



引用格式: 梁小娟, 张晓煜, 杨永娥, 等. 宁夏‘赤霞珠’葡萄不同发育期晚霜冻害阈值试验研究[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 0460-0469.
[LIANG X J, ZHANG X Y, YANG Y E, et al. Study on the threshold of late frost damage of ‘Cabernet Sauvignon’ grape at different developmental stages in Ningxia [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44 (3): 0460-0469.] DOI: 10. 7606/j. issn. 1000-4025. 20230624

宁夏‘赤霞珠’葡萄不同发育期 晚霜冻害阈值试验研究

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

(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 【目的】葡萄霜冻温度阈值是葡萄霜冻监测、预测、评估与防御的基础。对贺兰山东麓主栽酿酒葡萄‘赤霞珠’不同发育期低温忍耐力进行研究分析, 建立葡萄霜冻温度阈值体系, 旨在为贺兰山东麓地区酿酒葡萄霜冻预测、防御提供理论依据。【方法】于 2022 年 4—5 月采用野外霜冻试验箱原位试验方法对贺兰山东麓主栽酿酒葡萄品种‘赤霞珠’不同发育期绒球、芽、新叶、新梢进行低温处理, 测定其过冷点、相对电导率(R_{EC})及半致死温度(L_{T50}), 同时对低温胁迫后的受冻指数进行田间跟踪调查, 利用受冻率与低温建立关系模型, 计算不同发育期轻、中、重度受冻温度阈值。对不同发育期过冷点、半致死温度(L_{T50})及霜冻指标温度阈值进行综合分析, 确定不同发育期霜冻温度阈值。【结果】不同低温对‘赤霞珠’绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期的影响程度不同, 温度越低, 各发育期的受冻率越大; 随发育进程推进, ‘赤霞珠’过冷点温度、半致死温度逐渐升高; 绒球期的低温耐受性最强, 芽开放期、展叶期次之, 新梢生长期最弱。【结论】—7.70℃是绒球期重度受冻的起始温度; 芽开放期遭受重度霜冻的临界温度为—4.49℃; 展叶期在—2.79℃即遭受不可逆伤害; 新梢生长期出现—1.62℃以下的低温会造成严重的霜冻。

关键词 ‘赤霞珠’葡萄; 萌芽期; 霜冻温度阈值; 过冷点; 半致死温度; 原位试验; 野外霜冻试验箱

中图分类号 Q945; S663.1 文献标志码 A

Study on the threshold of late frost damage of ‘Cabernet Sauvignon’ grape at different developmental stages in Ningxia

LIANG Xiaojuan^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2,3*}, YANG Yong'e^{1,2},
MA Mengyao^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}

(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 [Objective] Frost temperature thresholds of grape are the basis for frost monitoring, prediction, assessment, and prevention. The study investigated the low-temperature tolerance of the main wine grape ‘Cabernet Sauvignon’ at different development stages in the eastern foothills of the Helan Mountain, and

收稿日期: 2023-10-09; 修改稿收到日期: 2023-12-05

基金项目: 中央引导地方科技发展专项项目(2022FRD05010); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02014, NXNYYZ202101-02)

作者简介: 梁小娟(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事果树生理生态与高效栽培研究。E-mail: L811284018@163.com

* 通信作者: 张晓煜, 博士, 研究员, 主要从事葡萄气象与灾害风险管理研究。E-mail: zhang_xynet@163.com

further established a system of frost temperature thresholds for wine grapes. The study aimed to provide the basis for frost prediction and prevention of wine grapes in the eastern foothills of the Helan Mountain. [Methods] We used a field frost chamber to treat the pompom, bud, new leaves, and new shoots of the main wine grape variety ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages under low temperature in the eastern foothills of the Helan Mountain during the period of April to May 2022. The supercooling point, relative electrical conductivity (R_{EC}), and semi-lethal temperature (L_{T50}) were measured. Field survey on frozen ratio under low temperature treatment was carried out. A regression model based on the correlation between frozen ratio and low temperature was set up to calculate the critical temperatures for light, moderate, and severe frost at different development stages of the wine grape. The above mentioned indicators at the temperature of frost were analyzed to determine the frost temperature thresholds at different development stages of ‘Cabernet Sauvignon’. [Results] Low temperature had different effects on ‘Cabernet Sauvignon’ during the pompom, bud opening, leaf spreading, and new shoot growth stages. The lower the temperature, the higher the frost exposure rate in each development stage. The supercooling point and the semi-lethal temperature (L_{T50}) were gradually increased with the development of the wine grapes. Low temperature tolerance in the pompom stage was the strongest and followed in the bud opening and leaf spreading stages. The tolerance of new shoot growth stage was the weakest. [Conclusion] $-7.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ was the turning point for severe frost at the pompom stage, while the critical temperature of bud opening stage was $-4.49\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperature lower than $-2.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ at the leaf spreading stage caused irreversible damage to the wine grape. Furthermore, below $-1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the new shoot growth stage caused severe frost.

