



苹果花期至幼果期花朵和果实 对低温的敏感性研究

杨永娥^{1,2}, 张晓煜^{1,2,3*}, 梁小娟^{1,2}, 马梦瑶^{1,2}, 卫建国²

(1 宁夏大学 葡萄酒与园艺学院, 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, 银川 750002; 3 宁夏气象科学研究所, 银川 750002)

摘 要: 为了确立不同苹果品种在花蕾期到幼果期的抗冻性类型, 建立精准苹果晚霜抗冻性评价方法, 以宁夏 2 个主栽苹果品种‘嘎啦’和‘富士’花蕾期、盛花期、坐果期和幼果期的花朵和果实为试验材料, 利用野外霜冻试验箱分别模拟不同时期自然降温过程, 在 20%、50% 和 80% 受冻率下分别建立 Logistic 方程, 确定轻、中、重度受冻的临界温度; 并检测各品种不同物候期的过冷却点、结冰点、电导率、可溶性糖和可溶性蛋白等抗寒性指标, 结合多元线性回归法综合判断苹果花期至幼果期抗寒能力差异的主要影响因素。结果显示, (1) ‘嘎啦’各个物候期的抗寒能力均强于‘富士’; (2) 同一苹果品种不同物候期抗寒能力不同, 表现为花蕾期>盛花期>坐果期>幼果期; (3) 2 个苹果品种各物候期轻度、中度、重度受冻临界温度随着物候期推移呈现升高的趋势; (4) 受冻率与半致死温度呈极显著正相关(0.909**), 与可溶性蛋白含量呈极显著负相关(-0.874**)。研究表明, ‘嘎啦’和‘富士’4 个物候期花器官相对电导率和可溶性蛋白含量对子房受冻率有较强的响应关系, 过冷却点和结冰点温度等对子房受冻率也有一定的响应, 可将相对电导率、可溶性蛋白含量、过冷却点和结冰点作为评价苹果抗寒性状的重要指标。

关键词: 抗寒性; 物候期; 临界温度; 原位试验; 霜冻

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

Studies on the Sensitivity of Apple Flowers and Fruits to Low Temperatures from Flowering to Young Fruiting Stage

YANG Yonge^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2,3*}, LIANG Xiaojuan^{1,2}, MA Mengyao^{1,2}, WEI Jianguo²

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

Abstract: In this study, the flowers and fruits of two main apple varieties ‘Gala’ and ‘Fuji’ in Ningxia were used as test materials during the bud, blossoming, fruiting and young fruiting period, and the natural cooling process was simulated by using a field frost tester to statistically measure the freezing rate, and then the Logistic equations were set up with the freezing rate of 20%, 50%, and 80%, and the critical temperatures for light, medium, and severe freezing were determined. We also tested the cold resistance indexes such as overcooling point, freezing point, conductivity, soluble sugar and soluble protein contents of each variety in different phenological periods, and combined with the multiple linear regression method to comprehensively judge the main influencing factors of the difference in cold resistance from apple flow-

收稿日期: 2023-01-03; 修改稿收到日期: 2023-09-17

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目(2020ZY004); 科技部科技助力经济 2020 重点专项(KJZLJJ202003)

作者简介: 杨永娥(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事果树生理生态与高效栽培研究。E-mail: yangyong0315@163.com

* 通信作者: 张晓煜, 博士, 研究员, 主要从事气候资源开发利用与气象减灾研究。E-mail: zhang_xyne@163.com

ering to young fruiting period. The results showed that, (1) the cold resistance of ‘Gala’ was stronger than that of ‘Fuji’ in all periods. (2) The cold resistance of the same apple variety was different in different phenological periods, which was manifested as follows: Bud period > blooming period > fruit setting period > young fruit period. (3) The freezing threshold temperatures of the two apple varieties in each period were mild, moderate and severe, and their freezing threshold temperatures showed an increasing trend as the seasonal period progressed. (4) The freezing rate was highly significantly and positively correlated with the half-lethal temperature with a correlation coefficient of 0.909^{**}, and highly significantly and negatively correlated with the soluble protein content with a correlation coefficient of 0.874^{**}. The study showed that the four phenological periods of ‘Gala’ and ‘Fuji’ were highly significant in terms of conductivity and soluble protein content had a strong response relationship to the freezing rate of ovary, and the temperature of overcooling point and freezing point also had a certain response to the freezing rate of ovary, which could be used as important indexes for evaluating the cold-resistant traits of apple, such as conductivity, soluble protein content, overcooling point and freezing point.

Key words: cold hardiness; phenological period; critical temperature; *in-situ* tests; frosts

中国苹果种植面积和产量均居世界首位,全国苹果种植区域已扩大到 25 个省(区、市)^[1]。在苹果生产优势地区,苹果产业作为经济发展的支柱产业,为当地农业增效、农民增收做出了巨大贡献^[2]。随着全球气候变暖,由春季低温引发的苹果萌芽期、花期冻害在中国苹果主产区频繁发生。近 20 年来,中国苹果主产区每 2~3 年遭受 1 次轻度花期霜冻灾害,每 3~5 年遭受 1 次重度花期霜冻灾害^[3]。山西吕梁吉县境内在 2018 年 4 月 6 日至 4 月 7 日凌晨遭受到了极其严重的倒春寒,苹果比 2017 年减产 80%,损失 5 亿元以上^[4]。陕西 30 个县域近 40 年苹果发生霜冻灾害的平均概率达 29.72%^[5]。由春季低温引发的苹果花期冻害在中国苹果生产区频繁发生,观测的数据表明,早春的霜冻和寒流之间有更强的相关性,使得苹果栽培的总体霜冻风险将保持在温暖的气候中,甚至可能增加^[6]。

不同苹果品种的抗寒性存在显著差异^[7-9];而 10 个苹果品种连续物候期花的抗寒性研究结果表明,随着物候过程的推进,花抗冻性逐渐降低,与品种和年份无关^[10]。苹果作为易受春季晚霜冻害的仁果类树种之一,在苹果花期霜冻发生规律、霜冻调查以及霜冻防御方面研究较多^[11-13]。宁夏地处中国西北地区东部季风边缘,对全球气温变化响应敏感。气温是影响评估产业发展、降低经济产量和效益及限制苹果栽培区域扩大的一个重要因素。据气象资料记载,宁夏地区苹果花期通常在 4 月中下旬,晚霜冻的发生时间有时会延迟至 5 月上旬,会对苹果花芽和果实造成严重冻害。花芽受冻会表现为内部鳞片褐变,花原基或部分花原基受冻害,柱头变黑干枯,严重时整个花芽干枯死亡,从而导致仅开

