

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200151

陈仁伟, 张晓煜, 丁琦, 杨豫, 南学军, 胡宏远, 冯蕊, 李芳红, 张亚红. 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(中英文), 2020, 28(7): 1022–1032

CHEN R W, ZHANG X Y, DING Q, YANG Y, NAN X J, HU H Y, FENG R, LI F H, ZHANG Y H. 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

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*

陈仁伟^{1,2}, 张晓煜^{1,2,3**}, 丁琦⁴, 杨豫^{1,2}, 南学军^{2,3},
胡宏远^{2,3}, 冯蕊^{1,2}, 李芳红^{1,2}, 张亚红¹

(1. 宁夏大学农学院 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; 4. 南京信息工程大学 南京 210044)

摘要: 越冬冻害是中国北方地区的主要气象灾害之一, 严重影响着西北内陆埋土防寒区酿酒葡萄产业的可持续发展。葡萄不同部位抗寒能力具有差异, 主要受品种遗传性状差异及各部位特性影响。本文基于差热分析技术对不同品种酿酒葡萄不同部位抗寒性进行测定, 为葡萄越冬冻害的防御工作提供理论依据。本研究以贺兰山东麓主栽的4种酿酒葡萄‘赤霞珠’‘美乐’‘西拉’和‘北玫’的主根、副根和枝条为试材, 在模拟自然降温冷冻过程中测定其过冷却点、结冰点、相对电导率和枝条含水率, 并应用模糊隶属函数法综合评价4个品种酿酒葡萄根系的抗寒能力。研究结果表明: 1) 不同品种间的抗寒能力有显著差异, 且不同品种根系、枝条抗寒能力趋势表现较为一致, 4个品种抗寒能力大小顺序为: ‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’。2) 半致死温度与根系过冷却点呈显著性相关, 结合半致死温度确定供试品种根系的过冷却点温度范围为-5.2~-2.7℃, 可作为4个酿酒葡萄品种根系越冬冻害的温度参考指标。供试品种各部位中枝条抗寒能力最强, 主根次之, 副根最弱, 且主根抗寒能力显著大于副根。研究结果对于酿酒葡萄越冬冻害监测、预警和防御能力具有重要意义, 也为酿酒葡萄抗寒性育种、优良品种的推广应用提供理论参考。

关键词: 酿酒葡萄; 抗寒性综合评价; 过冷却点; 半致死温度; 根系; 差热分析

中图分类号: S663.1

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Comprehensive evaluation of cold resistance in different parts of four wine grape varieties based on different thermal analysis*

CHEN Renwei^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2,3**}, DING Qi⁴, YANG Yu^{1,2}, NAN Xuejun^{2,3},
HU Hongyuan^{2,3}, FENG Rui^{1,2}, LI Fanghong^{1,2}, ZHANG Yahong¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring, Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750002, China; 4. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

* 国家自然科学基金项目(41675114)和气象行业标准《酿酒葡萄越冬冻害气象等级》资助

** 通信作者: 张晓煜, 主要从事酿酒葡萄气象研究。E-mail: zhang_xyne@163.com

陈仁伟, 主要从事果树生理生态及防灾减灾研究。E-mail: c958512504@163.com

收稿日期: 2020-03-02 接受日期: 2020-05-14

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41675114) and the Meteorological Grade for Overwinter Freezing Injury of Wine Grape.