Key words ‘Cabernet Sauvignon’ grape; budding stage; frost temperature threshold; supercooling point; semi-lethal temperature; *in situ* test; field frost chamber

葡萄(*Vitis vinifera* L.)为葡萄科葡萄属植物,是世界上最古老的植物之一^[1]。随着中国酿酒葡萄产业的发展,宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄产区快速发展,已作为中国的明星产区纳入世界葡萄酒地图。作为酿酒葡萄的最佳产区之一^[2],晚霜冻是贺兰山东麓最主要的自然灾害,给酿酒葡萄生产造成巨大威胁^[3]。‘赤霞珠’(Cabernet Sauvignon)作为抗寒性较强的酿酒葡萄品种,本身具有一定抵抗低温的能力^[4],但是在早春突发性晚霜冻害时,其绒球、芽、新梢等组织器官仍会受到低温伤害,对其正常的生长发育和产量产生较大影响^[5]。因此,作者以‘赤霞珠’为试材,通过大田试验模拟低温霜冻过程,明析霜冻后葡萄不同分化程度器官的抗冻能力,解析葡萄霜冻温度阈值,对保障产业健康可持续发展具有重要意义。

抗寒性指标是判定植物低温耐受性的重要依据,在筛选植物抗寒性指标的相关研究中,已有学者做了大量的工作。唐丽等^[6]、孙凌霄等^[7]在研究菲油果和广玉兰抗寒特性时表明,电导率作为鉴定菲油果和广玉兰抗寒性指标时,其鉴定结果与田间表现基本一致。同时相对电导率结合 Logistic 方程推导半致死温度可以有效反映植物的最大抗寒能力^[8],也是衡量抗寒性的可靠指标。Linden^[9]通过

Logistic 方程确定了多种木本植物茎干的半致死温度。付晓伟等^[10]研究指出,低温处理下不同品种葡萄根系半致死温度与各生理生化指标密切相关,且低温半致死温度能够准确地反映葡萄根系的抗寒能力。此外,李晓龙等^[11]研究发现,过冷却点温度的高低可以作为衡量果树花朵抗寒能力大小的重要指标,而结冰点温度不能衡量花朵的抗寒能力。植物生理过程极其复杂,往往受到多种自然环境因素及自身条件的影响,单一的生理指标很难反映其抗寒能力的强弱^[12-13]。因此,利用相对电导率、过冷却点及半致死温度等指标对‘赤霞珠’葡萄不同发育期的抗寒性进行综合分析,以更加准确地划分其不同发育期的霜冻温度阈值,从而更好地掌握其生育期抗寒特点。目前,已有较多学者对酿酒葡萄枝条^[14-15]和根系^[16-18]开展霜冻试验研究,但基于原位试验的酿酒葡萄不同发育期霜冻温度阈值研究鲜见报道,不同发育期抗寒性的温度阈值体系尚未建立。作者拟通过大田原位试验和实验室离体试验,检测贺兰山东麓主栽酿酒葡萄品种‘赤霞珠’不同发育期组织器官的相对电导率、过冷却点及半致死温度变化规律,揭示其不同发育期抗寒性对低温的响应过程,通过受冻率与低温的关系模型,建立葡萄不同发育期霜冻温度阈值体系,旨在为贺兰山东麓酿酒葡

萄布局和霜冻监测、预测及防御提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试品种为欧亚种‘赤霞珠’葡萄(*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon),选自银川美贺庄园,树体树龄 8 年,均为嫁接苗(砧木品种 3309),南北行向种植,株行距 1.0 m×3.2 m。园区下层土壤

为淡灰钙土,上层为砾石土。露地厂字形栽培,产量水平为 5.28 t/hm²。试验采取单株小区取样,选择生长健壮的植株,枝条粗细均匀,无其他机械伤害,无病虫害。绒球期取绒球做试材,芽开放期取刚开放的芽做试材,展叶期取刚展开的嫩叶及茎秆做试材,新梢生长期取梢尖 10 cm 且去除花絮部分做试材,在每个发育期试材剪取带有 5~10 个绒球、芽、叶和新梢的枝条水培带回实验室待测,见图 1。



图 1 ‘赤霞珠’不同发育期形态学图片

Fig. 1 Morphological pictures of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

1.2 试验处理

野外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),对供试品种绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期的组织器官进行低温冷冻处理。考虑到每个发育期抗寒能力各异,以自然条件下(无霜冻无病虫害)的样本作为对照(CK),各发育期低温处理温度梯度见表 1,均为 3 次重复。低温处理时,首先 1 h 内降温至 4.0 ℃,再以 2.0 ℃/h 的速度降至预设处理温度后,保持 0.5 h,后以相同的幅度匀速升温,升至外界温度后取出枝条,用细绳固定到铁架上待其自然生长,后期持续观察生长状况,期间对温度变化进行实时监测。

表 1 ‘赤霞珠’不同发育期低温模拟降温曲线

Table 1 Low temperature simulation cooling curves of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

发育期 Developmental stage	温度 Temperature/℃	处理时间 Processing time/h
绒球期 Pomodromous stage	-4.0 -5.0 -6.0 -7.0	0.5
芽开放期 Bud opening stage	-1.0 -2.0 -3.0 -4.0	0.5
展叶期 Leaf spreading stage	-1.0 -1.5 -2.0 -3.0	0.5
新梢生长期 New shoot growth stage	-1.0 -1.5 -2.0 -3.0	0.5

室内试验采用人工霜冻试验箱(型号:SDX-20)对供试品种绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期的组织器官进行低温冷冻处理。以室温下的样本为对照(CK),温度梯度和降温速度与野外试验一致。处理时在枝条剪口处用保鲜膜包裹上润湿的脱脂棉,防止处理时枝条水分散失,试验结束后将枝条取出放置于室内待测。

1.3 指标测定与方法

1.3.1 霜冻症状分级及受冻指数

在低温处理 24 h 后,对不同发育期的组织器官进行霜冻调查并计算受冻率,根据霜冻调查结果进行受冻分级。受冻分级标准参考李在山等^[19]的方法并稍有调整,根据受冻情况将组织器官受冻分为 5 级,0 级为各发育期组织器官正常;Ⅰ级为轻度受冻(<20%);Ⅱ级为中度受冻(20%~50%);Ⅲ级为重度受冻(50%~80%);Ⅳ级为特重度受冻(≥80%),具体分级标准及受冻症状见表 2。调查后计算受冻指数。受冻率=调查受冻株数/总株数×100%;受冻指数=Σ(各等级受冻株数×受冻级数)/(最高级数×总株数)×100%。