花不结果;果实受冻表现为从果核到果肉变黑、果实脱落等现象,对宁夏苹果产业造成了巨大的危害,成为限制苹果产业发展的重要因素^[14-15]。然而,关于苹果品种在花期不同阶段对低温的敏感性研究还很薄弱。离体试验因破坏了植物自身的抗逆途径,打破抗逆机制,以离体抗冻性试验取得的研究结果能否直接用于指导霜冻防御工作还颇受争议。因此,本试验以‘嘎啦’和‘富士’苹果品种为研究对象,以原位试验为基础,确定不同苹果品种在连续物候期(花蕾期、盛花期、坐果期和幼果期)的抗冻性变化类型,为建立精准苹果晚霜抗冻性评价方法提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 4—5 月苹果花蕾期、盛花期、坐果期和幼果期在宁夏银川市河东生态园艺试验中心进行,试验地位于东经 106°27′41″,北纬 38°22′51″,土壤类型为灌淤土,年平均气温 9.5℃,年降水量 183 mm 左右,≥10℃活动积温 3 858℃·d,年平均日照时间近 2 942 h,全年无霜期 166 d,试验期及苹果花蕾期前每月平均气温及积温情况见表 1。

1.2 试验材料及仪器

1.2.1 试验材料

选用树体健壮、生长状况、园地土肥水管理、营养状况均一致且无病虫害的 12 年生苹果树为研究对象,授粉方式均为人工授粉,在果树开花期用小毛刷子、橡皮头进行点授。南北行向,株行距 3.0 m×4.0 m。所选苹果品种为该区域主栽品种,分别是早熟苹果品种‘嘎啦’(砧木为新疆野苹果)和晚熟品种‘富士’(砧木为八棱海棠)。

表 1 试验地 1—5 月平均气温及 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温

Table 1 Average temperatures from January to May and active cumulative temperatures of $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

月份 Month	平均气温 Average temperatures / $^{\circ}\text{C}$	活动积温 Active cumulative temperature / $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	
		$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	-6.0	—	—
2	-4.9	—	—
3	8.0	251.4	235.5
4	12.9	386.1	386.1
5	18.0	557.3	557.3

1.2.2 仪器设备

原位试验采用宁夏回族自治区气象科学研究所研发的野外霜冻试验箱,该试验箱使用液氮作为制冷剂,箱体使用绝热泡沫材料,使用风扇完成气体对流循环。

温度控制过程中,在 2 个内部气体循环和外部气体循环控制下完成定时定温自然霜冻过程模拟。集温度采集、数据存储、数据显示、定时定温的自然霜冻模拟控制系统,测量精度达到 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统每秒钟采集数据 1 次,每分钟进行数据保存,霜箱设计图及实体图见图 1。

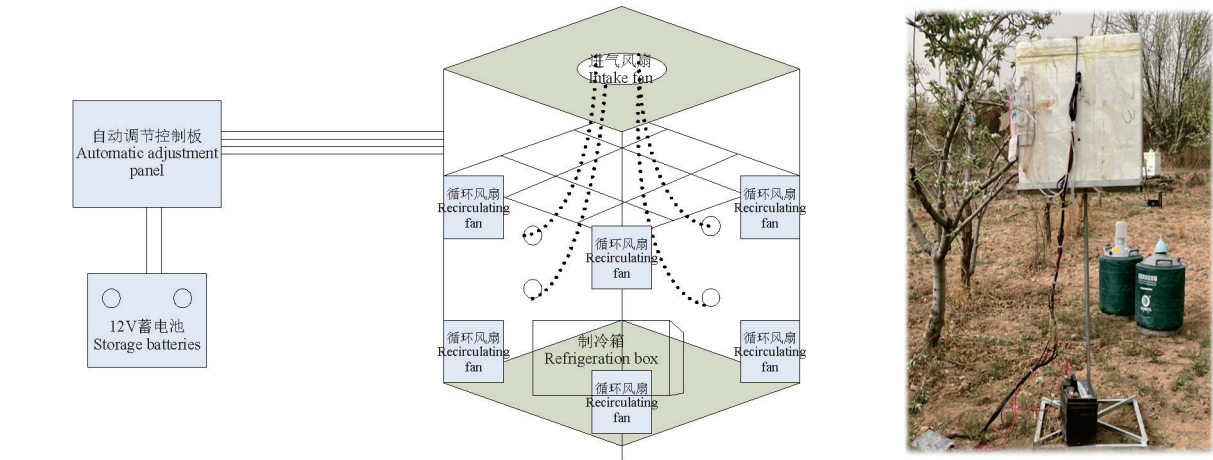


图 1 野外霜冻试验箱设计与试验图

Fig. 1 Design and test diagram of the field frost test chamber

1.3 霜冻处理

以‘嘎啦’和‘富士’为试验材料,依据文献[6]和[10]在苹果物候期花期至幼果期不同阶段均设置 4 个不同低温处理水平。其中,花蕾期分别为 -2.0 , -3.0 , -4.0 , $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;盛花期分别为 -1.0 , -2.0 , -3.0 , $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;坐果期分别为 -1.0 , -2.0 , -2.5 , $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;幼果期分别为 -1.0 , -1.5 , -2.0 , $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在低温处理过程中,先在 1 h 内降至 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,后以 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 降至设计的处理温度,在达到每个处理温度并持续 1 h 后,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 升温至环境温度,试验结束后,连续跟踪调查苹果幼果受冻率与坐果率。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 受冻率和坐果率

受冻率是苹果花褐变数占开花总数的百分率,一般在试验结束 24 h 以后,统计苹果各时期供试部位褐变情况。坐果率以苹果结果数占开花总数的百分比来表示,在试验结束后,每隔 7 d 统计 1 次坐果情况,共统计 3 次,以最后一次为准。

1.4.2 过冷却点与结冰点

以供试样品的子房作为测定部位。取苹果花枝条置于人工霜箱(型号为 SDX-20)内,将 TC-40C 型热电偶温度传感器探头固定在待测部位,设置温度曲线模拟自然界霜夜降温过程,先 1 h 降至 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,再以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用自然升温过程升温,其原理与陈仁伟等[16]一致。