** Corresponding author, E-mail: zhang_xyne@163.com

Received Mar. 2, 2020; accepted May 14, 2020

Abstract: Freezing injury is one of the main meteorological disasters for grapes in northern China, and it seriously affects the growth and quality of wine grapes, which are soil-buried for winter protection in the northwest inland zones, and restricts the sustainable development of grapevine and the wine industry. The cold resistance of different parts of wine grape varies with the genetic characters of the grape varieties. In this paper, the cold resistance capacity of different parts of wine grape were measured using different thermal analysis (DTA) technologies to provide a theoretical basis for the prevention and mitigation of the winter freezing injury of grape. The physiological response indexes (supercooling point, freezing point, relative conductivity, and water content of branches) of four common varieties of wine grapes, namely, ‘Cabernet Sauvignon’ ‘Merlot’ ‘Syrah,’ and ‘Beimei’, were measured by simulating the natural freezing schedule. Based on the fuzzy subordination function, the cold resistance capabilities of four wine grape varieties roots were comprehensively evaluated. The results showed that: 1) there were significant differences in cold resistance among different varieties, but the trend cold resistance of root and branch of the four varieties were identical. The order of cold resistance of the four varieties was: ‘Beimei’ > ‘Cabernet Sauvignon’ > ‘Merlot’ > ‘Syrah’. 2) There was a significant correlation between the semi-lethal temperature and the supercooling point of the root system. Combined with the semi-lethal temperature, the temperature range of the supercooling points of the tested varieties roots was $-5.2 \sim -2.7$ °C, which could be used as the temperature reference index of the root system of four wine grape varieties. In all parts of the tested varieties, the cold resistance of branch was the strongest, the taproot was the second, the secondary root was the weakest, and the cold resistance capacity of the taproots was significantly better than that of the accessory roots. The results of this study are of significance to the monitoring, early warning, and improving the ability of wine grapes to resist overwintering freezing damage and provide a theoretical basis for the breeding of cold resistance ability in wine grape and the popularization and application of excellent varieties.

Keywords: Wine grape; Comprehensive evaluation of cold resistance; Supercooling point; Semi-lethal temperature (LT_{50}); Root; Different thermal analysis

中国北方地区受季风气候、大陆性气候和高寒气候影响, 冬季寒冷干燥, 低温持续时间长, 昼夜温差大, 葡萄(*Vitis vinifera* L.)越冬冻害时有发生, 尤其是处于西北内陆的贺兰山东麓产区、河西走廊产区和新疆产区等地区越冬冻害频繁发生, 这一带酿酒葡萄的产量长期低而不稳, 葡萄植株缺苗、断行现象大面积出现^[1-5], 严重影响着酿酒葡萄的生长、发育、产量和品质形成, 成为提高酿酒葡萄产量和品质的主要障碍性因素, 极大地限制了酿酒葡萄产业的可持续发展。

葡萄越冬冻害的发生, 主要受品种抗寒性和外界低温强度与持续时间共同决定, 在外界温度条件一定的情况下, 越冬冻害的发生取决于葡萄品种的抗寒性。关于酿酒葡萄抗寒性已有诸多报道, 研究表明葡萄枝条抗寒性最强, 芽次之, 而根系最弱^[6]。马小河等^[7]、张文娥等^[8]研究表明, 不同品种葡萄的枝条抗寒性差异较大, 并利用平均隶属函数法评价葡萄抗寒性, 为鉴定葡萄新种质提供了依据。鲁金星等^[9]对 6 个砧木及酿酒葡萄品种的一年生枝条进行试验表明, 不同品种对低温响应速度不同。赵滢等^[10]利用可视化的 2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法结合生理生化及半致死温度对 40 份山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr.)一年生枝条进行可视化评估, 结果表明 TTC 染色图像法可视化结合抗逆指标可以有效、可靠地鉴定山葡萄种质抗寒性。陈佰鸿等^[11]通过研究葡萄一年生枝条在不同低温胁迫下水分指

标含量的变化, 发现束缚水与自由水含水量变化对酿酒葡萄抗寒性的鉴定具有可行性。范宗民等^[12]通过对不同砧木的‘赤霞珠’葡萄枝条进行抗寒生理指标测定, 应用主成分分析, 最终确定 6 种不同砧木嫁接后‘赤霞珠’枝条抗寒性强弱。郭修武等^[13]、付晓伟等^[14]和袁军伟等^[15]对不同酿酒葡萄品种根系抗寒性进行分析评价, 发现半致死温度、丙二醛含量和根系解剖结构可以作为评价葡萄抗寒性的重要指标并对供试品种抗寒能力进行划分。高振等^[16]应用低温放热法判断酿酒葡萄芽及根系的抗寒性表现不同, 并确定各品种抗寒性强弱。杨豫等^[17]应用差热分析对我国北方 8 个酿酒葡萄品种根系进行聚类分析, 综合评价 8 个酿酒葡萄品种根系抗寒能力并据此划分其根系抗寒等级。目前, 对酿酒葡萄抗寒性的研究主要集中在枝条和根系上, 而有关酿酒葡萄主根和副根抗寒性能力和方法的研究还比较薄弱。