表 2 ‘赤霞珠’不同发育期霜冻分级及受冻症状
Table 2 Frost classification and symptoms of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

级别 Grade	受冻表现部位及症状 Frozen performance areas and symptoms			
	绒球 Pomodromous	芽 Buds	叶 Leaves	新梢 New shoots
0	绒球正常 Pomodromous are normal	新芽正常 New buds are normal	叶片正常 Leaf blade is normal	新梢正常 New shoots are normal
I	绒球边缘出现小面积黑化 Small area of blackening at the edge of the pomodromous	新芽最外层轻微萎焉 Outermost layer of new buds slightly wilted	叶片轻微萎焉,略卷曲 Leaf blade slightly chlorotic, slightly curled	梢尖卷须卷曲, 叶片轻微萎焉 Tip shoot tendrils curled, leaves slightly wilted
II	绒球最外层萎焉脱水, 边缘黑化 Outermost layer of the pomodromous is shriveled and dehydrated, with blackened edges	新芽最外层萎焉 且边缘轻微黑化 The outermost layer of the new buds is shriveled and the edges are slightly blackened	叶片部分萎焉且卷曲 Leaf blade partially wilted and curled	梢尖卷曲、萎焉,部分 叶片萎焉且轻微水渍 Tip shoot curling, wilting, some leaves wilted and slightly waterlogged
III	绒球整体萎焉且水渍 Overall wilting and water damage of pomodromous	新芽整体严重萎焉 且边缘黑化 New buds are severely shriveled and blackened at the edges as a whole	叶片 90%以上萎焉, 卷曲,少量黑斑 Leaf blade more than 90% wilted, curled, a few black spots	梢尖严重萎焉,叶片萎焉、 水渍且轻微褐变 Heavy wilting of tip shoot, wilting, water damage and slight browning of leaves
IV	绒球严重萎焉, 溢出黑色汁液,甚至死亡 Heavy wilting of pomodromous, overflowing of black sap, or even death	新芽完全萎焉且水渍, 中心芽严重黑化 New buds are completely shriveled and waterlogged, and the central shoots are severely blackened	叶片完全萎焉,并带有黑斑 Leaf blade completely wilted with black spots	梢尖完全水渍且萎焉, 叶片萎焉褐变 Tip shoot completely waterlogged and wilted, leaves wilted and browned

1.3.2 过冷却点和结冰点

在供试葡萄品种各发育期选取生长健壮的枝条,水培带回实验室用人工霜冻试验箱对各样本进行低温冷冻处理。将待测枝条剪口处用保鲜膜包裹放入试验箱中,传感器分别固定于待测部位,每个发育期分别固定 20 个部位。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 ℃,再以 2.0 ℃/h 的速度降至-10.0 ℃后,以 4.0 ℃/h 升温至室温)后,以 10 s/次的扫描频率收集数据并自动绘制温度变化曲线,精度为±0.3 ℃。

1.3.3 相对电导率(R_{EC})和半致死温度(L_{T50})

采用浸泡法测定。将供试品种各发育期低温处理后的组织器官切碎,混合均匀,称取 0.5 g 放入 50 mL 具塞玻璃试管中,加 10 mL 去离子水摇匀,每个处理 3 次重复。在室温下浸提 24 h,多次摇晃试管,使其充分浸泡后,用 DDSJ-308F 型电导仪测其初电导率(R_1)。封口后于水浴锅中 100 ℃下保持 30 min,待组织全部失活,取出放于室内,自然冷却至室温,测定终电导率(R_2)。

相对电导率(R_{EC})= $R_1/R_2 \times 100\%$

半致死温度(L_{T50})计算参照 Logistic 回归方程:

$Y=K/(1+ae^{-bt})$

式中: Y 为电导率; t 为处理温度; K 为电导率的饱和容量; a 、 b 为方程系数,将方程进行线性化处理,

$\ln[(k-y)/y]=\ln a-bx$,令 $y'=\ln[(k-y)/y]$,则转化为细胞伤害率(y')与处理温度(x)的直线方程。

通过直线回归的方法求得 a 值和 b 值。拐点温度即为试验材料的半致死温度(L_{T50})^[20]。

$L_{T50}=-\ln(a/b)$

1.4 分析方法

用 Excel 2003 软件对数据进行基础整理,用 SPSS 25.0 软件统计分析,用 Origin 2019 制图,用 DPS 分析软件计算 Logistic 方程及半致死温度(L_{T50})。

2 结果与分析

2.1 ‘赤霞珠’不同发育期过冷却点与结冰点

不同发育期的过冷却点、结冰点及过冷却能力的方差分析结果如表 3 所示,随着发育进程推进,过冷却点和结冰点温度逐渐上升,绒球期过冷却点和结冰点最低,分别较其余 3 个发育期低 1.56、2.86、3.20 ℃和 0.75、1.84、1.88 ℃,展叶期和新梢生长期无显著性差异;绒球期过冷却能力与其他 3 个发育期差异性达 95%显著性水平。根据过冷却点和结冰点由低到高排序为:绒球期、芽开放期、展叶期、新梢生长期,表明由于不同发育阶段器官内部组织结构的差异,随着发育进程推移,器官抗冻能力减弱,且新梢生长期最弱。