1.4.3 耐寒生理指标

用高低温交变试验箱(型号为 BC1300)对供试样品进行低温冷冻处理,处理温度同 1.3 节。相对电导率采用电导法测定[17];可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸比色法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定[18]。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行预处理,Logistic 方程采用 DPS 软件进行拟合,用 SPSS 进行相关性和线性回归分析,Origin 2018 64Bit 制图。

2 结果与分析

2.1 苹果果实不同物候期、不同降温梯度下受冻率与半致死温度变化

‘嘎啦’和‘富士’苹果花蕾期、盛花期、坐果期和幼果期各冷冻处理果实的平均受冻率调查结果如表2所示。首先,同一苹果品种同一物候期的抗寒性随着处理温度的降低而逐渐下降。例如,花蕾阶段,‘嘎啦’和‘富士’在-2.0℃处理下均未出现受冻情况,在-3.0℃处理下受冻率分别为7%和10%,在-4℃处理下受冻率分别为34%和47%,在-4.5℃时受冻率分别为58%和65%,说明2个苹果品种花蕾期受冻临界高温为-2.0℃。其次,同一苹果品种抗寒性随着物候过程的推进而逐渐下降。例如,在-1℃处理下,‘嘎啦’在花蕾阶段未表现出受冻情况,而在幼果期受冻率达到9%。另外,两品种间比较可以发现,不同苹果品种抗寒能力不同,无论处于哪种物候阶段,‘嘎啦’的抗寒性均强于‘富士’。

考虑到苹果在栽培中疏花疏果的处理,本研究将

受冻率在20%以下作为自然疏花疏果过程,在20%~50%作为轻度受冻,在50%~80%作为中度受冻,在80%以上作为重度受冻。以表2中各时期的处理温度为自变量(t),以相应的受冻率为因变量(y),拟合出各品种不同时期的Logistic方程(表3),据此方程再分别计算出受冻率为20%、50%、80%时温度。

由表3可知,苹果轻度受冻时(20%受冻率),‘嘎啦’花蕾期、盛花期、坐果期、幼果期的受冻温度分别为-3.6,-2.7,-1.3,-1.2℃,‘富士’则分别为-3.4,-2.1,-1.5,-0.4℃;苹果中度受冻时(50%受冻率),‘嘎啦’各个时期受冻温度分别为-4.3,-3.2,-1.8,-1.5℃,‘富士’则为-4.1,-3.1,-2.3,-1.4℃;苹果重度受冻时(80%受冻率),‘嘎啦’各个时期受冻温度分别为-5.1,-4.2,-2.8,-2.7℃,‘富士’则分别为-4.8,-3.8,-3.2,-2.2℃。

可见,2个苹果品种的抗寒性均随着物候期推进表现为逐渐下降的趋势,即生育期越往后越易遭受冻害;不同苹果品种抗寒性存在差异,‘嘎啦’各时期的抗寒能力始终强于‘富士’。

表2 苹果物候期不同阶段果实的受冻率

Table 2 Frost rates of fruit at different stages of the apple phenology

品种 Variety	时期 Stage	受冻率 Frost rate/%						
		-1℃	-1.5℃	-2℃	-2.5℃	-3℃	-4℃	-4.5℃
嘎啦 Gala	花蕾期 Bud stage	—	—	0	—	7	34	58
	盛花期 Flowering stage	1	—	2	—	28	61	—
	坐果期 Fruit setting stage	9	—	61	81	78	—	—
	幼果期 Young fruit stage	9	45	76	74	—	—	—
富士 Fuji	花蕾期 Bud stage	—	—	0	—	10	47	65
	盛花期 Flowering stage	3	—	21	—	45	90	—
	坐果期 Fruit setting stage	17	—	27	72	71	—	—
	幼果期 Young fruit stage	39	48	71	69	—	—	—

表3 苹果不同物候期受冻率与低温之间的Logistic方程及致死温度

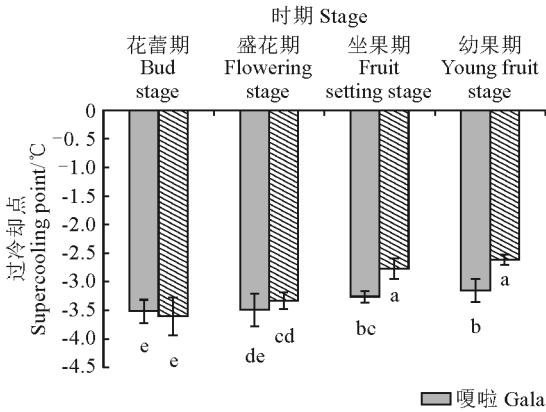
Table 3 Logistic equations of frost rate to low temperature and lethal temperatures for different phenological stages of apple

品种 Variety	发育时期 Developmental stage	Logistic 方程 Logistic equation	决定系数 R^2	致死温度 Lethal temperature/℃		
				20%受冻率 20% frost rate	50%受冻率 50% frost rate	80%受冻率 80% frost rate
嘎啦 Gala	花蕾期 Bud stage	$y=0.986634/(1+e^{8.5872+1.9870t})$	0.999 5	-3.6	-4.3	-5.1
	盛花期 Flowering stage	$y=0.644631/(1+e^{9.6651+3.1335t})$	0.999 7	-2.7	-3.2	-4.2
	坐果期 Fruit setting stage	$y=0.815935/(1+e^{5.5509+3.3625t})$	0.992 6	-1.3	-1.8	-2.8
	幼果期 Young fruit stage	$y=0.766492/(1+e^{7.3843+5.1939t})$	0.994 2	-1.2	-1.5	-2.7
富士 Fuji	花蕾期 Bud stage	$y=0.779859/(1+e^{9.0577+2.3698t})$	0.999 6	-3.4	-4.1	-4.8
	盛花期 Flowering stage	$y=1.623500/(1+e^{4.3575+1.1430t})$	0.995 4	-2.1	-3.1	-3.8
	坐果期 Fruit setting stage	$y=0.906640/(1+e^{4.1612+1.9287t})$	0.851 4	-1.5	-2.3	-3.2
	幼果期 Young fruit stage	$y=0.777345/(1+e^{1.7945+1.7077t})$	0.901 2	-0.4	-1.4	-2.2

