

# 宁夏 2 个桃品种开花坐果期 霜冻指标试验研究

梁小娟<sup>1,2</sup>, 张晓煜<sup>1,2,3</sup>, 杨永娥<sup>1,2</sup>, 卫建国<sup>3</sup>,  
马梦瑶<sup>1,2</sup>, 马鹏<sup>4</sup>, 张静<sup>4</sup>, 郝思敏<sup>4</sup>

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏气象科学研究所, 宁夏 银川 750002; 4. 宁夏正果农业科技有限公司, 宁夏 中卫 751200)

**摘要:**为提高宁夏桃园布局合理性及霜冻监测预测、评估和防御能力,以‘华玉’和‘瑞光 39 号’桃品种为研究对象,采用野外霜冻试验箱模拟低温环境,于 2022 年 4—5 月开展霜冻原位试验,于盛花期、豆果期和幼果期各设置 4 个处理温度,分别持续 0.5 h,以自然状态下的花朵和幼果为对照,跟踪调查不同低温处理下 2 个桃品种各发育期的受冻率,并结合室内显微观测及过冷点,最终确定宁夏 2 个桃品种花(幼果)的霜冻等级指标。原位霜冻模拟试验结果表明,果树受冻害温度可能略高于其过冷点。桃不同发育期霜冻指标有显著差异,桃抗冻能力开花期>豆果期>幼果期。不同品种抗冻能力差异显著,开花期‘瑞光 39 号’与‘华玉’抗冻能力基本相当,但豆果期和幼果期其抗冻能力明显弱于‘华玉’。‘华玉’豆果在 $-1.10^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,在 $-2.68^{\circ}\text{C}$ 重度受冻,而‘瑞光 39 号’在 $-0.96^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,低于 $-2.16^{\circ}\text{C}$ 低温时重度受冻。‘华玉’幼果在 $-1.75\sim-0.48^{\circ}\text{C}$ 轻度受冻,低于 $-2.40^{\circ}\text{C}$ 则重度受冻;‘瑞光 39 号’幼果在温度达到 $-0.52^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,遇 $-1.41^{\circ}\text{C}$ 低温则遭受重度受冻。

**关键词:**桃;野外霜冻试验;霜冻指标;过冷能力;临界温度

**中图分类号:**S662.1;S425 **文献标志码:**A

## Study on frost indicators during blooming and fruiting periods of two peach varieties in Ningxia

LIANG Xiaojuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>1,2,3</sup>, YANG Yonge<sup>1,2</sup>, WEI Jianguo<sup>3</sup>,  
MA Mengyao<sup>1,2</sup>, MA Peng<sup>4</sup>, ZHANG Jing<sup>4</sup>, HAO Simin<sup>4</sup>

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Meteorological Disaster Monitoring, Early Warning and Risk Management in Dry Areas, China Meteorological Administration, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 3. Ningxia Institute of Meteorological Science, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 4. Ningxia Zhengguo Agricultural Technology Co. Ltd., Zhongning, Ningxia 751200, China)

**Abstract:** To improve the rational layout of peach orchards and the ability of frost monitoring, forecasting, evaluating and preventing in Ningxia, ‘Huayu’ and ‘Ruiguang 39’ peach varieties were used as research objects to conduct in-situ tests using field frost test chamber to simulate low-temperature environments in April to May 2022. The study set four treatment temperatures at each growth period, lasting 0.5 h. The flowers and fruits in natural state were used as CK. We investigated the freezing rate of blooming period, bean fruit period and young fruit period under different low-temperature treatments and combined with indoor microscopic observations and overcooling points to determine the frost indicators for flowers (young fruits) of two peaches in Ningxia. The results of the in-situ tests indicated that fruit trees were probably subjected to frost damage at temperatures slightly above their overcooling point. There were significant differences in frost indicators at different growth periods of peach, the resistance of peach at blooming period > bean fruit period > young fruit period. The resistance of different varieties differed sig-

nificantly, and the resistance of 'Ruiguang 39' and 'Huayu' were basically comparable during the blooming period, but its resistance was significantly weaker than that of 'Huayu' at bean fruit period and young fruit period. 'Huayu' bean fruits were lightly frozen at  $-1.10^{\circ}\text{C}$  and heavily frozen at  $-2.68^{\circ}\text{C}$ , while 'Ruiguang 39' was lightly frozen at  $-0.96^{\circ}\text{C}$  and heavily frozen below  $-2.16^{\circ}\text{C}$ . The young fruits of 'Huayu' were lightly frozen at  $-1.75\sim-0.48^{\circ}\text{C}$ , and heavily frozen below  $-2.40^{\circ}\text{C}$ . The young fruits of 'Ruiguang 39' were lightly frozen when the temperature reached  $-0.52^{\circ}\text{C}$ , and heavily frozen when they encountered the low temperature of  $-1.41^{\circ}\text{C}$ .

**Keywords:** peach; field frost test; frost indicators; subcooling capacity; critical temperature

桃树 (*Prunus persica* L.) 是蔷薇科 (Rosaceae) 李属 (*Amygdalus* L.) 落叶小乔木, 花期在 3—4 月, 5—6 月进入果实膨大期, 是我国北方主要果树品种之一。中国作为桃的原产国和种植面积最大的国家, 截止 2020 年, 我国毛桃和油桃种植面积约 86.7 万  $\text{hm}^2$ , 产量达到  $1.66\times 10^7$  t 左右, 成为仅次于苹果和梨的第三大落叶果树<sup>[1]</sup>。中国桃树分布主要划分为 7 个生态区, 宁夏属于西北高旱生态区, 光照充足、干燥少雨, 气候条件十分适宜桃树生长, 经过几十年发展, 桃产业已成为宁夏地区经济发展的重要支柱产业之一<sup>[2]</sup>。宁夏桃栽培面积 3 000  $\text{hm}^2$ , 年产鲜桃 4 000 万 kg, 主栽品种有大久保、京红、庆丰等<sup>[3]</sup>。桃树作为核果类树种, 春季开花早, 恰逢春季晚霜冻危害严重期, 花期受冻直接影响坐果率, 轻则减产, 重则绝收, 晚霜冻已成为宁夏桃产业发展的主要限制性因子, 严重制约桃产业的发展。