差热分析(different thermal analysis, DTA)在国内主要应用于确定果树或昆虫遭受冻害过程中的临界温度范围^[18-19], 是基于植物细胞的“过冷却现象”观察植物对低温的响应。该技术的原理为: 细胞液在低温下结成冰晶时, 水相态间的变化释放出热量, 经由 DTA 系统记录模拟低温冻害过程中的细胞放热现象。该技术在植物抗寒性研究中已应用于仁用杏(*Prunus armeniaca* L.)花器官^[20]、核桃(*Juglans regia* L.)枝条^[21], 玉米(*Zea mays* L.)与向日葵(*Helianthus annuus* L.)^[22]和早春开花植物^[23]中, 较为精确地确定了植物的受冻临

界范围, 结合相对电导率及半致死温度有效地判断植物逆境伤害的指标^[24]。

本试验以贺兰山东麓产区主栽的 4 个酿酒葡萄品种为材料, 通过人工霜冻试验箱(DTA 系统)和高低温交变箱模拟低温环境, 对酿酒葡萄根系和枝条进行低温冻害试验, 通过检测酿酒葡萄根系的过冷却点和结冰点, 结合半致死温度分析供试品种对低温过程的抗逆能力, 明确供试品种主根、副根和枝条遭受冻害的临界温度范围, 对贺兰山东麓产区主栽的 4 个酿酒葡萄品种抗寒性进行分析评价, 为葡萄品种区域化布局和越冬冻害防御提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为欧亚种‘赤霞珠’(Cabernet Sauvignon)、“美乐”(Merlot)、“西拉”(Syrah)和欧山杂种‘北玫’(Beimei)等 4 个酿酒葡萄品种的根系及枝条, 取样点见表 1。采样树体树龄 5~7 a, 均为实生苗, 南北行向种植, 行距 3.0 m, 露地厂字型栽培, 植株健壮, 无病虫害, 产量水平为 4.5 t·hm⁻²。供试材料采收修剪后, 枝条下架埋土前取样。试验采取单株小区取样, 每个品种设置 3 次重复。

根系于 2018 年 11 月 1—3 日, 取生长良好的当年生酿酒葡萄 30~40 cm 土层内、直径为 8~10 mm 的主根及主根中下段新生的直径为 2~3 mm 的一年生副根, 去离子水漂洗干净, 吸干水分后, 于样本袋内密封待测。

枝条于 2019 年 10 月 16—18 日, 取生长情况良好的一年生枝条, 保鲜膜封两端后, 置于样品袋中于 4 °C 下存放待测。

表 1 供试酿酒葡萄品种及来源

Table 1 Varieties and sources of the tested wine grape

品种 Variety	来源 Source
北玫 Beimei	银川市永宁县玉泉营乡西夏王葡萄基地 Chateau Xixia King, Yuquanying Township, Yongning County, Yinchuan City
美乐 Merlot	银川市西夏区美贺庄园 Chateau Mihope, Xixia District, Yinchuan City
赤霞珠、西拉 Cabernet Sauvignon, Syrah	银川市贺兰县金山村观兰酒庄 Guanlan Vineyard, Jinshan Village, Helan County, Yinchuan City

1.2 研究方法

1.2.1 过冷却点和结冰点的测定

应用人工霜冻试验箱(型号: SDX-20), 将 T(K)-G 0.32 型热电偶温度传感器固定在各供试葡萄品种的主根、副根及枝条的表皮, FrosTem40 V2.0 数据采集系统与温度传感器连接, 每 10 s 扫描采集 1 次数据,

自动连续绘制降温曲线, 其精度为±0.3 °C。随温度下降, 降温曲线中会出现拐点, 拐点的起始点为过冷却点, 峰值为结冰点, 过冷却点和结冰点温度自动记录在降温曲线中, 保存在数据采集系统 Excel 文件中。主根、副根及枝条均随机取自 3 个试验小区不同植株的混合样品, 均取 10 个样本进行测定。

不同部位过冷却点和结冰点出现的频次为各温度范围内过冷却点和结冰点出现的次数所占总次数的百分比, 即: 频次=某一温度范围内出现的次数/总次数。过冷却能力为过冷却点与结冰点的温度差值, 即: 过冷却能力=过冷却点温度-结冰点温度。