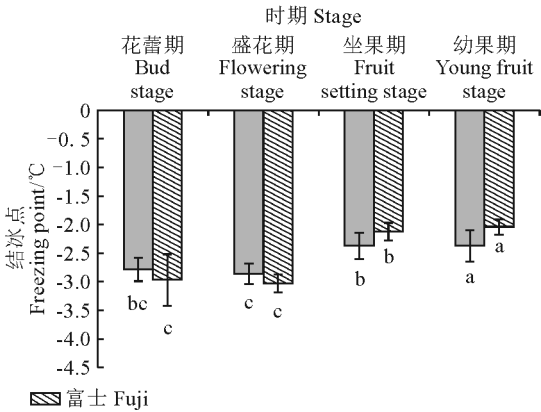
2.2 苹果不同物候期、不同降温梯度下抗寒性指标的变化特征

2.2.1 过冷却点和结冰点

图 2 显示,两苹果品种过冷却点随着物候期而逐渐上升,但在同一苹果品种不同物候期之间存在显著差异($P<0.05$)。



其中,‘嘎啦’过冷却点以花蕾期最低(-3.52 ± 0.20) °C,并与坐果期[(-3.26 ± 0.10) °C]、幼果期[(-3.15 ± 0.20) °C]存在显著差异,而与盛花期之间无显著差异;‘富士’不同物候期的过冷却点表现与‘嘎啦’相同,但其花蕾期与盛花期间差异显著。



不同小写字母表示品种及处理间差异显著($P<0.05$)。
图 2 不同品种苹果、不同物候期过冷却点与结冰点
The different normal letters indicate significant difference among varieties and treatments at 0.05 level ($P<0.05$).
Fig. 2 Overcooling and freezing points for different varieties of apples and different phenological stages

2 个苹果品种间过冷却点在花蕾期和盛花期均无显著差异,而在坐果期和幼果期差异显著($P<0.05$),‘富士’坐果期和幼果期过冷却点均显著高于同期‘嘎啦’。同时,两苹果品种结冰点随着物候期先降后升,且变化幅度明显比过冷却点小,但在同一品种不同物候期间仍存在显著差异($P<0.05$)。其中,‘嘎啦’坐果期结冰点[(-2.37 ± 0.23) °C]显著高于其它 3 个时期,‘富士’花蕾期和盛花期结冰点显著低于其它时期,结冰温度分别为 (-2.97 ± 0.45) °C、 (-3.03 ± 0.16) °C。不同品种同一物候期结冰温度均无显著差异,但‘嘎啦’结冰温度在盛花期高于‘富士’,在坐果期低于‘富士’。

2.2.2 相对电导率

从表 4 可知,2 个苹果品种相对电导率在不同物候期均随胁迫温度的降低呈现逐渐上升的趋势。在花蕾期时,‘嘎啦’和‘富士’花器官的相对电导率在温度从室温下降至 -3 °C 前均缓慢上升,但变化不显著;在温度下降至 -3 °C 时分别达到 37% 和 35%,当温度下降至 -4 °C 后均迅速升高到 55%~60%。在盛花期时,‘富士’花器官相对电导率在温度从室温下降至 -2 °C 前缓慢上升到 45%,在 -2 °C 之后迅速升高至 78%;而‘嘎啦’花器官相对电导率上升速度较为稳定,在 -3 °C 达到 50%。在坐果期时,‘嘎啦’和‘富士’花器官相对电导率在 -2.5 °C 时分别达到 51% 和 79%。

表 4 不同低温胁迫下苹果相对电导率变化

Table 4 Changes in relative conductivity of apple under low temperature stress

时期 Stage	处理温度 Processing temperature /°C	相对电导率 Relative electrical conductivity/%	
		嘎啦 Gala	富士 Fuji
花蕾期 Bud stage	0	23.32±5.86b	25.88±2.34c
	-2	34.55±10.40ab	30.16±1.07c
	-3	37.32±17.30ab	34.70±3.60c
	-4	49.17±15.91ab	58.49±15.31b
	-4.5	60.57±18.70a	74.97±10.07a
盛花期 Flowering stage	0	30.40±5.51c	38.76±0.28c
	-1	36.97±9.35bc	40.15±1.83c
	-2	45.40±6.15b	41.29±6.09c
	-3	50.53±3.58b	66.10±11.46b
	-4	64.01±9.88a	80.78±6.39a
坐果期 Fruit setting stage	0	26.42±3.40c	43.50±1.96b
	-1	34.01±6.17c	46.85±0.04b
	-2	43.89±2.69b	48.11±2.89b
	-2.5	51.03±3.80b	78.88±8.52a
	-3	70.21±7.77a	87.13±12.21a
幼果期 Young fruit stage	0	24.97±0.93d	39.06±2.31d
	-1	38.30±6.37c	45.42±2.76cd
	-1.5	45.40±5.39bc	47.92±7.35c
	-2	47.89±5.02b	80.24±1.41b
	-2.5	60.12±1.49a	92.91±0.82a

注:同期同列不同小写字母表示处理温度间在 0.05 水平存在显著差异。下同。
Note: The different normal letters within same column and stage indicate significant difference among treatment temperatures at 0.05 level. The same as below.

在幼果时期时,在-2℃处理下,‘嘎啦’和‘富士’花器官相对电导率分别达到48%和80%。将苹果不同物候期花器官的相对电导率(y)对相应的胁迫温度(t)作拟合方程,从而得各物候期的Logistic

方程和半致死温度(LT₅₀),并将此半致死温度与表3中50%受冻率时的致死温度进行比较(表5)可知,‘嘎啦’、‘富士’在4个物候期50%受冻率时致死温度均高于由相对电导率拟合的半致死温度。

表5 苹果不同物候期电导率与低温的Logistic方程、半致死温度和50%受冻率温度比较

Table 5 Comparison of the Logistic equation for relative electric conductivity to low temperature, semi-lethal temperature and 50% freezing rate temperature for apples at different phenological stages

品种 Variety	时期 Stage	Logistic 方程 Logistic equation	决定系数 R^2	半致死温度 LT ₅₀ /℃	50%受冻温度 50% freezing rate temperature/℃
嘎啦 Gala	花蕾期 Bud stage	$y=902700.1630/(1+e^{12.4041+0.565432t})$	0.973 7	-4.6	-4.3
	盛花期 Flowering stage	$y=234.5017/(1+e^{3.5353+0.544553t})$	0.982 7	-4.1	-3.2
	坐果期 Fruit setting stage	$y=1066107.0099/(1+e^{12.6564+0.947987t})$	0.989 7	-2.8	-1.8
	幼果期 Young fruit stage	$y=96728.4669/(1+e^{9.1837+0.612400t})$	0.960 8	-2.6	-1.5
富士 Fuji	花蕾期 Bud stage	$y=130.9601/(1+e^{6.5563+1.4634t})$	0.996 4	-4.2	-4.8
	盛花期 Flowering stage	$y=90.0889/(1+e^{9.2885+3.2830t})$	0.998 6	-2.9	-3.8
	坐果期 Fruit setting stage	$y=97.7504/(1+e^{16.3861+7.1226t})$	0.991 4	-2.3	-3.2
	幼果期 Young fruit stage	$y=91.6045/(1+e^{8.9313+4.9564t})$	0.981 6	-1.8	-2.2