霜冻是在果树、蔬菜等作物生长季节内, 冷空气入侵使得气温骤降到  $2^{\circ}\text{C}$  或以下, 或地表辐射冷却导致土壤表面温度下降到  $0^{\circ}\text{C}$  以下, 造成作物受害甚至全株死亡的农业气象灾害<sup>[4]</sup>。其危害机理是当温度下降到  $0^{\circ}\text{C}$  以下时, 植物细胞间隙水分结成冰晶, 细胞内原生质与液泡脱水变性, 导致细胞失去生理活性。气温回升后细胞间隙中的冰融成水并蒸发散失, 原生质因失水使得植物器官功能受损<sup>[5]</sup>。霜冻是我国农业生产中面临的最主要低温灾害, 我国北方地区经济果树经常遭受霜冻灾害, 无论是小麦、玉米等大宗粮食作物, 还是杏、桃、苹果、酿酒葡萄等特色经济林果, 都会受到霜冻的威胁, 轻者减产, 重者则绝收。近年来, 在全球气候变暖背景下, 我国北方大部分地区的初霜冻提前, 终霜冻推后, 因而春季果树萌芽、开花期恰逢晚霜冻, 频率高, 且危害严重<sup>[6-7]</sup>。

目前, 关于桃霜冻的研究还比较鲜见。大部分学者开展关于霜冻指标的研究多基于酿酒葡萄<sup>[8]</sup>、苹果<sup>[9]</sup>和枸杞<sup>[10]</sup>等经济林果, 霜冻指标通过实验室离体试验和灾后田间调查相结合的方法<sup>[11-12]</sup>获得, 而对于桃的霜冻研究多为霜冻调查及防御方法研

究<sup>[13-15]</sup>, 桃霜冻指标研究鲜有报道, 通过大田试验开展霜冻指标试验的研究更少, 桃霜冻指标尚不够明确。传统离体试验破坏了植物的适应性和抗逆反馈机制, 研究得出的霜冻指标有一定偏差, 制约了霜冻监测、预测、评估结果的准确性和可靠性。相反, 自然生长条件下对果树抗冻性的研究结果不仅能反映果树实际抗冻能力的强弱, 而且因没有破坏植物体抗逆生理和适应机制, 所获得的霜冻指标更能反映植物自然状态下抗冻能力, 更接近客观现实, 在推广应用中具有现实价值。不同桃树品种抗冻能力各不相同, 且其不同发育期、不同部位受低温影响程度也有差异, 因此进行桃树不同发育期霜冻指标的研究十分必要。

本研究拟利用野外霜冻试验箱开展宁夏 2 个桃品种花期、果期霜冻指标试验, 总结不同低温条件下供试桃品种花期、果期受冻温度的临界值, 以期为宁夏桃园布局及霜冻监测、预测评估和防御提供参考, 提升霜冻监测预警和风险管理能力, 减轻损失, 助力中国北方桃产业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点及材料

于 2022 年 4 月 3 日至 5 月 15 日桃树花期和果期在宁夏中宁县渠口太阳梁乡宁夏正果农业发展有限公司桃基地开展试验。试验地段海拔 1 186.4 m, 年均气温  $9.5^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 202.1 mm, 年均日照时数 2 800 h, 无霜期 159~169 d。试验土壤类型为黄僵土。试验桃树品种分别为 '瑞光 39 号' (油桃) 和 '华玉' (毛桃), 总面积 4.2  $\text{hm}^2$ , 均采用常规化管理, 植株健壮, 无病虫害, 2018 年定植, 树形为细纺锤形, 株行距 1.0 m $\times$ 5.0 m, 东北-西南行向种植, 树龄 4 a, 树高 4.0~4.5 m。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验仪器 试验仪器采用宁夏气象科学研究所研发的野外霜冻试验箱 (ZL202021058582.6), 箱内装配制冷箱 1 个、循环风扇 8 个以及温度传感器 10 个, 其中 1 个放在霜箱中心的温度传感器记录

温湿度变化,箱外有 1 个温度传感器用于记录外界温度,其余 8 个传感器分别散布于箱内四角及其中点部位记录温度变化。该仪器综合单片机 STM32 的温度采集、监测显示和系统内外设备通讯机制等多项物联网通讯关键技术,建立了 $<0.6^{\circ}\text{C}$ 的移动霜冻试验箱自动控制系统,测量精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,使用单总线通讯协议;SHT21 测量精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ,使用 I2C 通讯协议。设备使用移动电源(蓄电池),可以通过 U 盘预设试验所需的低温曲线,箱外连接 1 个自动调节控制板用于霜箱内温度的监测及数据的收集,系统每秒钟采集数据 1 次,每分钟进行数据保存(图 1)。

**1.2.2 原位霜冻模拟试验设计和温度设置** 于桃盛花期、豆果期(横径 0.5 cm 左右)和幼果期(横径 2.0 cm 左右)分别选取粗细、大小一致且含有花朵、豆果和幼果的同一品种枝条放进野外霜冻试验箱,用细绳固定于箱内支架上,处理数量随机,花数量约为 80~100 朵,幼果数量约为 60~80 枚。首先在 1 h 内降温至  $4.0^{\circ}\text{C}$ ,再以  $2.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度降至目标温度,并保持 0.5 h,后以  $4.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$  升至  $4.0^{\circ}\text{C}$ ,此时半开箱体自然升温直至与外界温度一致,移开霜箱使枝条复位。以自然状态下生长的桃花和果作为对照(CK)。考虑到果树品种及各发育期耐低温能力的差异,低温模拟试验各处理温度如表 1 所示,每个处理 3 次重复。5~10 d 后统计受冻率,同时通过显微观察确定花朵、豆果及幼果受冻程度,并拍照留档。

**1.2.3 过冷却点和结冰点试验设计** 在基地内随机选择 2 个品种树龄、树势相同的树体各 36 株,在各品种盛花期、豆果期和幼果期从每株树体距离地面 1.2 m 高度主枝上剪取花枝和果枝,各取 5 枝水培带回实验室备用,其上花朵数量为 80~100 朵,豆果和幼果数量均为 60~80 枚。检测采用中国农业科学院研发的 SDX-20 型模拟霜箱系统,内设 40 只

TC-40 型热电偶温度传感器(监测试验材料温度变化)和 1 只可移动温度控制传感器(系统温度控制),将待测品种花枝或果枝剪口处用保鲜膜包裹放入试验箱中,传感器分别固定于每个品种花朵子房部位或果实,每个品种固定 20 个。利用 Frost-Chamber 数据采集系统通过通信电缆与箱体下部电源开关面板计算机数据接口连接,设置好降温程序(1 h 内降温至  $4.0^{\circ}\text{C}$ ,再以  $2.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度降至  $-10.0^{\circ}\text{C}$  后,以  $4.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$  升温至室温)后,以  $10 \text{ s} \cdot \text{次}^{-1}$  的频率收集数据并绘制温度变化曲线,精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。根据降温过程绘制温度变化曲线以确定过冷却点和结冰点(图 2)。当温度下降至某一临界值时,植物组织由液态转变为固态会放热,温度骤然升高,降温曲线出现峰值跳跃现象,峰值起点温度便为过冷却点( $T_1$ ),当细胞中的水分完全变为冰晶核时,温度不再上升,吸热与放热达到平衡,峰值顶点温度即为结冰点( $T_2$ )<sup>[16]</sup>。过冷却点和结冰点之间的温度范围为霜冻温度阈值。