设置温度曲线模拟自然降温过程, 主根和副根以 3.0 °C·h⁻¹ 的速度降温, 从室温降至-15.0 °C; 枝条以 3.0 °C·h⁻¹ 的速率从室温降至-25.0 °C。

1.2.2 相对电导率和含水量测定

用高低温交变试验箱(型号: BC1300)对供试材料进行低温冷冻处理。

将用去离子水冲洗干净的 4 个供试品种的一年生枝条, 每 2~3 节切段, 每个重复取 2~3 段。之后放入高低温变箱中进行低温处理, 以 4 °C 为对照, 设置-5 °C、-10 °C、-15 °C、-20 °C、-25 °C、-30 °C 6 个温度梯度处理, 以 5 °C·h⁻¹ 的速度降温, 降温到处理温度后持续 12 h, 以相同速率匀速升温至 4 °C 后取出于室温下放置 2 h。将枝条切成 3~5 mm 的薄片混匀后用 DDSJ-308F 型电导仪测定相对电导率, 重复 3 次。同时, 将枝条切成 3~5 mm 的薄片混匀后称取 1 g, 之后放入烘箱在 110 °C 下将枝条烘至恒重, 测定含水量。

以 4 °C 保存的主根和副根样本为对照, 主根和副根每个重复均取 2~3 根, 设置-2.0 °C、-4.0 °C、-6.0 °C、-8.0 °C、-10 °C 5 个低温梯度处理。以 2.0 °C·h⁻¹ 的幅度降温, 从 4.0 °C 降至处理温度后保持 8 h, 匀速升温至 4 °C 后取出于室温下放置 2 h。将冷冻后的根系剪成 3~4 mm 小段, 混合均匀测定用 DDSJ-308F 型电导仪相对电导率, 重复 3 次。

1.3 分析方法

统计分析采用 SPSS 22.0 软件, Logistics 方程及半致死率采用 DPS 计算, Origin 2018 制图。

1.4 数据处理

应用模糊隶属函数法对供试葡萄品种的抗寒性进行评价^[8], 其公式为:

$$SV_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (1)$$

式中: SV_{ij} 为 i 品种 j 指标的抗寒隶属函数值, X_{ij} 为 i 品种 j 指标的测定值, X_{jmin} 为种类 j 指标中的最小值, X_{jmax} 为种类 j 指标中的最大值。根据上述公式

先计算出各品种主根、副根、枝条的过冷却点、结冰点、过冷却能力和半致死温度等抗寒性隶属度, 然后取算术平均数作为该品种的平均隶属度, 最后进行排序。

2 结果与分析

2.1 不同酿酒葡萄品种主根、副根及枝条的过冷却点和结冰点

2.1.1 主根过冷却点和结冰点频次图

各葡萄品种主根的过冷却点和结冰点频次图如图1所示。各品种主根过冷却点和结冰点温度范围不同, 出现的频率也不尽相同。温度范围基本符合正态分布, 供试品种主根过冷却点范围为 $-5.2\sim-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 结冰点温度范围 $-4.0\sim-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中‘北玫’主根过冷却

点最低为 $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现频率最高的过冷却点温度范围为 $-5.0\sim-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的30%; ‘北玫’主根结冰点最低为 $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现频率最高的结冰点温度范围为 $-3.8\sim-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的60%。‘赤霞珠’主根出现频率最高的过冷却点温度范围为 $-3.7\sim-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的40%; ‘赤霞珠’主根出现频率最高的结冰点温度范围为 $-2.4\sim-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的40%。‘美乐’主根出现频率最高的过冷却点温度范围为 $-4.0\sim-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的60%; ‘美乐’主根出现频率最高的结冰点温度范围为 $-2.7\sim-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的30%。‘西拉’主根过冷却点最高为 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现频率最高的过冷却点温度范围为 $-3.1\sim-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的30%; ‘西拉’主根结冰点最高为 $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现频率最高的结冰点温度范围为 $-2.0\sim-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占总体的60%。