2.2.3 可溶性糖含量

可溶性糖是植物生长发育过程中所需要的主要营养物质,也是逆境胁迫下主要渗透调节物质。可溶性糖含量随低温胁迫的加剧而积累,到达一定胁迫程度后植物组织合成糖的水平逐步下降,这是植物在逆境状态下的自我保护应答机制^[19-20]。

表6显示,苹果不同物候期可溶性糖含量随温度降低整体呈先上升后下降趋势。其中,在花蕾期,‘嘎啦’和‘富士’花器官可溶性糖含量在温度从室温下降至-4℃之前均呈现上升趋势,在-3℃时达到峰值(分别为28.96和21.24 mg/g),较室温下分别增加78.1%和71.0%。在盛花时期,‘嘎啦’可溶性糖含量在-2℃最高(24.98 mg/g),而‘富士’可溶性糖含量在-2℃和-3℃时均达到最高(19.65 mg/g)。在坐果时期,‘嘎啦’和‘富士’可溶性糖含量均在-2.5℃时达到最高(分别为23.64和21.11 mg/g),较室温分别增加32.2%和73.3%。在幼果期,‘嘎啦’和‘富士’可溶性糖含量在-1.5℃时达到峰值后,在-2.5℃时又呈现轻微的小范围波动上升趋势,可能是由于幼果体内其他物质小范围分解产生可溶性糖。

2.2.4 可溶性蛋白含量

可溶性蛋白作为植物体体内主要的渗透调节物质,在其适应逆境胁迫方面发挥着重要作用^[21]。由表7知,随胁迫温度降低,两苹果品种花器官可溶性蛋白含量在花蕾期、盛花期、坐果期和幼果期整体均呈现先升高后降低的趋势。

表6 不同低温胁迫下苹果可溶性糖含量变化

Table 6 Changes in soluble sugar content of apple under low temperature stress

时期 Stage	处理温度 Processing temperature /℃	可溶性糖含量 Soluble sugar content/(mg/g)	
		嘎啦 Gala	富士 Fuji
花蕾期 Bud stage	0	6.35±1.09d	6.15±0.42c
	-2	7.88±1.19d	8.10±0.66c
	-3	28.96±3.04a	21.24±0.71a
	-4	23.69±2.77b	13.31±1.30b
	-4.5	13.41±2.53c	7.81±1.02c
盛花期 Flowering stage	0	17.04±1.01c	9.01±1.65c
	-1	21.65±2.08b	15.64±1.55b
	-2	24.98±3.27a	19.65±1.00a
	-3	20.70±2.33b	19.65±0.70a
	-4	15.44±2.13c	18.54±0.31a
坐果期 Fruit setting stage	0	16.03±1.01c	5.63±0.08c
	-1	18.88±1.94b	16.03±0.56b
	-2	22.54±1.64ab	18.28±1.84ab
	-2.5	23.64±1.45a	21.11±0.67a
	-3	19.39±1.33b	18.98±1.53ab
幼果期 Young fruit stage	0	15.46±1.58c	9.81±0.56c
	-1	18.99±1.93bc	16.02±0.78b
	-1.5	24.89±0.90a	21.39±2.00a
	-2	19.94±1.84b	19.76±0.98a
	-2.5	23.13±0.91a	19.90±1.91a

在花蕾期,‘嘎啦’花器官可溶性蛋白含量从室温下降至-4℃之前整体呈上升趋势,在-3℃时达到峰值(4.28 mg/g),此时较室温(3.09 mg/g)增加38.5%,而‘富士’花器官可溶性蛋白含量在-4℃达到峰值(4.31 mg/g),较室温增加20.7%。

表 7 不同低温胁迫下苹果可溶性蛋白含量变化

Table 7 Changes in soluble protein content of apple under low temperature stress			
时期 Stage	处理温度 Processing temperature /℃	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(mg/g)	
		嘎啦 Gala	富士 Fuji
花蕾期 Bud stage	0	3.09±0.32c	3.57±0.18b
	-2	3.73±0.37b	3.90±0.35b
	-3	4.28±0.14a	3.93±0.10b
	-4	3.92±0.08ab	4.31±0.06a
	-4.5	3.54±0.08b	3.96±0.35b
盛花期 Flowering stage	0	3.66±0.30b	3.88±0.30ab
	-1	3.75±0.10b	3.97±0.26ab
	-2	4.09±0.13ab	4.07±0.31a
	-3	4.11±0.16a	4.09±0.05a
	-4	3.93±0.47ab	3.51±0.20b
坐果期 Fruit setting stage	0	2.59±0.11b	2.19±0.09b
	-1	2.60±0.07b	2.24±0.08ab
	-2	2.68±0.07ab	2.34±0.03a
	-2.5	2.78±0.05a	2.30±0.05ab
	-3	2.53±0.08b	2.24±0.05ab
幼果期 Young fruit stage	0	2.45±0.04c	2.21±0.07b
	-1	2.86±0.08ab	2.23±0.06b
	-1.5	2.78±0.14b	2.33±0.03a
	-2	3.04±0.14a	2.29±0.06ab
	-2.5	2.80±0.11b	2.25±0.02ab

在盛花期,‘嘎啦’和‘富士’花器官可溶性蛋白含量均在-3℃达到峰值,分别为4.11,4.09 mg/g。在坐果期,‘嘎啦’可溶性蛋白含量在-2.5℃时达到峰值(2.78 mg/g),‘富士’可溶性蛋白含量-2℃时达到峰值(2.34 mg/g);‘嘎啦’和‘富士’可溶性蛋白含量在-3℃时与室温下基本一致。在幼果时期,‘嘎啦’可溶性蛋白含量呈现升高-降低-升高的趋势,在-1℃最高(2.86 mg/g),较室温下增加14.3%,而‘富士’可溶性蛋白含量在-1.5℃达到最高,较室温下仅增加4.7%。同时,随着物候期的后延,两品种可溶性蛋白含量呈现下降的趋势,后2个时期明显低于前2个时期,并且不同苹果品种应对逆境的反应程度不同,‘富士’变化幅度更大。