表 1 宁夏桃各发育期霜冻模拟试验处理表

Table 1 Table of low temperature simulation treatments for each development stage of Ningxia peach

品种 Variety	发育期 Development stage	温度梯度 Temperature gradient / $^{\circ}\text{C}$				持续时间 Duration/h
华玉 Huayu	盛花期 Blooming period	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	0.5
	豆果期 Bean fruit period	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	
	幼果期 Young fruit period	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	
瑞光 39 号 Ruiguang 39	盛花期 Blooming period	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	0.5
	豆果期 Bean fruit period	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	
	幼果期 Young fruit period	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	

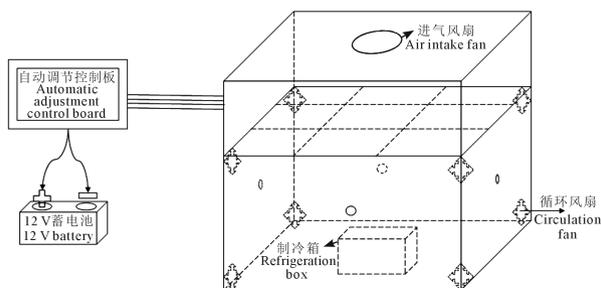
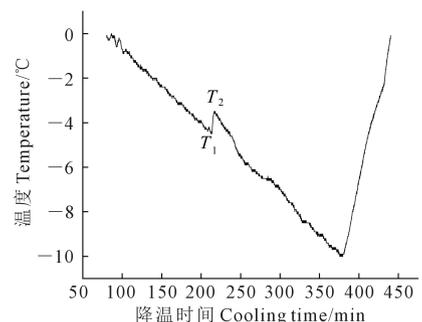


图 1 野外霜冻试验箱结构图

Fig.1 Structure of field frost test chamber



注:  $T_1$  表示过冷却点温度;  $T_2$  表示结冰点温度。

Note:  $T_1$  indicates the overcooling point temperature;  $T_2$  indicates the freezing point temperature.

图 2 过冷却试验降温过程曲线

Fig.2 Cooling process curve of overcooling test

1.2.4 受冻判断观测试验设计 通常 1 朵花除花瓣外都具有 1 枚雌蕊和多枚雄蕊,花瓣保护雌蕊和雄蕊,受冻后不影响正常结果,而雌蕊(柱头、花柱和子房)是花器官最敏感的部位,抗冻能力低于花瓣和雄蕊,一旦受冻整个花将失去结果的能力<sup>[17]</sup>,而桃盛花期的子房抗冻能力最差,极易受冻<sup>[11]</sup>。同时根据果农多年种植经验得出,花朵子房受冻对桃树生长及产量影响显著。因此,本研究以子房是否受冻作为判断桃花朵是否受冻的标准。豆果和幼果即通过胚受冻作为判断标准。受冻判断运用上海光学仪器六厂生产的光学共聚显微镜(BM-3200A)观测桃花子房、果肉和胚珠等部位,分别统计其受冻(死亡)率。考虑到桃花期和果期受冻在一定程度上有助于疏花疏果,故将受冻程度划分为:轻度受冻(20%~50%),中度受冻(50%~80%)和重度受冻( $\geq 80\%$ )3 个级别,各级别桃受冻症状表现如图(3~5)所示,各发育期所观察解剖结构图

均为纵切,放大倍数为 10×40 倍。

$$\alpha = n/N \times 100$$

式中, $\alpha$  为受冻率(%), $n$  为受冻花朵(果)数, $N$  为调查花朵(果)总数。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 对数据进行整理,用 SPSS 26.0 软件进行数据分析,方差分析为单因素方差分析(One way-ANOVA);利用 DPS 软件建立受冻率与低温的关系模型;图形绘制用 Origin 2019。

## 2 结果与分析

### 2.1 宁夏 2 个桃品种不同发育期的原位霜冻模拟试验结果

桃不同植株或同一植株不同枝条的花蕾和花朵生长阶段存在交叠现象,盛花期低温处理时,处理量和受冻率均只计算完全盛开的花朵。由表 2 可以看出,在不同低温处理下,桃盛花期花朵抗寒性随

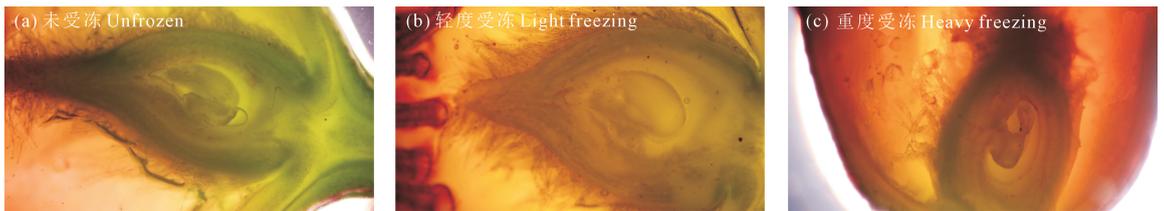


图 3 宁夏桃盛花期子房未受冻、轻度和重度受冻症状

Fig.3 Ovary of Ningxia peach in blooming period with unfrozen, light and heavy freezing symptoms

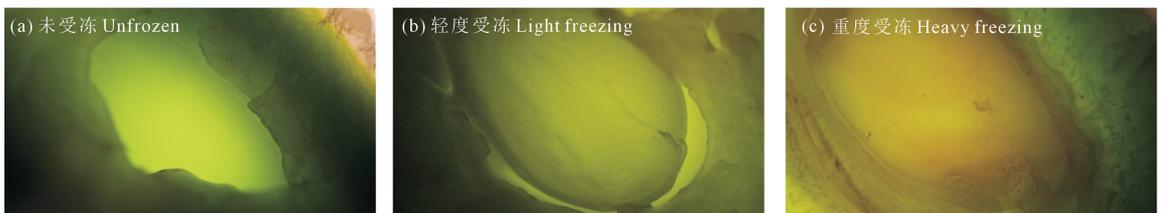


图 4 宁夏桃豆果期种子及部分果肉未受冻、轻度和重度受冻症状

Fig.4 Seed and part of flesh of Ningxia peach in bean fruit period with unfrozen, light and heavy freezing symptoms