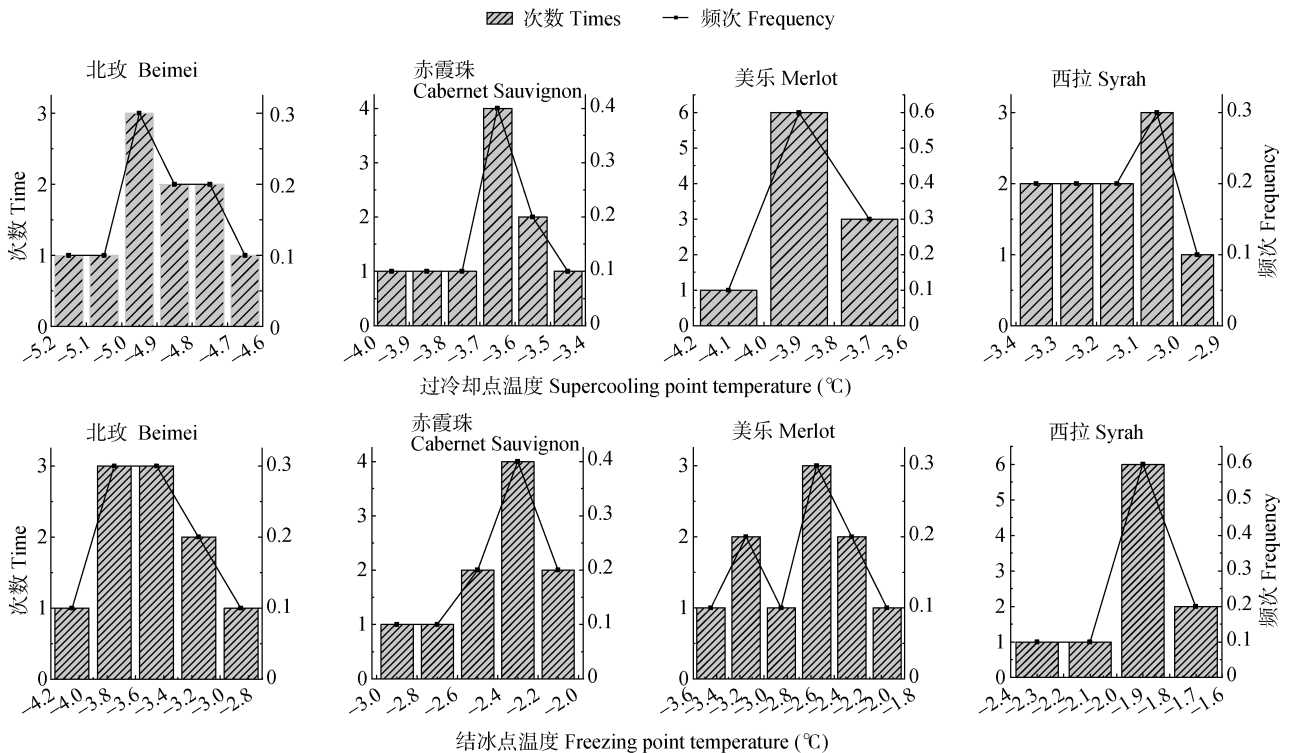


图1 不同酿酒葡萄品种主根的过冷却点及结冰点频次图

Fig. 1 Frequencies of supercooling point and freezing point of taproots of different wine grape varieties

‘北玫’主根的受冻临界范围为 $-5.0\sim-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明‘北玫’主根在温度高于 $-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小, 而低于 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受冻害。同时, ‘北玫’主根结冰点温度最低能抵御 $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境。‘赤霞珠’主根的受冻临界温度范围为 $-3.7\sim-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明‘赤霞珠’主根在温度高于 $-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小, 而低于 $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受冻害。‘美乐’主根的受冻临界温度范围为 $-2.7\sim-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明‘美乐’主根在温度高于 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小, 而低于 $-2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受冻害。‘西拉’主根的受冻临界温度范围为 $-3.1\sim-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,

表明‘西拉’主根在温度高于 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小, 而低于 $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受冻害。而‘西拉’主根结冰点温度范围最高, 在温度降至 $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 易产生主根结冰现象。