2.3 苹果物候期致死温度及各抗寒指标之间的相关性

2个苹果品种物候期致死温度及各抗寒指标之间的相关分析结果(表8)显示,花器官半致死温度与受冻率呈极显著正相关($r=0.909^{**}$),与过冷却点温度、结冰点温度呈显著正相关($r=0.746^{*}$, 0.796^{*});受冻率与过冷却点温度、结冰点温度均呈显著正相关($r=0.741^{*}$, 0.715^{*}),与可溶性蛋白含量呈显著负相关($r=-0.874^{*}$);过冷却点温度、结冰点温度均与可溶性蛋白含量显著负相关($r=-0.896^{*}$, -0.939^{*});而可溶性糖含量与其余指标均无显著性相关。

以上结果说明半致死温度、过冷却点和结冰点温度越高,受冻率越高,抗寒性越差;而可溶性蛋白含量越高,供试部位受冻程度越低。

表 8 抗寒性指标相关系数矩阵

Table 8 Correlation coefficient matrix for cold resistance indicators							
指标 Index	半致死温度 Lethal temperature	相对电导率 Electrical conductance	受冻率 Freezing rate	过冷却点 Supercooling point	结冰点 Freezing point	可溶性蛋白 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar
半致死温度 Lethal temperature	1						
相对电导率 Electrical conductance	0.491	1					
受冻率 Freezing rate	0.909 ^{**}	0.509	1				
过冷却点 Supercooling point	0.746 [*]	0.858 ^{**}	0.741 [*]	1			
结冰点 Freezing point	0.796 [*]	0.689	0.715 [*]	0.938 ^{**}	1		
可溶性蛋白 Soluble protein	-0.871	-0.619	-0.874 ^{**}	-0.896 ^{**}	-0.939 ^{**}	1	
可溶性糖 Soluble sugar	0.630	-0.026	0.398	0.194	0.366	-0.438	1

2.4 苹果不同物候期抗寒能力判断指标解析

采用多元线性回归分析法,将2个苹果品种4个时期子房受冻率作为因变量(y),将同时期相对

电导率(x_1)、过冷却点(x_2)、结冰点(x_3)、可溶性蛋白(x_4)和可溶性糖(x_5)作为自变量,构建多元线性回归模型(表9)。结果表明,调整后 $R^2=0.714$,说

明模型解释度较好;方差分析中, $F=16.480$, $P=0.000<0.01$,说明此模型具有统计学意义。同时,从不同自变量的标准化系数及显著性 P 值发现,本研究涉及的 4 个物候期的相对电导率和可溶性蛋白含量是造成子房受冻率差异的主要因素,其次为结冰点温度,

而过冷点温度和可溶性糖含量的影响相对较小。以上研究结果表明,衡量苹果花期、果期抗寒性的最主要指标是子房的相对电导率和可溶性蛋白含量,但结冰点温度、过冷点温度、可溶性糖含量等生长发育指标也是衡量苹果花蕾期至幼果期抗寒性的重要指标。

表 9 多元线性回归模型
Table 9 Multiple linear regression mode

指标 Index	未标准化系数 Unstandardized coefficient	模型解释度 Model explanation degree (R^2)	F 值(P 值) F value (P value)	标准化系数 Standardized coefficient	显著性(P 值) Significance (P value)
常量 Constant	-0.892				0.024
相对电导率 Electrical conductance (x_1)	1.307			0.766	0.000
过冷却点 Super cooling point (x_2)	-0.089	0.714	16.480(0.00)	-0.127	0.562
结冰点 Freezing point (x_3)	-0.379			-0.480	0.033
可溶性蛋白 Soluble protein (x_4)	-0.256			-0.674	0.001
可溶性糖 Soluble sugar (x_5)	0.008			0.142	0.164

3 讨 论

本研究以原位试验为基础,运用野外霜冻试验箱对 2 个苹果品种花期至幼果期做降温处理,模拟自然界霜冻过程,在试验处理 1 周后统计各物候期子房受冻率,从而更精准地反映不同物候期抗寒能力。结果表明:不同苹果品种抗寒能力不同,‘嘎啦’抗寒能力强于‘富士’。李晓龙等^[22]研究不同品种苹果花期抗寒能力结果表明,‘嘎啦’过冷却点温度较低,其开花持续时间、花量及全开花比率与其他红色品种相比并无差异,说明其单个花朵自身的抗寒性较强,树体花期抗寒能力也较强。

本研究以受冻率建立 Logistic 方程,统计 2 个苹果品种轻度、中度、重度受冻临界温度,结果表明:随着物候期的推进,2 个苹果品种轻、中、重度受冻临界温度呈现升高的趋势。Proebsting 等^[23]研究了‘红美味’苹果生殖器官的抗冻性,并确定了 LT_{50} 值,发现随着物候期推移,其耐寒性逐渐恶化,有轻微波动;红花期 LT_{50} 值为 $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,球囊期为 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,开花期为 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,盛花期为 $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,末花期为 $-2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研也发现,同一苹果品种不同物候期抗寒能力不同,并表现为花蕾期>盛花期>坐果期>幼果期。有学者研究不同苹果品种在花期不同阶段的晚春抗寒性也表明,随着物候期推进,苹果抗寒能力表现出逐渐下降的趋势^[24]。在苹果开花至幼果时期,花蕾期最耐寒,在开花时只能忍受零下几度的低温,因为此时雌蕊和胚珠是最敏感的部分,其他器官也会不同程度受损^[25]。

