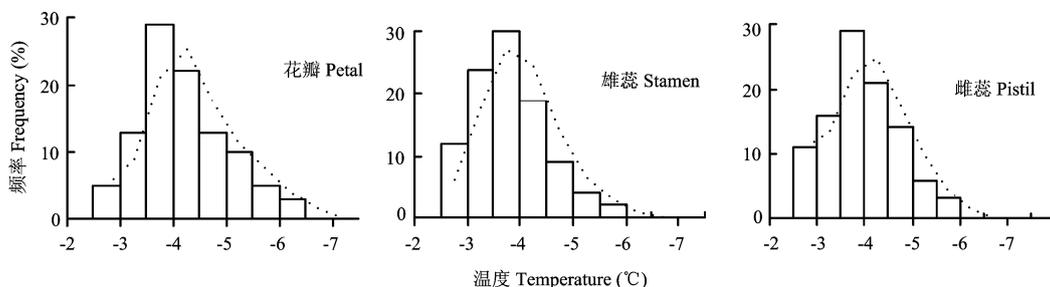
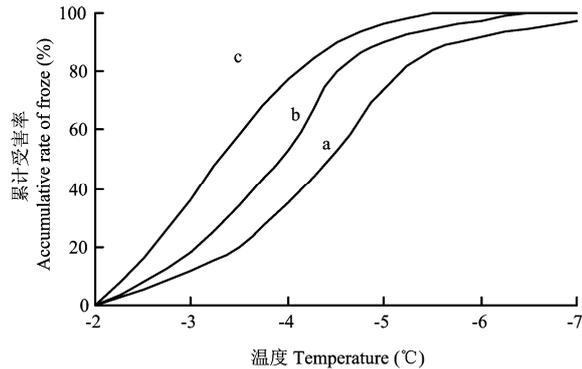


图 2 红荷包杏花器官过冷却点频率分布

Fig. 2 Frequency of supercooling points in apricot floral organs of Honghebao

## 2.4 花器官对低温的反应

当温度下降到 0℃ 以下, 花器官并不马上结冰, 而保持过冷却状态。图 3 为不同低温处理下红荷包花器官累积冻害情况。由图 3 可见, 累计冻害呈 S 形增大。在 -2℃ 以上低温时花器官均保持过冷却状态, 升温后未见褐变。随温度降低花器官累积冻害率则呈上升趋势, -3℃ 时花瓣累积冻害率为 12%, -4℃ 时为 34.8%, -5℃ 时为 73.5%, -6℃ 时高达 92.0%, 花器官累积冻害率由高到低的顺序为雄蕊、雌蕊、花瓣。



a: 花瓣 Petal; b: 雄蕊 Stamen; c: 雌蕊 Pistil

图 3 ‘红荷包’杏花器官累积冻害率

Fig. 3 Accumulative rate of frozen in apricot floral organs of ‘Honghebao’

试验中, 温度降到一定程度时, 花器官发生温度跃升开始结冰, 至重新降到开始跃升的温度 (过冷却点) 时, 花器官均受冻害而褐变, 表明过冷却点是组织结冰危害的临界温度, 而结冰是花遭受霜冻的主要原因, 褐变则是受害的直观表现。

## 3 讨论

杏花期霜冻害是制约杏树生产发展的一个难题, 为了解决这一问题, 众多学者围绕着杏花期霜冻害的机理从抗霜品种的选育、霜冻发生对器官生理生化、组织解剖构造以及冰核细菌对花器官抗寒性影响等方面进行了深入系统的研究, 取得了重要的研究成果<sup>[6-15]</sup>。但是, 由于霜冻害是一个十分复杂的生理现象<sup>[16]</sup>, 而且霜冻害发生时期受气候条件的影响, 其发生呈现出 irregularity, 可能发生在花器官发育的不同时期, 因此, 要全面阐明杏花期霜冻害的机理, 必须将品种、气候条件、管理水平以及杏花发育的不同阶段等多种因素综合起来全面考虑才能从根本上解决问题。本研究在

前人对杏花期霜冻害机理研究的基础上, 以杏花发育的不同时期为突破口, 采用能够准确模拟自然界霜夜降温过程的人工霜箱, 重点研究了杏花不同发育时期的过冷却点和结冰点温度的变化。研究表明, 从蕾期到幼果期, 随着发育进程的推移, 过冷却点和结冰点呈现明显的上升趋势, 抗寒力下降, 该结果与王飞等<sup>[7]</sup>的试验均说明了杏花本身的抗寒性与其发育时期有关。彭伟秀等<sup>[17]</sup>研究表明, 器官发育较快可避开受冻临界期而减轻霜冻害。而对杏树上 INA 细菌研究表明, INA 细菌在花蕾上较待开花和盛开花上分布频率高<sup>[18]</sup>, 据此可推测, 花器官本身的遗传性引起发育迟及早及 INA 细菌分布频率随杏花发育进程的变化, 均可影响器官抗寒能力。另外, 作为衡量抗寒能力重要指标之一的过冷却点<sup>[19-23]</sup>受生化物质种类、含量影响<sup>[24]</sup>, 杏器官过冷却点随着发育进程推移而上升, 抗寒力减弱, 可能因为细胞内存在一个抗寒物质体系, 春季温度回升后, 经过低温锻炼形成的抗寒物质, 如糖、蛋白等逐渐消失所致。本研究为深入开展杏花霜冻害机理提供了过冷却点和结冰点的基础数据, 而不同发育时期杏花抗寒物质、组织结构、INA 在花器官间的分布变化及其与抗寒性的关系需待进一步的研究。