2.1.2 副根过冷却点和结冰点频次图

各供试葡萄品种副根的过冷却点和结冰点频次图如图2所示。各品种副根过冷却点和结冰点温度范围不同, 出现的频率也不尽相同。供试品种副根过冷却点范围为 $-4.5\sim-2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 结冰点温度范围 $-3.8\sim-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中‘北玫’副根过冷却点最低为

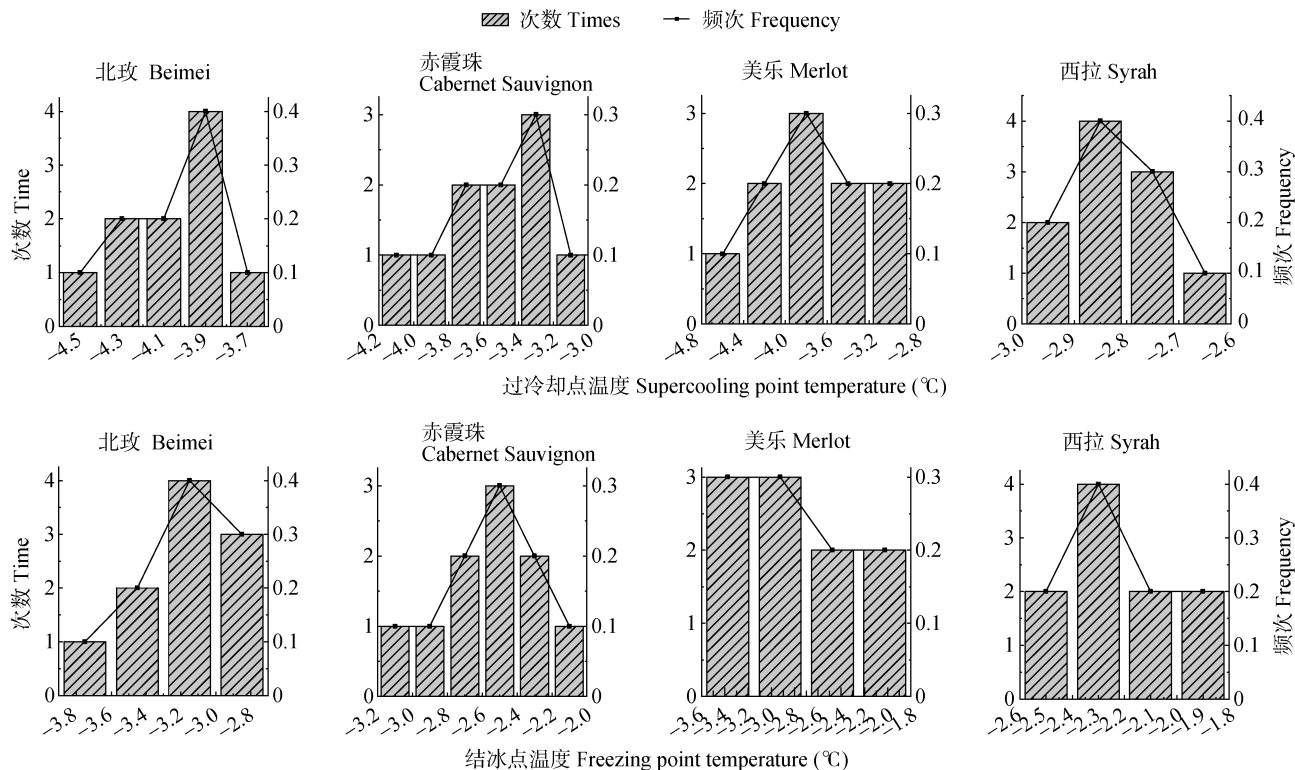


图 2 不同酿酒葡萄品种副根的过冷却点及结冰点频次图

Fig. 2 Frequencies of supercooling point and freezing point of accessory roots of different wine grape varieties