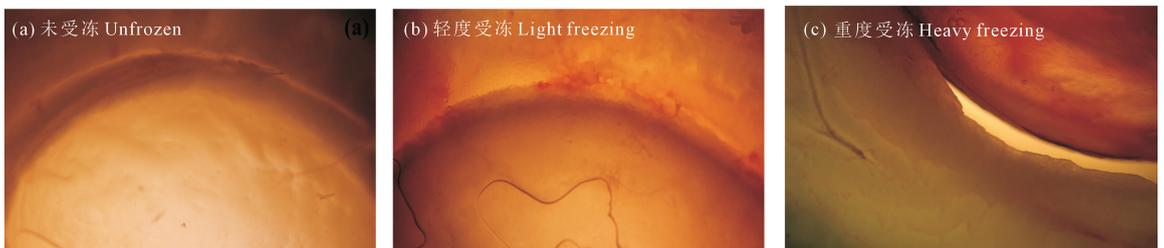


图 5 宁夏桃幼果期种子及部分果肉未受冻、轻度和重度受冻症状

Fig.5 Seed and part of flesh of Ningxia peach in young fruit period with unfrozen, light and heavy freezing symptoms

表2 宁夏2个桃品种不同发育期受冻率和受冻表现

Table 2 Freezing rate and freezing performance of two Ningxia peach varieties at different development stages

发育期 Development stage	品种 Variety	处理温度 Treatment temperature/℃	持续时间 Duration /h	受冻率 Freezing rate/%	受冻表现 Frozen performance	
盛花期 Blooming period	华玉 Huayu	-2.5	0.5	0.0	花瓣萎蔫且轻微水渍;花梗绿色;雄蕊、雌蕊均正常 Petal withered and slightly water-stained; the pedicels were green; the stamens and pistils were normal	
		-3.0	0.5	42.4	花梗黑绿色且轻微变软;1~2个雄蕊轻微褐变且变形皱缩;子房正常,仍可继续生长,不影响坐果 Pedicels were blackish green and slightly softened; 1~2 stamens slightly browned and deformed and wrinkled; the ovaries were normal, still growing, not affected fruit set	
		-3.5	0.5	88.8	花梗变黑变皱,有的触碰即脱落;雄蕊几乎完全褐变;子房变成黑色或者深褐色且水渍 Pedicels darkened and wrinkled, some fell off when touched; the stamens were almost completely browned; the ovaries turned black or dark brown and water-stained	
		-4.0	0.5	100.0		
	瑞光39号 Ruiguang 39	-2.0	0.5	28.8	75%正常,子房完好,花瓣轻微褐变 75% were normal, the ovaries were intact, the petals slightly browned	
		-2.5	0.5	42.7	花梗绿色;部分雄蕊轻微褐变且变形;子房正常 Pedicels were green; some stamens slightly browned and deformed; the ovaries were normal	
		-3.0	0.5	52.5	花梗黑绿色且变软;一半以上雄蕊褐变且皱缩;花瓣下部褐变;子房轻微褐变、黄变 Pedicels were blackish green and softened; more than half of the stamens browned and crinkled; the petals browned proximally; the ovaries slightly browned and yellowed	
		-3.5	0.5	85.6	花梗变黑,明显变软变皱,触碰即脱落;雄蕊完全褐变;子房变成深褐色且水渍 Pedicels darkened, visibly softened and wrinkled, fell off when touched; the stamens completely browned; the ovaries turned dark brown and water-stained	
		华玉 Huayu	-1.0	0.5	13.2	90%正常,胚完好 90% were normal, the embryos intact
			-1.5	0.5	36.6	胚无明显变化;果面轻微冻痕,变皱;果肉颜色略加深 Embryos had not obvious changes; the fruit surface slightly frost marks and wrinkled; the flesh color slightly deepened
-2.0	0.5		50.5	胚轻微褐变;果肉深绿色,小部分褐变 Embryos slightly browned; the flesh was dark green, slightly browned		
-2.5	0.5		61.7			
豆果期 Bean fruit period	瑞光39号 Ruiguang 39	-0.5	0.5	23.9	80%正常,果实表面无明显变化,果肉颜色略加深 80% were normal, the fruit surface had not obvious changes, the flesh color slightly darker	
		-1.0	0.5	44.8	胚无明显变化;果面轻微冻痕、黑点;果肉颜色深绿色 Embryos without obvious changes; the fruit surface with slight freeze marks and black spots; the flesh color was dark green	
		-1.5	0.5	78.6	胚轻微褐变;果肉深绿色,2/3褐变;果实变软 Embryos slightly browned; the flesh was dark green, 2/3 browned; the fruit softened	
		-2.0	0.5	85.1	胚变黑或者深褐色且水渍;果肉水渍;果梗变黄变干,触碰即落 Embryos were dark or dark brown and water-stained; the flesh water-stained; the fruit stalks were yellow and dry, fell off when touched	
幼果期 Young fruit period	华玉 Huayu	-1.0	0.5	30.8	胚无明显变化;果肉颜色略加深;果实部分变软 Embryos had not obvious changes; the flesh color slightly deepened; some fruits softened	
		-1.5	0.5	47.9		
		-2.0	0.5	49.5		
		-2.5	0.5	71.4	胚轻微褐变;果肉深绿色 Embryos slightly browned; the flesh was dark green	
	瑞光39号 Ruiguang 39	-0.5	0.5	18.9	85%正常,部分果肉颜色加深 85% were normal, some flesh color darkened	
		-1.0	0.5	51.6	胚轻微褐变;果肉深绿色 Embryos slightly browned; the flesh dark green	
		-1.5	0.5	84.6	胚深褐色且水渍;果实变软,果肉水渍;果梗触碰即落;果面微皱 Embryos were dark brown and water-stained; the fruit softened; the flesh water-stained; the fruit stalks fell off when touched; the fruit surface slightly wrinkled	
-2.0	0.5	100.0				

温度降低逐渐减弱。‘华玉’能忍受 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 低温,未出现明显受冻现象; $-3.0^{\circ}\text{C}$ 处理后受冻率大于30%,花梗黑绿色且轻微变软,子房正常,不影响坐果;在 $-3.5^{\circ}\text{C}$ 时受冻率达88.8%,在 $-4.0^{\circ}\text{C}$ 下持续0.5 h,花朵全部冻死。而‘瑞光39号’在 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 处理时,部分雄蕊轻微褐变且变形; $-3.0^{\circ}\text{C}$ 下受冻率达52.5%,花梗黑绿色且变软,一半以上雄蕊褐变且皱缩,子房轻微褐变、黄变; $-3.5^{\circ}\text{C}$ 处理0.5 h后,‘瑞光39号’花朵触碰即脱落,子房变成深褐色且水渍。对比‘华玉’和‘瑞光39号’盛花期低温处理受冻率,结果发现盛花期‘华玉’抗冻性强于‘瑞光39号’。