表 3 ‘赤霞珠’不同发育期过冷却点、结冰点及过冷却能力

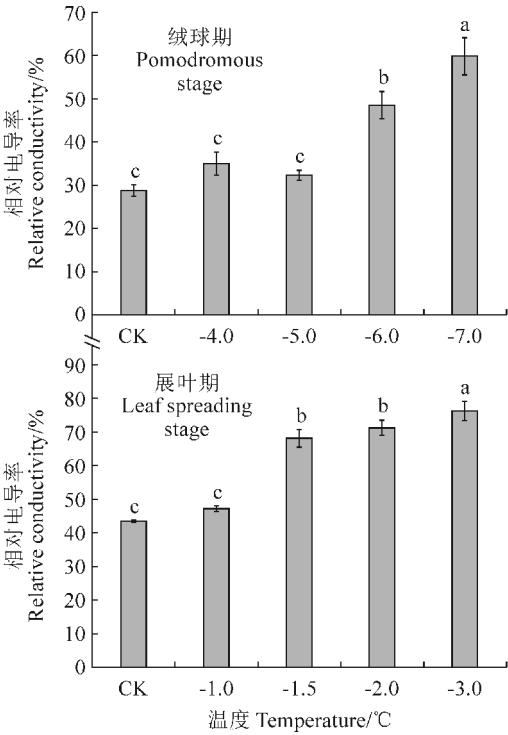
Table 3 Subcooling point, freezing point, and subcooling capacity of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

发育期 Developmental stage	温度 Temperature/℃		过冷却能力 Subcooling capacity
	过冷却点 Subcooling point	结冰点 Freezing point	
绒球期 Pomodromous stage	-6.43±0.23c	-3.95±0.35c	2.48±0.13a
芽开放期 Bud opening stage	-4.87±0.19b	-3.20±0.24b	1.67±0.19b
展叶期 Leaf spreading stage	-3.57±0.07a	-2.11±0.06a	1.46±0.07b
新梢生长期 New shoot growth stage	-3.23±0.03a	-2.07±0.09a	1.17±0.07b

注：表中同列数据后不同小写字母表示不同发育期各指标在 0.05 水平上显著差异。
Note: Different lowercase letters after the same column of data in the table indicate significant differences at the level of 0.05.

2.2 ‘赤霞珠’不同发育期低温处理后的相对电导率(R_{EC})和半致死温度(L_{T50})

低温胁迫下植物细胞膜结构受损,电解质外渗,



图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上显著差异。

图 2 低温胁迫下‘赤霞珠’不同发育期的相对电导率变化

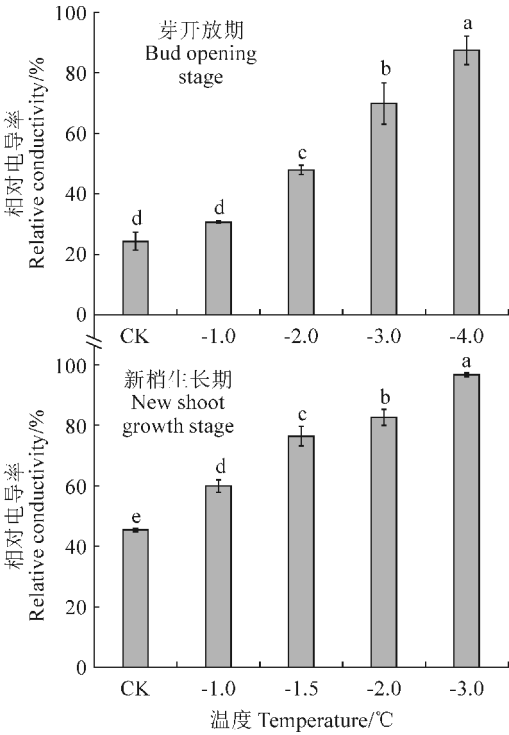
Different lowercase letters in the graphs indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

Fig. 2 Changes of relative conductivity of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages under low temperature stress

细胞膜内外的离子平衡被打破。由图 2 可见,不同发育期的相对电导率随温度下降总体呈现递增趋势。相对电导率变化近似“S”形曲线上升,上升速率因发育期而异。温度开始下降时相对电导率缓慢增大,随着温度的持续降低,相对电导率增速变快,之后相对电导率变化又趋于平缓,即呈现慢—快—慢的变化趋势。

研究结果表明,绒球期在低温处理前期相对电导率有一个先上升后下降的过程,这是植物在逆境下启动的自我保护功能,在-5.0℃以下相对电导率大幅上升,在-7.0℃时,相对电导率达到最大值(60%)。

芽开放期在-1.0℃处理后,相对电导率呈直线上升,-4.0℃时,相对电导率达到 87%,相比 CK 增加了 63%,未见“S”形拐点。展叶期在-1.5℃处理后相对电导率迅速上升,超过 50%,随后增速减缓。新梢生长期的相对电导率较其他 3 个发育期均较高,说明新梢生长期抗寒性最弱;随着处理温度的下降,新梢的相对电导率持续上升,-1.0℃时相对电导率即超过 50%,-3.0℃时,相对电导率高达 96%,细胞膜受到不可逆伤害,无法正常行使其功能。



半致死温度(L_{T50})可以反映植物抗寒性强弱,利用 Logistic 拟合方程求得不同发育期半致死温度,见表 4,不同发育期 Logistic 方程的 R^2 均大于 0.900 0,且达显著水平,说明经低温胁迫后,不同发育期的 R_{EC} 遵循 Logistic 方程的变化规律,精确度较高,拟合结果可靠。

结果表明,随着发育进程推进,半致死温度显著升高,以绒球期半致死温度最低,可抵御 $-7.71\text{ }^{\circ}\text{C}$

低温环境,芽开放期和展叶期居中,半致死温度分别为 $-2.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,新梢生长期最高, $-1.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时即达到半致死温度,抗寒力最弱。综合而言,绒球期抗寒力最强,半致死温度最低,其次是芽开放期和展叶期,新梢生长期半致死温度较高,且展叶期和新梢生长期相互间差异不明显。不同发育期抗寒性强弱根据 L_{T50} 排序为:绒球期>芽开放期>展叶期>新梢生长期。

表 4 低温处理下‘赤霞珠’不同发育期的 Logistic 方程及半致死温度

Table 4 Logistic equation and semi-lethal temperature of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages under low temperature treatments