相对电导率作为衡量植物抗寒性的重要指标,研

究表明,果树根系、花朵、枝条等的抗寒性与电导率密切相关^[26-28]。本研究中,抗寒性强的‘嘎啦’花器官的相对电导率值在各时期、不同低温处理下均低于‘富士’,其变化范围为 $23.32\%\sim70.21\%$,且变化趋势较为平缓,而抗寒性弱的‘富士’相对电导率值较高,并且在 $(-2)\sim(-4)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理时急剧上升,说明其此时细胞膜便开始严重受损,稳定性变差。杨豫等^[29]利用电导率建立的 Logistic 方程和半致死温度可快速评价不同葡萄品种枝条抗寒性。本研究测定了苹果花期至幼果期在不同温度下的相对电导率,探究其对逆境的适应性和抵抗能力。结果显示,在逆境初期,花器官相对电导率呈缓慢上升趋势,随着温度降低达到一定值后显著增加,随后趋于稳定,呈现“S”形曲线。低温处理结果显示,苹果花期至幼果期对轻度逆境具有一定的适应过程,温度下降至 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,苹果花期至幼果期相对电导率均超过 50% ,说明苹果花器官和幼果的膜系统在低温胁迫下遭受了一定的伤害,而且苹果花器官和幼果的伤害程度表现出显著的差异,后期相对电导率增加缓慢,证明在重度逆境条件下细胞膜已经完全破损,电解质完全外流。根据低温下等温差处理运用 Logistic 方程拟合,结果得出‘嘎啦’花蕾期、盛花期、坐果期、幼果期半致死温度(LT_{50})分别为 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,‘富士’各时期半致死温度分别为 $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,进一步印证了随着物候期推移,苹果供试部位抗寒能力逐渐变弱。

随着过冷却点温度的降低,植物能够在较低的温度下快速结冰,说明植株抗寒能力越强^[30]。本研究发现,‘嘎啦’苹果花蕾期至幼果期过冷却点温度

分别为-3.6,-3.5,-3.3,-3.2℃,而‘富士’过冷却点温度分别为-3.6,-3.3,-2.8,-2.6℃,一旦温度降至过冷却点,苹果供试部位开始释放热量,导致温度急剧上升达到峰值,此时的峰值为结冰点。值得注意的是,‘嘎啦’苹果各个时期过冷却点温度均低于‘富士’,进一步证明了‘嘎啦’苹果相较于‘富士’具有更强的抗寒能力。此外,随着物候期推进,‘嘎啦’苹果过冷却点温度呈现升高的趋势,这也表明果树的抗寒性在物候期推进的过程中逐渐降低。

本研究发现,2个苹果品种、4个物候期花器官可溶性糖含量随低温处理均呈先上升后下降趋势,这与李呈呈等^[31]对6个彩叶桂品种对低温胁迫的生理响应、Yan等^[32]对苜蓿抗寒性生理特性的研究中可溶性糖含量变化结果一致。不同苹果品种,在同一时期同一低温处理下供试部位可溶性糖含量达到最大值的低温不同,这可能与品种间特性不同有关。在达到一定低温时,可溶性糖含量与可溶性蛋白呈下降趋势,可能是因为苹果花器官或幼果遭受严重冻害胁迫后,细胞内保护酶系统等遭到严重破坏。另外,本研究对苹果各物候期霜冻指标相关性与多元线性回归表明,半致死温度和可溶性蛋白含量与抗寒性高度相关。研究表明,结缕草^[31]和枣树^[32]的可溶性蛋白含量与其抗寒性呈极显著相关。本研究中‘嘎啦’各时期、不同温度处理下可溶性蛋

白含量均低于‘富士’,说明‘富士’的可溶性蛋白调节机制比‘嘎啦’对低温更敏感,两品种都以通过提高可溶性蛋白含量来抵御低温胁迫。曹建东在葡萄砧木抗寒性生理指标比较中也发现这一现象^[33]。

4 结 论

2个苹果品种开花物候期不同阶段对低温的敏感性鉴定结果表明:

(1)‘嘎啦’花蕾期、盛花期、坐果期、幼果期重度受冻温度分别为-5.1,-4.2,-2.8,-2.7℃,‘富士’分别为-4.8,-3.8,-3.2,-2.2℃。

(2)不同苹果品种抗寒能力不同,‘嘎啦’抗寒性强于‘富士’。

(3)同一苹果品种随着物候期推进,抗寒性逐渐下降,抗寒能力表现为花蕾期>盛花期>坐果期>幼果期。

(4)传统抗寒生理指标中,半致死温度和可溶性蛋白更适用于表征受冻状况,其次为过冷却点和结冰点温度等抗寒性指标。

本研究仅从生理指标方面对苹果品种抗寒能力进行评价,而未考虑果树抗寒机理研究,为了进一步证实以上观点,今后将开展基于冷胁迫下不同苹果品种、不同物候期各器官的转录组差异性研究,从分子角度探索抗寒机制,以为苹果栽培生产提供更科学指导。

参考文献:

- [1] 张强强. 中国苹果生产布局演变与优势评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [2] 霍学喜, 刘天军, 刘军弟, 等. 2020 年度中国苹果产业发展报告(精简版)[J]. 中国果菜, 2022, **42**(2): 1-6.
HUO X X, LIU T J, LIU J D, *et al.* China apple industry development report 2020 (simplified edition)[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2022, **42**(2): 1-6.
- [3] 路 超, 张文昌, 王金政. 苹果花期霜冻发生规律、防御与灾后应急管理技术[J]. 烟台果树, 2020(2): 39-40.
LU C, ZHANG W C, WANG J Z. Occurrence regularity, defense and post-disaster emergency management technology of frost in apple flowering period[J]. *Yantai Fruits*, 2020(2): 39-40.
- [4] 窦兴华, 冯冬梅, 葛成稳, 等. 关于 2018 年吉县苹果树“倒春寒”冻灾情况的调查[J]. 山西果树, 2018(6): 39-40.
DOU X H, FENG D M, GE C W, *et al.* Investigation on the freeze injury of apple trees in Ji County in 2018[J]. *Shanxi Fruits*, 2018(6): 39-40.
- [5] 杨晓娟, 孙靖博, 孙彦坤, 等. 陕西县域苹果种植风险评估与保险费率厘定[J]. 中国农业气象, 2022, **43**(10): 798-809.
YANG X J, SUN J B, SUN Y K, *et al.* Risk assessment and premium rating of apple planting in the base counties of Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, **43**(10): 798-809.
- [6] UNTERBERGER C, BRUNNER L, NABERNEGG S, *et al.* Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(7): e0200201.
- [7] SALAZAR-GUTIÉRREZ M R, CHAVES B, HOOGEN-BOOM G. Freezing tolerance of apple flower buds[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, **198**: 344-351.
- [8] 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.
- [9] ŁYSIAK G P, KURLUS R, MICHALSKA A. Increasing the frost resistance of Golden Delicious, Gala and Šampion apple cultivars[J]. *Folia Horticulturae*, 2016, **28**(2): 125-135.
- [10] SZALAY L, GYÖRGY Z, TÓTH M. Frost hardiness of apple (*Malus × domestica*) flowers in different phenological phases[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, **253**: 309-315.
- [11] 王景红, 刘 璐, 高 峰, 等. 陕西富士系苹果花期霜冻灾害气象指标的修订[J]. 中国农业气象, 2015, **36**(1): 50-56.
WANG J H, LIU L, GAO F, *et al.* Revision on meteorological indices of florescence frost disaster for Fuji apple in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, **36**(1): 50-56.
- [12] 李红英, 马国飞, 段晓凤, 等. 宁夏 2014 年苹果晚霜冻害调