当温度下降到 0℃ 以下时, 杏花器官组织内水分并不马上结冰而仍然保持液态, 即过冷却状态, 处于过冷却状态的组织不受伤害, 过冷却点越低, 抗寒性越强。本试验中, 杏花、幼果均可以利用过冷却避免 0℃~2℃ 的结冰危害 (图 3), 当外界温度低于组织自身能抵御的最低温度 (过冷却点) 时, 组织释放潜热 (图 1, T1), 温度突然上升并开始结冰 (图 1, T2), 而 T2, 即结冰点, 决不会回升到 0℃, 组织温度一旦自 T1 跳跃上升至 T2 开始结冰, 等温度回落再升至室温后均发生褐变, 表明花器官不耐结冰, 是依靠保持过冷却状态避免冰晶形成来抵御霜害<sup>[25]</sup>, 过冷却温度是器官生理适应的低温下限。

## 4 结论

4.1 从蕾期到幼果期, 杏花、幼果过冷却点、结冰点存在差异, 表现为随发育进程的推移, 过冷却点、结冰点均呈下降趋势, 抗寒性减弱。幼果对霜冻最敏感, 而盛花期是杏花器官最为敏感的时期。

4.2 花器官中以花瓣过冷却点和结冰点最低, 雄蕊次之, 雌蕊最高, 依据花瓣、雄蕊、雌蕊过冷却点、结冰点推断, 品种抗寒性顺序为 ‘红荷包’ > ‘金太阳’

> ‘凯特’。

4.3 过冷却点并不是一个确定值,而是一个范围,即同种花器官间也存在差异。由频率分布可看出雄蕊、雌蕊过冷却点较花瓣高 1℃~2℃。花器官组织通过保持过冷却状态避免结冰伤害,而一旦结冰,花器官均发生褐变,表明杏花器官不耐结冰,而过冷却温度是器官生理适应的低温下限。

## References

- [1] 杨建民,周怀军,王文凤. 果树霜冻害研究进展. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 54-58.  
Yang J M, Zhou H J, Wang W F. The advance in frost injury research of fruit trees. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3): 54-58. (in Chinese)
- [2] 郑荣庭. 果树栽培学总论(第三版). 北京: 中国农业出版社, 1997: 303.  
Zheng R T. The pandect of pomology (3 rd). Beijing: China Agricultural Press, 1997: 303. (in Chinese)
- [3] Currero P, Scalabreli C, Flocchi C. Influence of light and chilling condition on apricot bud opeing. *Acta Horticulturae*, 1991, 293: 285-289.
- [4] Suranyz D. Hormonal control of frost injuries on apricot trees. *Acta Horticulturae*, 1991, 293: 341-344.
- [5] 陈学森,沈洪波,张艳敏. 杏及大樱桃花器官冻害调查. 园艺学报, 2001, 28(4): 373.  
Chen X S, Shen H B, Zhang Y M. Freezing injury investigation of apricot and sweet cherry flowers. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(4): 373. (in Chinese)
- [6] 黄永红,沈洪波,陈学森. 杏树抗寒生理研究初报. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 191-195.  
Huang Y H, Shen H B, Chen X S. A preliminary study on cold resistant physiology of apricot. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 36(2): 191-195. (in Chinese)
- [7] 王 飞,陈登文,李嘉瑞,何 伟. 杏花及幼果的抗寒性研究. 西北植物学报, 1995, 15(2): 133-137.  
Wang F, Chen D W, Li J R, He W. Studies on hardiness of apricot flowers and young fruits. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1995, 15(2): 133-137. (in Chinese)
- [8] 王 飞,王 华,陈登文,李嘉瑞. 杏品种花器官耐寒性研究. 园艺学报, 1999, 26(6): 356-359.  
Wang F, Wang H, Chen D W, Li J R. A study on the hardiness of flower organ of apricot varieties. *Acta Horticulturae Sinica*, 1999, 26(6): 356-359. (in Chinese)
- [9] 王 华,王 飞,陈登文,丁 勤. 低温胁迫对杏花 SOD 活性和膜脂过氧化的影响. 果树科学, 2000, 17(3): 197-201.  
Wang H, Wang F, Chen D W, Ding Q. Effect of low temperature stress on SOD activity and membrane deroxidization of apricot flowers. *Journal of Fruit Science*, 2000, 17(3): 197-201. (in Chinese)
- [10] 杨建民,孟庆瑞,彭伟秀,李绍华,孙福在,赵廷昌. 冰核细菌对杏花器官抗寒性的影响. 园艺学报, 2002, 29(1): 20-24.  
Yang J M, Meng Q R, Peng W X, Li S H, Sun F Z, Zhao T C. The effect of ice nucleation active bacteria on cold resistance of apricot flower organs. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, 29(1): 20-24. (in Chinese)
- [11] 彭伟秀,杨建民,张 芹,孟庆瑞. 冰核细菌对仁用杏胚珠超微结构的影响. 园艺学报, 2004, 31(1): 21-24.  
Peng W X, Yang J M, Zhang Q, Meng Q R. Effect of ice nucleation active bacteria on the ultrastructure of apricot varieties ovule. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(1): 21-24. (in Chinese)
- [12] 王 飞,李嘉瑞,陈登文. 用电导法配合 Logistic 方程确定杏花期的抗寒性. 西北农业大学学报, 1997, 25(5): 59-62.  
Wang F, Li J R, Chen D W. Cold resistance determination of apricot flower dates with electronlyte leakage and logistic equation. *The Journal of Northwest Agricultural University*, 1997, 25(5): 59-62. (in Chinese)
- [13] 王 飞,陈登文,高爱琴,李嘉瑞. 杏品种一年生休眠枝、花、幼果抗寒的相关分析. 西北植物学报, 1999, 19(4): 618-622.  
Wang F, Chen D W, Gao A Q, Li J R. The analysis of coefficient of hardiness on shoot-tissue flowers and young fruits of varieties of apricot. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(4): 618-622. (in Chinese)
- [14] 李 疆,罗淑萍,杨序德,玉素甫,杨立群. 花期低温对仁用杏花器官危害程度的影响. 新疆农业大学学报, 2001, 24(4): 22-24.  
Li J, Luo S P, Yang X D, Yu S F, Yang L Q. Effects of low temperature in blooming period on injury to blossom organs of kernelled apricot. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2001, 24(4): 22-24. (in Chinese)
- [15] 孙福在,赵廷昌,杨建民,曹晓宇,唐朝荣,孟庆瑞. 杏树上冰核细菌种类及其冰核活性与杏花霜冻关系的研究. 中国农业科学, 2000, 33(6): 50-58.  
Sun F Z, Zhao T C, Yang J M, Cao X Y, Tang C R, Meng Q R. Species of ice nucleation active bacteria on the apricot and the relationship between their activity and flower frost. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 50-58. (in Chinese)
- [16] 冯玉香,何维勋. 霜冻的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 40-54.  
Feng Y X, He W X. *Study on Frost Injury*. Beijing: China Meteorological Press, 1996: 40-54. (in Chinese)