发育期 Developmental stage	Logistic 方程 Logistic equation		$L_{T50}/^{\circ}\text{C}$
	方程 Equation	R^2	
绒球期 Pomodromous stage	$y=53.6835/(1+e^{9.3626+1.5532x})$	0.936 5	-7.71
芽开放期 Bud opening stage	$y=94.4359/(1+e^{3.5328+1.3788x})$	0.998 5	-2.65
展叶期 Leaf spreading stage	$y=54.0241/(1+e^{8.4951+6.5785x})$	0.977 3	-1.67
新梢生长期 New shoot growth stage	$y=97.9778/(1+e^{2.7021+1.8665x})$	0.976 0	-1.47

2.3 不同低温处理对‘赤霞珠’的影响

冻害指数能反映不同发育期组织器官在低温霜冻胁迫下的受害程度,冻害指数越高则器官受害程度越重。通过目测法判断供试品种不同发育期组织器官受冻状况并划分霜冻等级,计算受冻率和受冻指数。由表 5 可知,不同低温处理下,各发育期组织器官均发生不同程度冻害,4 个发育期组织器官的受冻率和受冻指数均表现为随温度降低,组织器官冻伤和萎焉程度增加,受冻率和受冻指数升高,说明温度与受冻率和受冻指数呈负相关关系,即各发育阶段的受冻率随着温度的升高而降低,低温胁迫越严重‘赤霞珠’的受冻率越高,受冻程度随之加重。

根据不同发育期受冻率与低温的相关关系建立霜冻预测模型(表 6),方程相关系数 R^2 均大于 0.95,拟合效果较好,可信度高。根据所得方程,再将受冻率 20%、50%、80%分别代入,求出各级霜冻温度阈值纳入表 6,并据此初步确定各级霜冻临界温度。可得,不同发育期对低温的抵抗力存在差异,绒球期较为抗冻,在 $-4.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轻度受冻,温度达到 $-7.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 遭受严重霜冻胁迫;芽开放期次之,在 $-1.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始受冻, $-4.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温可使其受冻程度不可逆;展叶期再次,在 $-1.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温时新叶受冻,重度受冻临界温度为 $-2.79\text{ }^{\circ}\text{C}$;新梢生长期对低温更为敏感,忍受能力最差, $-1.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就出现重度霜冻。霜冻温度阈值根据田间试验实况建立,不同发育期对低温的敏感性与产业园的实际栽培表现基本一致。

表 5 田间低温处理下‘赤霞珠’不同发育期组织器官的受冻率与受冻指数

Table 5 Frozen rate and frozen index of tissues and organs of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages under low temperature treatments

发育期 Developmental stage	处理温度 Processing temperature/ $^{\circ}\text{C}$	受冻率 Frozen rate/%	受冻指数 Frozen index/%
绒球期 Pomodromous stage	-4.0	16.7	6.7
	-5.0	41.7	21.7
	-6.0	62.5	35.0
	-7.0	76.9	52.3
芽开放期 Bud opening stage	-1.0	11.8	5.9
	-2.0	40.0	26.0
	-3.0	56.3	40.0
	-4.0	63.6	43.6
展叶期 Leaf spreading stage	-1.0	17.4	5.2
	-1.5	20.0	9.3
	-2.0	33.3	25.0
	-3.0	61.1	43.3
新梢生长期 New shoot growth stage	-1.0	14.3	5.7
	-1.5	72.7	29.1
	-2.0	81.0	52.4
	-3.0	100.0	68.0

表 6 ‘赤霞珠’不同发育期受冻率与低温的关系模型及霜冻温度阈值
Table 6 Relationship model between freezing rate and low temperature and frost temperature thresholds of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

发育期 Developmental stage	关系模型 Relationship model		轻度霜冻阈值 Light frost threshold /℃	中度霜冻阈值 Moderate frost threshold /℃	重度霜冻阈值 Heavy frost threshold /℃
	方程 Equation	R^2			
绒球期 Pomodromous stage	$y=82.7755/[1+\exp(6.3647+1.2628x)]$	0.997 8	-4.13	-5.37	-7.70
芽开放期 Bud opening stage	$y=63.4194/[1+\exp(3.2988+1.8858x)]$	0.996 6	-1.34	-2.45	-4.49
展叶期 Leaf spreading stage	$y=174652.1195/[1+\exp(10.5166+1.0151x)]$	0.974 6	-1.42	-2.32	-2.79
新梢生长期 New shoot growth stage	$y=91.9695/[1+\exp(7.2321+5.6307x)]$	0.961 5	-1.06	-1.32	-1.62

2.4 ‘赤霞珠’不同发育期霜冻指标的验证分析

过冷却点是植物能够存活的生理低温下限,是反映植物抗寒能力的重要生物学特性,过冷却点可以较为精确地确定植物的受冻温度临界范围,同时结合相对电导率及半致死温度可以有效地判断植物逆境伤害的温度阈值。80%受冻率是植物自然状态下受到不可逆伤害的临界值,因此将三者进行对比分析。表 7 是不同发育期过冷却点、半致死温度和 Logistic 关系模型计算的 80%霜冻温度阈值的对比分析结果。除绒球期外,芽开放期、展叶期和新梢生长期的过冷却点温度均低于半致死温度和重度霜冻阈值,半致死温度在 3 个指标中最高;而绒球期半致死温度与重度霜冻阈值相当,均低于过冷却点温度。绒球期半致死温度与重度霜冻阈值表现一致,过冷却点温度介于中度霜冻阈值和重度霜冻阈值之间;芽开放期半致死温度介于中度和重度霜冻阈值之间,过冷却点温度低于重度霜冻阈值;展叶期和新梢生长期过冷却点温度显著最低,展叶期半致死温度介于轻度和中度霜冻阈值之间,新梢的半致死温度介于中度霜冻阈值和重度霜冻阈值之间。