豆果期通过设置降温曲线 $-0.5\sim-2.5^{\circ}\text{C}$ ,每个温度持续0.5 h,5~10 d后观察所有处理豆果受冻率。当温度高于 $-1.0^{\circ}\text{C}$ 时,‘华玉’豆果基本未受冻,而‘瑞光39号’处理果量中44.8%果面轻微冻痕、黑点; $-1.5^{\circ}\text{C}$ 时,‘瑞光39号’豆果胚轻微褐变,果实变软;当温度下降至 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 时,‘瑞光39号’受冻率高达85.1%,显著高于同低温下‘华玉’的受冻率(50.5%);在 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 低温处理下持续0.5 h后,‘华玉’受冻率达61.7%,果实胚轻微褐变,果肉小部分褐变。分析得到‘华玉’豆果对低温的抵抗能力强于‘瑞光39号’。

在 $-1.0\sim-2.0^{\circ}\text{C}$ 处理时,‘华玉’幼果受冻率在30%~50%之间,且3个低温梯度下受冻率差异不显著;温度下降至 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 时,幼果受冻率达到71.4%。‘瑞光39号’在 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 下处理0.5 h,幼果受冻率低于30%;在 $-1.0^{\circ}\text{C}$ 时,受冻率达51.6%,果实胚轻微褐变,果肉深绿色;低于 $-1.5^{\circ}\text{C}$ 低温时,‘瑞光39号’幼果胚变成深褐色且水渍,果实易脱落,且在 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 时全部冻死。对比之下,2个桃品种幼果的抗冻性强弱为:‘华玉’>‘瑞光39号’。

综上所述,桃品种‘华玉’抗冻性强于‘瑞光39号’,且同一品种抗冻性为:盛花期>豆果期>幼果期,同一发育期内随着温度的降低,花和果实的受冻率增加。

## 2.2 宁夏2个桃品种花期、果期的过冷却点、结冰点以及过冷能力

2个桃品种不同发育期过冷却点、结冰点以及过冷能力方差分析结果如表3所示。由表3可知,‘华玉’3个发育期的过冷却点分别为 $-5.02$ 、 $-4.45$ 、 $-4.10^{\circ}\text{C}$ ,结冰点为 $-3.02$ 、 $-2.89$ 、 $-2.73^{\circ}\text{C}$ ;‘瑞光39号’盛花期过冷却点最低,为 $-4.68^{\circ}\text{C}$ ,豆果期次之( $-4.10^{\circ}\text{C}$ ),幼果期最高,为 $-3.77^{\circ}\text{C}$ ,结冰点分别为 $-3.02$ 、 $-2.70$ 、 $-2.60^{\circ}\text{C}$ 。由于不同发育阶段组织器官结构的差异,随着发育进程的推进,‘华玉’和‘瑞

光39号’过冷却点和结冰点呈上升趋势,表明其抗冻能力与发育进程呈负相关关系。对比2个品种不同发育期过冷却点、结冰点以及过冷能力发现,‘华玉’和‘瑞光39号’盛花期和豆果期过冷却点差异显著,‘华玉’盛花期过冷却点显著低于‘瑞光39号’,为 $-5.02^{\circ}\text{C}$ ,豆果期‘瑞光39号’过冷却点显著高于‘华玉’,为 $-4.10^{\circ}\text{C}$ ,幼果期‘华玉’和‘瑞光39号’过冷却点未达到95%显著性水平。‘瑞光39号’豆果期结冰点显著高于‘华玉’( $P<0.05$ ),盛花期和幼果期无显著性差异。幼果期过冷能力2个桃品种间无显著性差异,盛花期和豆果期‘华玉’过冷能力显著强于‘瑞光39号’。将同一桃品种不同发育期过冷却点、结冰点以及过冷能力进行比较分析(表3),结果表明‘华玉’3个发育期间过冷却点温度有显著性差异,而‘瑞光39号’盛花期过冷却点显著低于豆果期和幼果期,且其豆果期和幼果期间不表现显著性差异。‘华玉’盛花期的结冰点显著低于幼果期,而与豆果期无显著性差异;‘瑞光39号’盛花期结冰点显著低于豆果期和幼果期,而豆果期和幼果期不存在显著性差异。通常将过冷却点和结冰点的差值作为果树的过冷能力,差值越大,表明过冷能力越强。‘华玉’和‘瑞光39号’均表现为盛花期的过冷能力显著强于其余2个发育期,豆果期和幼果期间不存在显著性差异。

根据过冷却点、结冰点和过冷能力综合分析,2个桃品种抗冻能力为:‘华玉’>‘瑞光39号’,不同发育期抗冻能力为盛花期最强,豆果期次之,幼果期最弱。与受冻率结果一致。

## 2.3 宁夏2个桃品种盛花期-幼果期受冻率与低温的关系模型

选用桃各发育期受冻率建立与低温的关系模型,结果列入表4。由表4可知,‘华玉’和‘瑞光39号’各发育期霜冻预测模型 $R^2$ 均在0.90以上,拟合结果可靠,精度相对较高。霜冻等级按照器官受冻率分类,将桃花期和幼果期霜冻等级达到轻度、中度、重度分别定为器官受冻20%、50%和80%,求解表4所列方程,就可以得到不同霜冻等级的温度指标,结果列入表5。盛花期‘华玉’和‘瑞光39号’重度受冻临界温度分别在 $-3.31^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.43^{\circ}\text{C}$ ;‘华玉’豆果在 $-2.68^{\circ}\text{C}$ 时重度受冻,‘瑞光39号’在 $-2.16^{\circ}\text{C}$ 时重度受冻;幼果期‘华玉’重度受冻时温度为 $-2.40^{\circ}\text{C}$ ,而‘瑞光39号’为 $-1.41^{\circ}\text{C}$ 。随着发育进程的推进,2个桃品种对低温的敏感性增强,受冻临界温度逐渐升高,‘华玉’一直保持对低温的强忍耐力(表5)。

表 3 宁夏 2 个桃品种各发育期过冷却点、结冰点及过冷能力方差分析 ( $X \pm SE$ )

Table 3 Variance analysis of overcooling point, freezing point and subcooling capacity of two Ningxia peach varieties at different development stages ( $X \pm SE$ )

品种 Variety	发育期 Development stage	过冷却点 Overcooling point	结冰点 Freezing point	过冷能力 Subcooling capacity
华玉 Huayu	盛花期 Blooming period	-5.02±0.02cC	-3.02±0.07cB	2.00±0.07aA
	豆果期 Bean fruit period	-4.45±0.05cB	-2.89±0.06cAB	1.56±0.06bB
	幼果期 Young fruit period	-4.10±0.00cA	-2.73±0.05bA	1.38±0.05aB
瑞光 39 号 Ruiguang 39	盛花期 Blooming period	-4.68±0.10dB	-3.02±0.06cB	1.67±0.11bA
	豆果期 Bean fruit period	-4.10±0.05fA	-2.70±0.05dA	1.40±0.06aAB
	幼果期 Young fruit period	-3.77±0.07cA	-2.60±0.15bA	1.17±0.20aB

注:表中同列数据后不同小写字母表示不同品种各发育期同一指标在  $P < 0.05$  水平上差异显著,同列数据后不同大写字母表示同一品种不同发育期各指标在  $P < 0.05$  水平上差异显著。 $SE$  表示标准误差。

Note: Different lowercase letters after the data in the same column in the table indicate that the indicators of different varieties at different development stage are significantly different at  $P < 0.05$  level, and different capital letters indicate that the indicators at different development stage of the same variety are significantly different at  $P < 0.05$  level.  $SE$  indicates standard error.