- [17] 彭伟秀, 杨建民, 张 芹, 王保柱, 马黎明, 邓有红, 吴颖鑫. 杏花器官组织抗寒性研究. 果树学报, 2002, 19(2): 108-110.  
Peng W X, Yang J M, Zhang Q, Wang B Z, Ma L M, Deng Y H, Wu Y X. Resistance to cold hardiness of flower parts of apricot varieties. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(2): 108-110. (in Chinese)
- [18] 赵荣艳, 付占芳, 李绍华, 李松涛, 蒋士君. INA 细菌与杏花期霜冻害研究进展. 果树学报, 2005, 22(3): 265-270.  
Zhao R Y, Fu Z F, Li S H, Li S T, Jiang S J. Advances in research on ice nucleation active bacteria and frost injury of apricot in blooming period. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(3): 265-270. (in Chinese)
- [19] Preston K, Andrews P K, Edward L, Proebting Jr E L. Ice nucleation and supercooling in freeze sensitive peach and sweet cherry tissues. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 1986, 111(2): 232-236.
- [20] Gu S L, Ding P H, Howard S. Effect of temperature and exposure time on cold hardiness of primary buds during the dormant season in 'Concord', 'Norton', 'Vignoles' and 'St. Vincent' grapevines. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2002, 77(5): 635-639.
- [21] Gu S L. Lethal temperature coefficient-a new parameter for interpretation of cold hardiness. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 1999, 74(1): 53-59.
- [22] 冯玉香, 何维勋. 梨花霜害程度与低温强度的关系. 园艺学报, 1998, 25(1): 23-26.  
Feng Y X, He W X. The relationship between frost injury to pear blossoms and low temperature. *Acta Horticulturae Sinica*, 1998, 25(1): 23-26. (in Chinese)
- [23] Pukachi P M, Mckersie B D. Supercooling in the crown of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Canadian Journal of Plant Science*, 1990, 70: 1179-1182.
- [24] 韩瑞东, 孙绪良, 许永玉, 张卫光. 赤松毛虫越冬幼虫生化物质变化与抗寒性的关系. 生态学报, 2005, 25(6): 1352-1356.  
Han R D, Sun X G, Xu Y Y, Zhang W G. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larva of *dend-rolimus spectabilis* Butler (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1352-1356. (in Chinese)
- [25] 何维勋, 冯玉香, 夏满强. 解冻速率对作物霜冻害的影响. 应用气象学报, 1993, 4(4): 440-445.  
He W X, Feng Y X, Xia M Q. Effect of thawing rate on frost injury of crop. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1993, 4(4): 440-445. (in Chinese)

(责任编辑 曲来娥)