综合而言,随着发育进程的推进,过冷却点温度、半致死温度和重度霜冻阈值均呈上升趋势,在没有原位试验条件下,绒球期可用半致死温度作为重度霜冻阈值;芽开放期重度霜冻阈值可参考过冷却点温度;展叶期半致死温度接近轻度霜冻阈值;而新梢生长期半致死温度介于中度和重度霜冻阈值之间。

3 讨 论

相对电导率是衡量植物抗寒性的重要指标,与抗寒性密切相关^[21]。该试验葡萄各发育期器官在低温胁迫过程中,随着温度的持续下降,供试品种不同发育期组织器官的相对电导率逐渐升高,并呈“慢—快—慢”的“S”形曲线变化,这与王冠群等^[22]、杨永娥等^[23]和郭伟珍等^[24]分别在葡萄、苹果和梨等的研究结果和试验现象相一致。相对电导率结合 Logistic 曲线方程可准确获得植物的低温半致死温度^[25],半致死温度用于判断植物的耐寒性,已广泛应用于梨、苹果、马铃薯和桃等^[26-29]果树的耐寒性研究,并取得较好的结果。在实验室条件下,芽开放期和展叶期的 L_{T50} 分别为-2.65,-1.67℃,抗寒表现显著差于田间,可能与枝条离开株体后,得不到足够的营养和水分来抵御霜冻危害造成试验受冻温度过高有关,说明应用电导法可以判定不同发育期抗寒性的强弱,但低温半致死温度受试验取材和试验控制条件等方面制约,与品种田间实际可忍受的极限低温值存在一定的差异,与马小河等^[30]和王召元等^[31]在酿酒葡萄和桃树上的研究相似。绒球期相对电导率在(-4.0)~(-5.0)℃时有一个先升后降的过程,可能是因为质膜在低温初期通过物质交换以适应逆境的自我保护作用,从而调控细胞内电解质的外渗导致外渗电导率值变高或变低。

受冻指数可以反映作物的受冻程度,受冻指数

表 7 ‘赤霞珠’不同发育期过冷却点、半致死温度和霜冻温度阈值差异
Table 7 Differences in supercooling point, semi-lethal temperature, and frost temperature thresholds of ‘Cabernet Sauvignon’ at different developmental stages

发育期 Developmental stage	过冷却点 Supercooling point/℃	L_{T50} /℃	重度霜冻阈值 Heavy frost threshold/℃
绒球期 Pomodromous stage	-6.43	-7.71	-7.70
芽开放期 Bud opening stage	-4.87	-2.65	-4.49
展叶期 Leaf spreading stage	-3.57	-1.67	-2.79
新梢生长期 New shoot growth stage	-3.23	-1.47	-1.62

越大,作物受冻越严重。4—5 月正值葡萄芽膨大至展叶期,对低温最为敏感,更易遭受霜冻危害。试验结果表明供试品种各发育期受冻指数与温度呈负相关关系,随处理温度降低呈现不同幅度的上升趋势,与付全娟等^[32]研究甜樱桃花期子房冻害得出的结论基本一致。

葡萄抗寒越冬的研究在国内外较多,但多集中于根系^[10,20,33]、枝条^[15]等器官抗寒力和灾后调查^[34],系统地研究不同发育期晚霜冻害以及冻害阈值鲜见报道。杨文军等^[35]根据宁夏酿酒葡萄萌芽—新梢生长期的气候指标划分晚霜冻害等级为:轻霜冻, $-2^{\circ}\text{C} < T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$;中霜冻, $-4^{\circ}\text{C} < T_{\min} \leq -2^{\circ}\text{C}$;重霜冻, $T_{\min} \leq -4^{\circ}\text{C}$ 。结合试验研究结果,随着发育进程推进,‘赤霞珠’重度受冻温度阈值逐渐升高,抗寒力减弱,绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期重度受冻温度阈值分别为 -7.70°C 、 -4.49°C 、 -2.79°C 、 -1.62°C 。葡萄处于绒球期可忍耐 -1.90°C 的低温,绿尖期可忍耐 -0.70°C 低温,展叶期在气温低于 0°C 时就可能受冻^[36]。本研究也发现,‘赤霞珠’不同物候期抗寒能力不同,并表现为绒球期>芽开放期>展叶期>新梢生长期。有学者研究葡萄不同阶段芽和新梢的抗寒性也表明,未开放芽的抗冻能力相对较强,开放芽次之,新梢的抗冻能力最弱^[37]。

‘赤霞珠’自身具有一定的抗寒力,该研究结合田间表现和试验结果,表明贺兰山东麓地区‘赤霞珠’早春萌芽展叶时仍有大量霜冻危害现象的发生。因此,猜测造成贺兰山东麓‘赤霞珠’早春萌芽展叶发生冻害的原因与低温有关之外,还可能与低温持续的时间、低温强度和植株管理水平等因素密切相关。在各发育期田间试验处理后,后期调查发现,遭受不可逆伤害的组织器官后期会经历萎焉—脱水变干—脱落的变化过程,而枝干上会长出新的组织,这些未受冻或受冻较轻的组织发育较慢。这是因为葡萄自身具备受损后的恢复机能,受逆境刺激后会启动再生机制,使枝条基部或原来新梢着生的结果母枝上的次生芽萌发,长出新的组织。