表 4 宁夏 2 个桃品种各发育期受冻率( $x$ )与低温( $y$ )的关系模型

Table 4 Simulation model between freezing rate ( $x$ ) and low temperature ( $y$ ) of two Ningxia peach at different development stages

发育期 Development stage	关系模型 Simulation model			
	华玉 Huayu	$R^2$	瑞光 39 号 Ruiguang 39	$R^2$
盛花期 Blooming period	$y = 97.2922 / (1 + e^{17.9658 + 5.8875x})$	0.9959	$y = 515.9429 / (1 + e^{4.2554 + 0.7462x})$	0.9928
豆果期 Bean fruit period	$y = 131.4599 / (1 + e^{3.2127 + 1.3634x})$	0.9199	$y = 92.9826 / (1 + e^{3.7943 + 2.5927x})$	0.9832
幼果期 Young fruit period	$y = 489011.6251 / (1 + e^{10.4546 + 0.7237x})$	0.9297	$y = 105.5717 / (1 + e^{-2.9732 + 2.9205x})$	1.0000

表 5 宁夏 2 个桃品种各发育期轻、中、重度受冻临界温度/ $^{\circ}C$   
Table 5 Critical temperatures for light, moderate and heavy freezing of two Ningxia peach varieties at different development stages

发育期 Development stage	霜冻等级 Frost level	华玉 Huayu	瑞光 39 号 Ruiguang 39
盛花期 Blooming period	轻度 Light	-2.82	-1.40
	中度 Moderate	-3.06	-2.71
	重度 Heavy	-3.31	-3.43
豆果期 Bean fruit period	轻度 Light	-1.10	-0.96
	中度 Moderate	-2.00	-1.52
	重度 Heavy	-2.68	-2.16
幼果期 Young fruit period	轻度 Light	-0.48	-0.52
	中度 Moderate	-1.75	-0.98
	重度 Heavy	-2.40	-1.41

和‘瑞光 39 号’盛花期遭受重度霜冻的温度阈值差异不大,分别为-3.31 $^{\circ}C$ 和-3.43 $^{\circ}C$ ,表明二者盛花期对低温的耐受能力差异不大。‘华玉’豆果期的耐

## 2.4 宁夏 2 个桃品种不同发育期重度受冻临界温度与过冷却点的差异

过冷却点是昆虫体液开始结冰时的温度,是其忍受的低温下限。相关研究表明过冷却点可以借鉴为判定果树抗冻性的指标之一<sup>[18]</sup>,而结冰点不能衡量抗冻性。因此,本文选择桃不同发育期重度受冻临界温度与过冷却点进行对比分析。根据表 3 和表 5 的数据进行分析可得,‘华玉’3 个发育期过冷却点与重度受冻临界温度在  $P < 0.05$  水平上显著相关,‘瑞光 39 号’各发育期过冷却点与重度受冻临界温度极显著相关( $P < 0.01$ ),且‘华玉’和‘瑞光 39 号’各发育期间重度受冻临界温度差异显著。‘华玉’和‘瑞光 39 号’盛花期花朵分别在-3.31 $^{\circ}C$ 和-3.43 $^{\circ}C$ 时遭受重度伤害,而此时的过冷却点却低于-4.0 $^{\circ}C$ ,说明温度未达到过冷却点也会对桃花朵造成严重伤害;2 个桃品种‘华玉’和‘瑞光 39 号’豆果期和幼果重度受冻临界低温分别在-2.68 $^{\circ}C$ 和-2.16 $^{\circ}C$ , -2.40 $^{\circ}C$ 和-1.41 $^{\circ}C$ ,临界温度较过冷却点温度偏高。以上分析说明过冷却点作为果树抗寒性的判定指标时不够准确,果树受害温度可能高于过冷却点。

## 2.5 宁夏 2 个桃品种盛花期、豆果期和幼果期霜冻程度的划分

宁夏 2 个桃品种盛花期、豆果期和幼果期霜冻指标如表 6 所示。由表 6 可知,2 个桃品种‘华玉’

冻性强于‘瑞光 39 号’,‘华玉’低于-1.10 $^{\circ}C$ 时轻度受冻,而‘瑞光 39 号’低于-0.96 $^{\circ}C$ 就表现轻度受冻,在低于-2.16 $^{\circ}C$ 低温时‘瑞光 39 号’重度受冻,‘华玉’重度受冻在-2.68 $^{\circ}C$ 。‘华玉’幼果在-1.75~-0.48 $^{\circ}C$ 为轻度受冻状态,低于-2.40 $^{\circ}C$ 呈重度受冻;‘瑞光 39 号’幼果抗冻性较‘华玉’差,温度低于-0.52 $^{\circ}C$ 时即轻度受冻,-1.41 $^{\circ}C$ 低温即遭受重度霜冻。经检验,以上基于统计分析得到的桃不同发育期霜冻指标结果与当地近 5 年发生霜冻灾害实况基本吻合,能够反映客观受冻状况,可见该指标是基本可靠的,这些指标对桃不同发育期霜冻害监测预警及风险评估具有重要的参考价值,可以用于果园霜冻监测、预测和风险管理实践。

表 6 宁夏 2 个桃品种各发育期霜冻指标

Table 6 Frost indicators of two peach varieties in Ningxia at different development stages