-4.5 °C, 出现频率最高的过冷却点温度范围为-4.0~-3.8 °C, 占总体的 40%; ‘北玫’副根结冰点最低为-3.8 °C, 出现频率最高的结冰点温度范围为-3.3~-3.0 °C, 占总体的 40%。‘赤霞珠’出现频率最高的过冷却点温度范围为-3.4~-3.2 °C, 占总体的 30%; ‘赤霞珠’副根出现频率最高的结冰点温度范围为-2.6~-2.4 °C, 占总体的 30%。‘美乐’出现频率最高的过冷却点温度范围为-4.0~-3.6 °C, 占总体的 30%; ‘美乐’副根出现频率最高的结冰点温度范围为-3.6~-3.2 °C和-3.1~-2.7 °C, 各占总体的 30%。‘西拉’出现频率最高的过冷却点温度范围为-2.95~-2.85 °C, 占总体的 40%; ‘西拉’副根结冰点最高为-1.9 °C, 出现频率最高的结冰点温度范围为-2.4~-2.2 °C, 占总体的 40%。

‘北玫’副根的受冻临界范围为-4.0~-3.8 °C, 表明‘北玫’副根在温度高于-3.8 °C时受冻几率较小, 而低于-4.0 °C时易受低温冻害。同时, ‘北玫’副根结冰点温度最低能抵御-4.6 °C的低温环境。‘赤霞珠’副根的受冻临界范围为-3.4~-3.2 °C, 表明‘赤霞珠’副根在温度高于-3.2 °C时受冻几率较小, 而低于-3.4 °C时易受低温冻害。‘西拉’副根的受冻临界温度范围为-2.95~-2.85 °C, 表明‘西拉’副根在温度高于-2.85 °C时受冻几率较小, 而低于-2.95 °C时易受

冻害。而‘美乐’和‘西拉’副根结冰点温度范围最高, 在温度降至-1.9 °C时, 可能产生副根结冰现象。

2.1.3 枝条过冷却点和结冰点频次图

各供试葡萄品种枝条的过冷却点和结冰点频次图如图 3 所示。各供试品种枝条过冷却点和结冰点温度范围不同, 出现的频率也不尽相同。温度范围基本符合正态分布, 供试品种枝条过冷却点范围为-12.0~-5.4 °C, 结冰点温度范围-11.0~-3.4 °C。其中‘北玫’枝条过冷却点最低为-12.0 °C, 出现频率最高的过冷却点温度范围为-9.5~-9.0 °C, 占总体的 70%; ‘北玫’枝条结冰点最低为-10.1 °C, 出现频率最高的结冰点温度范围为-8.0~-7.0 °C, 占总体的 30%。‘赤霞珠’出现频率最高的过冷却点温度范围为-9.0~-8.5 °C, 占总体的 30%; ‘赤霞珠’枝条出现频率最高的结冰点温度范围为-7.5~-7.0 °C, 占总体的 40%。‘美乐’枝条过冷却点最高为-5.4 °C, 出现频率最高的过冷却点温度范围为-8.0~-7.3 °C, 占总体的 40%; ‘美乐’枝条结冰点最高为-3.4 °C, 出现频率最高的结冰点温度范围为-6.5~-5.5 °C, 占总体的 30%。‘西拉’出现频率最高的过冷却点温度范围为-8.5~-8.0 °C, 占总体的 60%; ‘西拉’枝条出现频率最高的结冰点温度范围为-4.75~-4.00 °C, 占总体的 40%。