该研究通过室内试验和大田原位试验 2 种方式对贺兰山东麓主栽酿酒葡萄品种‘赤霞珠’不同发育期霜冻温度阈值进行初步探讨,分析了酿酒葡萄受冻的临界温度,研究其霜冻阈值,确定不同等级霜冻指标,相比多数通过人工模拟霜冻箱离体试验研究作物的霜冻温度阈值,该研究较好地规避了枝条离开株体后导致营养和水分输送受阻而对作物的抗冻能力产生影响。试验结果以田间试验测定获得的霜冻指标更为准确,相对电导率、半致死温度和过冷却点具有客观性,在没有原位试验条件下可作为补充及验证方法,采用几种方法结合起来进行综合评定供试品种不同发育期的耐寒性,结果更可靠。研究工作还存在以下不足:一是供试材料虽为不同发育期,但每个发育期发育进程不同,例如展叶期包含绿尖期和幼叶出现期,每个时期对低温的耐受性不同,因此后续试验还需进一步细化供试材料发育期并展开分析研究,不断完善酿酒葡萄霜冻温度阈值,为早春晚霜冻灾害监测、防御提供科学依据;二是不同作物抗寒性各异,同一作物抗寒力会因品种差异而异,该试验以‘赤霞珠’为例进行抗寒分析并划分霜冻温度阈值,其结论针对同类型果树研究具有一定现实指导意义,其他果树的研究还需结合实际生产和品种特性等详尽分析。

4 结 论

该研究建立了贺兰山东麓主栽酿酒葡萄品种‘赤霞珠’绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期的霜冻温度阈值体系,结果表明:

- (1)随着发育进程推进,器官分化程度不同,‘赤霞珠’对霜冻的耐受能力越来越弱,抗寒能力表现为绒球期>芽开放期>展叶期>新梢生长期。
- (2)温度越低,霜冻对‘赤霞珠’不同发育期组织器官的影响程度就越大,受害越严重。
- (3)‘赤霞珠’绒球期、芽开放期、展叶期和新梢生长期重度受冻温度阈值分别为 -7.70°C 、 -4.49°C 、 -2.79°C 、 -1.62°C 。

参考文献:

[1] 任静,郝燕,白耀栋,等. 河西走廊‘贵人香’7 个葡萄砧穗组合抗寒性的综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 60-68.
REN J, HAO Y, BAI Y D, et al. Comprehensive evaluation

on cold resistance of seven grape rootstock-scion combinations of ‘Italian Riesling’ in Hexi Corridor[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 60-68.
[2] 杨洋,张磊,陈豫英,等. 贺兰山东麓酿酒葡萄种植区晚霜冻低温持续时间规律分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54

(6); 149-154.

YANG Y, ZHANG L, CHEN Y Y, *et al.* Low temperature duration pattern in late frost period in wine grape growing area in eastern Helan Mountain[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(6): 149-154.

[3] AUGSPURGER C K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing[J]. *Ecology*, 2013, 94(1): 41-50.

[4] 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.

[5] SUN L L, WEI S, GENG Q, *et al.* Comparison of cold hardiness in the leaves of various grape cultivars based on photochemical reflectance index[J]. *Vitis: Journal of Grapevine Research*, 2016, 55: 107-112.

[6] 唐丽, 张瑜, 袁德义. 菲油果抗寒指标主成分分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(21): 5172-5173.

TANG L, ZHANG Y, YUAND Y. Principal component analyses of cold-resistance indexes of *Feijoa sellowiana* Berg. [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(21): 5172-5173.

[7] 孙凌霄, 金晓玲, 胡希军, 等. 广玉兰新品种‘碧翠’的抗寒性评价及抗寒性指标筛选[J]. 湖南生态科学学报, 2020, 7(1): 33-39.

SUN L X, JIN X L, HU X J, *et al.* Evaluation of cold resistance of new variety ‘Bicui’ of *Magnolia grandiflora* and its screening of cold resistance index[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2020, 7(1): 33-39.

[8] 李刚, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 木兰科 6 种常绿树幼苗抗寒性的初步研究[J]. 园艺学报, 2007, 34(3): 783-786.

LI G, JIANG W B, WENG M L, *et al.* A preliminary study on cold resistance of six *Magnolia* species seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(3): 783-786.

[9] LINDEN L. Measuring cold hardiness in woody plants[M]. *Helsinki: University of Helsinki*, 2002: 1-57.

[10] 付晓伟, 张倩, 刘崇怀, 等. 评价葡萄根系抗寒性指标的确定[J]. 果树学报, 2014, 31(1): 52-59.

FU X W, ZHANG Q, LIU C H, *et al.* Index for the evaluation of grape root cold-resistance[J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(1): 52-59.

[11] 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.

[12] 田景花, 王红霞, 高仪, 等. 核桃属植物休眠期的抗寒性鉴定[J]. 园艺学报, 2013, 40(6): 1051-1060.

TIAN J H, WANG H X, GAO Y, *et al.* Assessment of freezing tolerance of *Juglans* germplasms by using annual dormant branches[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(6): 1051-1060.

[13] 刘杜玲, 张博勇, 孙红梅, 等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价[J]. 园艺学报, 2015, 34(3): 545-553.

LIU D L, ZHANG B Y, SUN H M, *et al.* Comprehensive evaluation on cold resistance of early fruiting walnut cultivars [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 34(3): 545-553.

[14] 张兆铭, 史星雲, 牟德生, 等. 8 个酿酒葡萄品种抗寒性比较[J]. 北方园艺, 2015(7): 33-35.

ZHANG Z M, SHI X Y, MU D S, *et al.* Comparison and analysis on the cold resistance of 8 wine grape cultivars[J]. *Northern Horticulture*, 2015(7): 33-35.

[15] 施明, 谢军, 徐美隆, 等. 贺兰山东麓 8 个酿酒葡萄品种抗寒性比较[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 137-140.

SHI M, XIE J, XU M L, *et al.* Comparison of cold resistance of eight wine grape varieties at the eastern foot of Helan Mountain[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(5): 137-140.

[16] 陈仁伟, 张晓煜, 丁琦, 等. 基于差热分析技术的 4 个酿酒葡萄品种不同部位抗寒性综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(7): 1022-1032.