品种 Variety	发育期 Development stage	轻度 Light	中度 Moderate	重度 Heavy
华玉 Huayu	盛花期 Blooming period	$-3.06^{\circ}\text{C} < t \leq -2.82^{\circ}\text{C}$	$-3.31^{\circ}\text{C} < t \leq -3.06^{\circ}\text{C}$	$t \leq -3.31^{\circ}\text{C}$
	豆果期 Bean fruit period	$-2.00^{\circ}\text{C} < t \leq -1.10^{\circ}\text{C}$	$-2.68^{\circ}\text{C} < t \leq -2.00^{\circ}\text{C}$	$t \leq -2.68^{\circ}\text{C}$
	幼果期 Young fruit period	$-1.75^{\circ}\text{C} < t \leq -0.48^{\circ}\text{C}$	$-2.40^{\circ}\text{C} < t \leq -1.75^{\circ}\text{C}$	$t \leq -2.40^{\circ}\text{C}$
	盛花期 Blooming period	$-2.71^{\circ}\text{C} < t \leq -1.40^{\circ}\text{C}$	$-3.43^{\circ}\text{C} < t \leq -2.71^{\circ}\text{C}$	$t \leq -3.43^{\circ}\text{C}$
	豆果期 Bean fruit period	$-1.52^{\circ}\text{C} < t \leq -0.96^{\circ}\text{C}$	$-2.16^{\circ}\text{C} < t \leq -1.52^{\circ}\text{C}$	$t \leq -2.16^{\circ}\text{C}$
瑞光 39 号 Ruiguang 39	幼果期 Young fruit period	$-0.98^{\circ}\text{C} < t \leq -0.52^{\circ}\text{C}$	$-1.41^{\circ}\text{C} < t \leq -0.98^{\circ}\text{C}$	$t \leq -1.41^{\circ}\text{C}$

注:  $t$  指温度。 Note:  $t$  refers to temperature.

### 3 讨 论

本研究开展大田原位试验,有效地降低了离体材料在大田与试验室之间转移时造成的试验误差,且在低温处理结束后可以在田间继续跟踪调查受害植株。为了避免后续调查时遭受二次霜冻对调查结果产生的影响,本文又利用室内人工霜箱研究桃不同发育期组织器官的过冷却点和结冰点,结合田间受害调查,从两方面分析研究桃不同发育期的抗霜冻情况,得出桃各发育期的抗霜冻能力由强到弱为盛花期、豆果期、幼果期。

试验结果表明,‘华玉’和‘瑞光 39 号’盛花期花器官过冷却点分别为 $-5.02^{\circ}\text{C}$ 和 $-4.68^{\circ}\text{C}$ ,幼果过冷却点为 $-4.10^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.77^{\circ}\text{C}$ ,该结论与王晨冰等<sup>[19]</sup>研究桃花子房和幼果过冷却点结论一致。对比桃不同发育期器官过冷却点和结冰点温度变化过程发现,桃幼果的过冷却点和结冰点均高于盛花期,即幼果的抗寒能力较花朵弱,这与王飞等<sup>[20]</sup>的研究结论一致,说明植物对低温的抵抗能力与其自身的发育进程息息相关。此外,‘华玉’和‘瑞光 39 号’盛花期、豆果期和幼果期遭受重度霜冻时的温度均较过冷却点温度偏高,说明温度未达到过冷却点也会对桃的组织器官造成严重伤害,而此时植物组织并未完全死亡,当温度持续低于该临界温度时,植物将受到不可逆伤害甚至死亡,该结论与王静<sup>[21]</sup>、张超<sup>[22]</sup>等研究梨树霜冻指标和玉兰花瓣抗寒性的发现一致。李晓龙等<sup>[18]</sup>认为过冷却点可以作为果树抗寒性鉴定指标之一,而本研究发现果树过冷却点较田间实际受冻温度偏低,猜测可能与大田中冰核活性细菌的浓度和人工霜冻试验箱中的差异、田间自然条件多变、离体枝条二次遭受逆境胁迫时已启动抗逆机制等因素有关。对比桃 3 个发育期抗冻能力,随着发育进程的推移,其抗冻力逐渐减弱,桃

花期抗冻性强于幼果期,可能是随着组织器官分化消耗,组织内糖、蛋白等抗寒性物质含量降低所致。

霜冻指标受到多种因素的影响,不同低温、不同低温持续时间、空气湿度、小气候等都会影响植物的抗冻能力,利用单一因素研究植物抗冻性是不全面的。相关研究表明<sup>[23-24]</sup>,桃花蕾耐低温程度为 $-3.9^{\circ}\text{C}$ 左右,花朵和幼果的受冻温度分别为 $-2.0 \sim -1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-1.1^{\circ}\text{C}$ 。本试验研究结论与之不尽相同,可能是自然环境条件、局部小气候和品种差异所致。霜冻发生时低温持续时间一般在 $0.5 \sim 6.0 \text{ h}$ 左右,本试验仅研究了不同低温相同持续时间且持续时间较短( $0.5 \text{ h}$ )的情况下桃花和幼果的耐霜冻能力,在此基础上生产者可根据田间实际低温情况判断是否需要防霜,而在后续研究中我们还应充分考虑其他影响因素,如同一低温不同持续时间、极端低温等,同时结合更多相关生理生化指标综合研究,不断完善桃霜冻指标,以期更好地指导生产。

### 4 结 论

利用野外霜冻试验箱设置不同低温对宁夏 2 个桃品种开花坐果期的霜冻指标开展研究,根据原位霜冻模拟试验结果发现,果树受冻害温度略高于其过冷却点。研究表明:当桃花期遇低于 $-3.50^{\circ}\text{C}$ 低温时,花朵受到不可逆伤害。 $-2.82^{\circ}\text{C}$ 以上低温对‘华玉’花朵未造成严重损伤,温度达到 $-3.31^{\circ}\text{C}$ 时表现为重度受冻,而‘瑞光 39 号’在 $-1.40^{\circ}\text{C}$ 时开始遭受霜冻胁迫。‘华玉’豆果在 $-1.10^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,重度受冻在 $-2.68^{\circ}\text{C}$ ,而‘瑞光 39 号’在 $-0.96^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,在低于 $-2.16^{\circ}\text{C}$ 低温时重度受冻。‘华玉’幼果在 $-1.75 \sim -0.48^{\circ}\text{C}$ 保持轻度受冻状态,低于 $-2.40^{\circ}\text{C}$ 呈重度受冻;‘瑞光 39 号’幼果温度达到 $-0.52^{\circ}\text{C}$ 时轻度受冻,遇到 $-1.41^{\circ}\text{C}$ 低温就会遭受重度霜冻。桃不同发育期霜冻指标间存在显著差异,桃抗冻能力盛花期>豆果期>幼果期。2 个品种抗冻能力差异显著,盛花期‘瑞光 39 号’与‘华玉’抗冻能力基本相当,但豆果期和幼果期其抗冻能力明显弱于‘华玉’。

#### 参 考 文 献:

- [1] 梅道源,王晨,王忠红,等. 我国桃育种研究进展[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(2): 55-57, 64.  
MEI D Y, WANG C, WANG Z H, et al. Research progress in peach tree breeding in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28 (2): 55-57, 64.
- [2] 刘兆宇,张晓煜,南学军,等. 桃树花朵对低温胁迫的生理响应[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 402-407.  
LIU Z Y, ZHANG X Y, NAN X J, et al. Physiological response of peach blossom to low temperature stress [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(3): 402-407.