- 查分析[J]. 宁夏农林科技, 2014, **55**(9): 36-38.
- LI HY, MA G F, DUAN X F, *et al.* Investigation and analysis of apple late frost in Ningxia in 2014[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2014, **55**(9): 36-38.
- [13] 袁伯顺, 许彦平, 姚晓红, 等. 基于春季晚霜冻害的天水苹果气候风险区划[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(2): 185-189.
- YUAN B S, XU Y P, YAO X H, *et al.* The compartment of later frost climate risk for apple in Tianshui[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, **29**(2): 185-189.
- [14] 张静艳, 吴 宏, 谢应吉, 等. 宁夏苹果晚霜冻防控措施应用效果调查研究[J]. 现代农业科技, 2018, **47**(23): 80-81.
- ZHANG J Y, WU H, XIE Y J, *et al.* Investigation on the application effect of late frost prevention and control measures for Ningxia apples[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, **47**(23): 80-81.
- [15] 樊晓春, 马鹏里, 党 冰, 等. 晚霜冻变化对甘肃平凉苹果冻害的影响研究[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(31): 194-200.
- FAN X C, MA P L, DANG B, *et al.* Study of influence of late frost variation on apple in Pingliang, Gansu[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(31): 194-200.
- [16] 陈仁伟, 张晓煜, 杨 豫, 等. ‘赤霞珠’酿酒葡萄根颈和不同根系部位抗寒性比较[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(9): 2 754-2 762.
- CHEN R W, ZHANG X Y, YANG Y, *et al.* Comparison of cold resistance in root collar and different parts of root of ‘Cabernet Sauvignon’[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(9): 2 754-2 762.
- [17] 赵世杰, 苍 晶. 植物生化实验原理和技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 王丽雪, 李荣富, 马兰青, 等. 葡萄枝条中淀粉、还原糖及脂类物质变化与抗寒性的关系[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1994, **15**(4): 1-7.
- WANG L X, LI R F, MA L Q, *et al.* Changes of starch, reducing sugar and lipids in grape shoots, and their relationships to cold resistance[J]. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry*, 1994, **15**(4): 1-7.
- [20] 姚 远, 闵 义, 胡新文, 等. 低温胁迫对木薯幼苗叶片转化酶及可溶性糖含量的影响[J]. 热带作物学报, 2010, **31**(4): 556-560.
- YAO Y, MIN Y, HU X W, *et al.* Effects of low temperature stress on the activity of invertase and soluble sugar content in leaves of cassava seedlings[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, **31**(4): 556-560.
- [21] 武欣怡, 陈顺钰, 朱晨璐, 等. 酸胁迫对马尾松种子萌发不同时期体内渗透调节物质和酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, **50**(19): 156-163.
- WU X Y, CHEN S Y, ZHU C L, *et al.* Effects of acid stress on osmotic adjustment substances and enzyme activities in *Pinus massoniana* seeds at different stages of germination[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, **50**(19): 156-163.
- [22] 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): 1 935-1 944.
- 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): 1 935-1 944.
- [23] PROEBSTING E L, MILLS H H. Low temperature resistance of developing flower buds of six deciduous fruit Species1[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1978, **103**(2): 192-198.
- [24] AHMET; ŞAN A. The late spring frost hardness of some apple varieties at various stages of flower buds[J]. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 2005, **11**(3): 1.
- [25] TÓTH M, FICZEK G, KIRÁLY I, *et al.* Artemisz, Cordelia, Hesztia, and Rosmerta: New Hungarian multiresistant apple cultivars[J]. *HortScience*, 2012, **47**(12): 1 795-1 800.
- [26] 孙 艳, 韩 斌, 袁军伟, 等. 不同抗寒性葡萄品种根系形态结构及生理性状差异分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, **23**(4): 47-57.
- SUN Y, HAN B, YUAN J W, *et al.* Difference analysis of morphology, structure and physiological characteristics in roots of grapevines with different cold resistance[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, **23**(4): 47-57.
- [27] KOSE C, KAYA O. Differential thermal analysis reveals the sensitivity of sweet cherry flower organs to low temperatures[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2022, **66**(5): 987-994.
- [28] 刘兴禄, 王红平, 孙文泰, 等. 5个砧木苹果枝条的抗寒性评价[J]. 果树学报, 2021, **38**(8): 1 264-1 274.
- LIU X L, WANG H P, SUN W T, *et al.* Cold resistance evaluation of the shoots of 5 apple rootstocks[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, **38**(8): 1 264-1 274.
- [29] 杨 豫, 张晓煜, 陈仁伟, 等. 贺兰山东麓4个酿酒葡萄品种枝条抗寒性鉴定[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(3): 183-189.
- YANG Y, ZHANG X Y, CHEN R W, *et al.* Evaluation on cold resistance of four wine grape varieties at the eastern foothills of Helan Mountain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(3): 183-189.
- [30] 王海梅, 侯 琼, 云文丽, 等. 内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度[J]. 生态学报, 2014, **34**(11): 2 948-2 953.
- WANG H M, HOU Q, YUN W L, *et al.* Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(11): 2 948-2 953.
- [31] 李呈呈, 吴其超, 马 燕, 等. 6个彩叶桂品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(4): 828-836.
- LI C C, WU Q C, MA Y, *et al.* Physiological responses and evaluation of cold resistance of six *Osmanthus fragrans* cultivars under low temperature stress[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2021, **38**(4): 828-836.
- [32] YAN X, YANG S M, MA Y T, *et al.* Screening and research on *Cyathula officinalis* in cold hardy physiological characteristics[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, **39**(5): 962-966.
- [33] 曹建东, 陈伯鸿, 王利军, 等. 葡萄抗寒性生理指标筛选及其评价[J]. 西北植物学报, 2010, **30**(11): 2 232-2 239.
- CAO J D, CHEN B H, WANG L J, *et al.* Cold resistance indexes identification and comprehensive evaluation of grape varieties[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, **30**(11): 2 232-2 239.