CHEN R W, ZHANG X Y, DING Q, *et al.* Comprehensive evaluation of cold resistance in different parts of four wine grape varieties based on different thermal analysis[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7): 1022-1032.

[17] GU S L. Lethal temperature coefficient: A new parameter for interpretation of cold hardiness[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1999, 74(1): 53-59.

[18] 孙艳, 李敏敏, 韩斌, 等. 6 个葡萄品种根系抗寒性鉴定及综合评价[J]. 北方园艺, 2021(17): 30-37.

SUN Y, LI M M, HAN B, *et al.* Identification and comprehensive evaluation on root cold resistance of six grape varieties[J]. *Northern Horticulture*, 2021(17): 30-37.

[19] 李在山, 王佳军, 高洪岐, 等. 果树冻害调查与判定标准[J]. 北方果树, 2012(1): 29-30.

LI Z S, WANG J J, GAO H Q, *et al.* Investigation and judgment standard of freezing injury of fruit trees[J]. *Northern Fruits*, 2012(1): 29-30.

[20] 杨豫, 张晓煜, 陈仁伟, 等. 不同品种酿酒葡萄根系抗寒性鉴定[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 558-565.

YANG Y, ZHANG X Y, CHEN R W, *et al.* Comparing the cold resistance of roots of different wine grape varieties[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(4): 558-565.

[21] 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.

[22] 王冠群, 李丹青, 张佳平, 等. 德国鸢尾 6 个品种的耐寒性比较[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 773-780.

WANG G Q, LI D Q, ZHANG J P, *et al.* Comparison of

cold tolerance within 6 cultivars of iris germanica[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4): 773-780.

[23] 杨永娥, 张晓煜, 梁小娟, 等. 苹果花期至幼果期花朵和果实对低温的敏感性研究[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(10): 1694-1703.

YANG Y E, ZHANG X Y, LIANG X J, *et al.* Studies on the sensitivity of apple flowers and fruits to low temperatures from flowering to young fruiting stage[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(10): 1694-1703.

[24] 郭伟珍, 赵京献, 李莹, 等. 以电导法评价 10 个梨品种(系)的抗寒性[J]. *落叶果树*, 2020, 52(6): 18-22.

GUO W Z, ZHAO J X, LI Y, *et al.* Evaluation of cold resistance of ten pear cultivars by conductivity method[J]. *Deciduous Fruits*, 2020, 52(6): 18-22.

[25] CARADONNA P J, BAIN J A. Frost sensitivity of leaves and flowers of subalpine plants is related to tissue type and phenology[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 55-64.

[26] 王玮, 李红旭, 赵明新, 等. 7 个梨品种的低温半致死温度及耐寒性评价[J]. *果树学报*, 2015, 32(5): 860-865.

WANG W, LI H X, ZHAO M X, *et al.* Study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for seven pear cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(5): 860-865.

[27] 刘修丽, 刘成, 周晏起, 等. 42 个苹果属种质资源抗寒性初步鉴定[J]. *北方果树*, 2018(4): 11-14.

LIU X L, LIU C, ZHOU Y Q, *et al.* Preliminary identification of cold resistance in forty-two of *Malus* germplasm[J]. *Northern Fruits*, 2018(4): 11-14.

[28] FRANCKO D A, WILSON K G, LI Q Q, *et al.* A topical spray to enhance plant resistance to cold injury and mortality[J]. *HortTechnology*, 2011, 21(1): 109-118.

[29] 王小丽, 方伟超, 刘云鹤, 等. 58 份桃种质资源抗寒性评价[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(6): 138-144.

WANG X L, FANG W C, LIU Y H, *et al.* Assessment of the cold resistance of fifty-eight peach accessions[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 138-144.

[30] 马小河, 唐晓萍, 董志刚, 等. 6 个酿酒葡萄品种抗寒性比较[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(1): 1-5.

MA X H, TANG X P, DONG Z G, *et al.* Comparison of cold resistance for 6 grapevine cultivars[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(1): 1-5.

[31] 王召元, 田启航, 常瑞丰, 等. 桃不同品种对低温胁迫的生理响应及评价[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(2): 66-77.

WANG Z Y, TIAN Q H, CHANG R F, *et al.* Physiological response and evaluation of different peach varieties under low temperature stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 66-77.

[32] 付全娟, 魏国芹, 孙杨, 等. 春季低温对甜樱桃柱头可授性和子房冻害的影响[J]. *中国果树*, 2016(3): 7-10.

FU Q J, WEI G Q, SUN Y, *et al.* Effects of low temperature in spring on stigma receptivity and ovary freezing injury of sweet cherry[J]. *China Fruits*, 2016(3): 7-10.

[33] ZHENG C L, HALALY T, ACHEAMPONG A K, *et al.* Absciscic acid (ABA) regulates grape bud dormancy, and dormancy release stimuli may act through modification of ABA metabolism[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(5): 1527-1542.

[34] 刘俊, 姚淑然, 于祎飞, 等. 石家庄地区鲜食葡萄冻害调查及补救措施[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2020(4): 29-32.

LIU J, YAO S R, YU Y F, *et al.* Investigation on table grape frost injury and remedy in Shijiazhuang region[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2020(4): 29-32.

[35] 杨文军, 李栋梁, 陈荣, 等. 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄晚霜冻灾害致灾危险性分析[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(5): 127-133.

YANG W J, LI D L, CHEN R, *et al.* Analysis on hazard risk of late frost for wine grape in the east foot area of Helan Mountain in Ningxia[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(5): 127-133.

[36] 张振文, 陈武. 终霜冻对新疆北疆地区酿酒葡萄冻害和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(9): 123-128.

ZHANG Z W, CHEN W. Influence of late frost damage on wine grape and yield in northern Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(9): 123-128.

[37] 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.