- [3] 汪泽鹏, 崔萍. 宁夏果树栽培区域和果品生产[J]. 中国果树, 2008, (4): 58-59.  
WANG Z P, CUI P. Fruit tree cultivation area and fruit production in Ningxia[J]. China Fruits, 2008, (4): 58-59.
- [4] 王培娟, 唐俊贤, 金志凤, 等. 中国茶树春霜冻害研究进展[J]. 应用气象学报, 2021, 32(2): 129-145.  
WANG P J, TANG J X, JIN Z F, et al. Review on spring frost disaster for tea plant in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2021, 32(2): 129-145.
- [5] 李曼. 霜与霜冻的成因及对作物的影响[J]. 现代农业科技, 2015, (4): 249.  
LI M. Causes and effects of frost and frost on crops[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, (4): 249.
- [6] 曹宁, 张磊, 张晓煜, 等. 近55a宁夏酿酒葡萄晚霜冻基本特征及变化趋势[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 186-192.  
CAO N, ZHANG L, ZHANG X Y, et al. Analysis on basic characteristics and variation trend of wine grape late frost in Ningxia during recent 55 years[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2017, 38(2): 186-192.
- [7] 姚晓红, 许彦平, 万信, 等. 天水蜜桃开花期不同措施防霜效果试验初报[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 299-304.  
YAO X H, XU Y P, WAN X, et al. Effect of different frost protection experiments during peach flowering period in Tianshui [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(3): 299-304.
- [8] 李华, 王华, 游杰, 等. 近45年霜冻指标变化对我国酿酒葡萄产区的影响[J]. 科技导报, 2007, 25(15): 16-22.  
LI H, WANG H, YOU J, et al. Relationship between frost indexes and viticulture zoning in China in recent 45 years[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(15): 16-22.
- [9] 李红英, 段晓凤, 王静, 等. 宁夏苹果花期霜冻敏感性指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 184-188.  
LI H Y, DUAN X F, WANG J, et al. Research on frost sensitive indexes in apple blossom in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 184-188.
- [10] 朱永宁, 张磊, 马国飞, 等. 基于危害积温的枸杞花期霜冻指标试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 188-193.  
ZHU Y N, ZHANG L, MA G F, et al. Frost index of *Lycium barbarum* during flowering period based on harmful accumulated temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 188-193.
- [11] 许彦平, 万信, 贾建英, 等. 北京7号桃树(*Prunus armeniaca*)盛花期霜冻害指标试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 195-200.  
XU Y P, WAN X, JIA J Y, et al. Experimental study on frost index of Beijing No.7 peach trees in full blooms[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(11): 195-200.
- [12] 陈惠, 王加义, 潘卫华, 等. 南亚热带主要果树冻(寒)害低温指标的确定[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 148-155.  
CHEN H, WANG J Y, PAN W H, et al. Determination of frozen (cold) injury indicators of main fruit trees in South subtropical area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1): 148-155.
- [13] 杨英. 新绛县霜冻对油桃开花至坐果期生长的影响及防御[J]. 时代农机, 2018, 45(2): 190.  
YANG Y. Effects of frost on the growth of nectarine from flowering to young fruit in Xinjiang County and its defense[J]. Times Agricultural Machinery, 2018, 45(2): 190.
- [14] 黄丽萍, 杨萍, 赵武娟, 等. 晚霜对桃幼果及新梢的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(6): 748-750.  
HUANG L P, YANG P, ZHAO W J, et al. Effect of late frost on peach new shoots and young fruit[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(6): 748-750.
- [15] 刘志虎, 王鸿, 冯建森, 等. 河西走廊桃抗寒性调查分析[J]. 中国果树, 2020, (6): 102-106.  
LIU Z H, WANG H, FENG J S, et al. Investigation and analysis on cold resistance of peach in the Hexi Corridor[J]. China Fruits, 2020, (6): 102-106.
- [16] 段晓凤, 张磊, 李红英, 等. 贺兰山东麓酿酒葡萄新梢萌芽期室内霜冻模拟试验[J]. 经济林研究, 2017, 35(4): 171-176.  
DUAN X F, ZHANG L, LI H Y, et al. Laboratory frost simulation experiment of wine grape at germination period of young sprouts at eastern foot of Helan Mountain[J]. Non-Wood Forest Research, 2017, 35(4): 171-176.
- [17] 王静, 张晓煜, 杨洋, 等. 宁夏杏、李子花期幼果期霜冻指标试验研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 93-98.  
WANG J, ZHANG X Y, YANG Y, et al. Experimental study on frost index of apricot and plum in Ningxia Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 93-98.
- [18] 李晓龙, 褚燕南, 张磊, 等. 苹果花期抗寒能力判定指标解析[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1935-1944.  
LI X L, CHU Y N, ZHANG L, et al. Analysis of evaluation indexes of cold resistance of apple trees at flowering stage[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1935-1944.
- [19] 王晨冰, 王发林, 万信, 等. 低温胁迫下桃子房和幼果的过冷却点及生理响应[J]. 甘肃农业科技, 2020, (9): 18-22.  
WANG C B, WANG F L, WAN X, et al. Supercooling point of peach ovary and young fruit under low temperature stress and its physiological response[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2020, (9): 18-22.
- [20] 王飞, 陈登文, 李嘉瑞, 等. 杏花及幼果的抗寒性研究[J]. 西北植物学报, 1995, 15(2): 133-137.  
WANG F, CHEN D W, LI J R, et al. Studies on hardness of apricot flowers and young fruits[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1995, 15(2): 133-137.
- [21] 王静, 张晓煜, 杨洋, 等. 宁夏梨树霜冻指标试验研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 122-127.  
WANG J, ZHANG X Y, YANG Y, et al. Experimental study on frost index of pear in Ningxia Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28): 122-127.
- [22] 张超, 唐秀光, 李玲, 等. 3种玉兰花瓣抗寒临界温度的测定[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(4): 45-49.  
ZHANG C, TANG X G, LI L, et al. Determination of critical temperature of cold in 3 Magnolia petals[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2011, 34(4): 45-49.
- [23] 姚晓红, 万信, 贾建英, 等. 天水蜜桃花果期霜冻气候风险区划研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(7): 144-150.  
YAO X H, WAN X, JIA J Y, et al. On climatic risk zoning of peach in flowering and fruiting period in Tianshui City[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2016, 41(7): 144-150.
- [24] 宫国钦, 衣淑玉, 宫美英, 等. 烟台市果树花期霜冻的危害及防御[J]. 烟台果树, 2008, (2): 1-2.  
GONG G Q, YI S Y, GONG M Y, et al. The danger of flowering frost and defense of fruit trees in Yantai City[J]. Yantai Fruits, 2008, (2): 1-2.