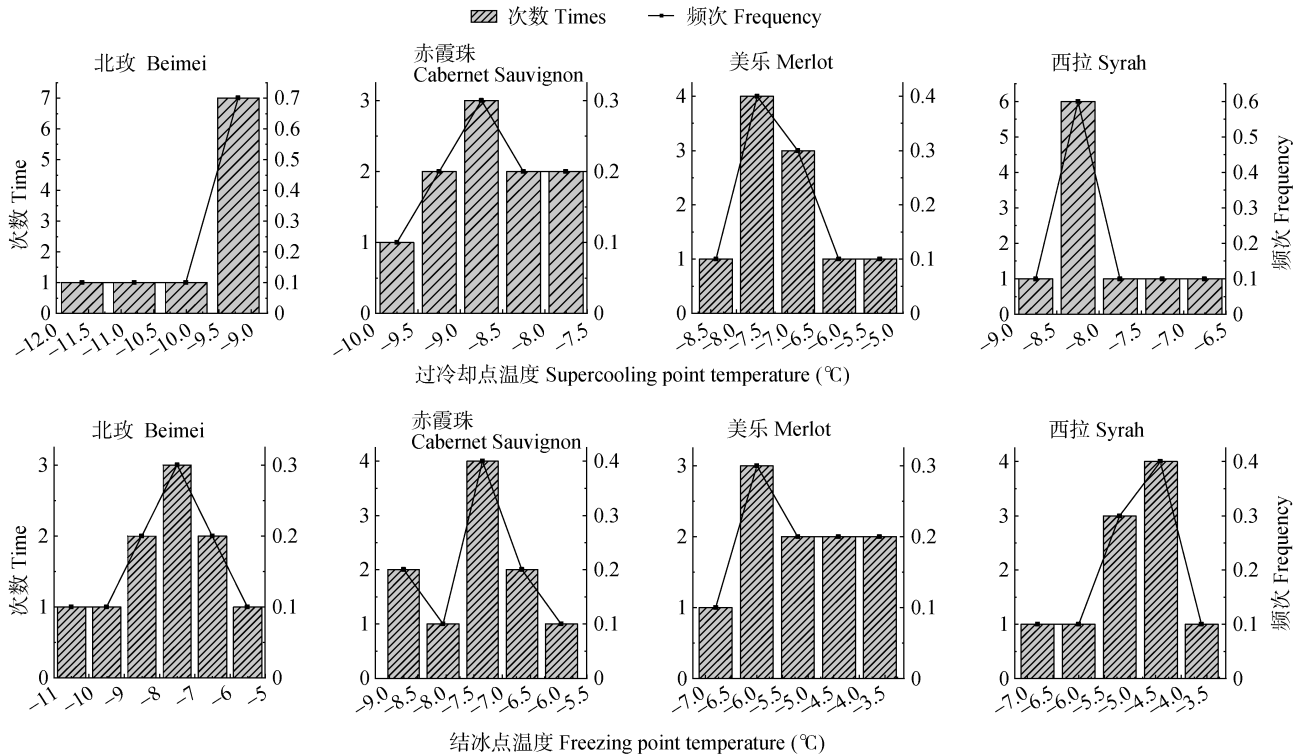


图 3 不同酿酒葡萄品种枝条的过冷却点及结冰点频次图

Fig. 3 Frequencies of supercooling point and freezing point of branches of different wine grape varieties

‘北玫’枝条的受冻临界范围为 $-9.5\sim-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表明‘北玫’枝条在温度高于 $-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小，而低于 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受低温冻害。同时，‘北玫’枝条结冰点温度最低能抵御 $-12.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境。‘赤霞珠’枝条的受冻临界范围为 $-9.0\sim-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表明‘赤霞珠’枝条在温度高于 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小，而低于 $-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受低温冻害。‘美乐’枝条的受冻临界温度范围为 $-8.00\sim-7.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表明‘美乐’副根在温度高于 $-7.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小，而低于 $-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受冻害；而‘美乐’枝条结冰点温度范围最高，在温度降至 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，可能产生枝条结冰现象。‘西拉’枝条的受冻临界范围为 $-8.5\sim-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表明‘西拉’枝条在温度高于 $-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受冻几率较小，而低于 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时易受低温冻害。

2.2 酿酒葡萄品种间和部位间过冷却点、结冰点和过冷却能力的差异

4 个酿酒葡萄品种不同部位过冷却点、结冰点和过冷却点方差分析如表 2 所示。由表 2 可知，‘北玫’主根过冷却点温度显著低于其他供试品种，为 $-4.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，‘美乐’和‘赤霞珠’主根过冷却点温度间没有显著性差异，‘西拉’主根过冷却点温度显著高于其他供试品种，为 $-3.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；主根结冰点温度各品种间均有显著性差异，结冰点温度从低到高排序为：‘北玫’<‘美乐’<‘赤霞珠’<‘西拉’；而主根过冷却能力间

没有显著差异。

‘北玫’副根过冷却点温度显著低于其他供试品种，为 $-4.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；‘美乐’和‘赤霞珠’副根过冷却点间没有显著性差异；‘西拉’副根过冷却点温度显著高于其他品种，为 $-2.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；‘北玫’副根结冰点温度显著低于‘西拉’和‘赤霞珠’，而其他供试品种间无显著性差异；‘西拉’副根过冷却能力显著低于‘美乐’和‘赤霞珠’，其他品种间无显著性差异。

不同酿酒葡萄品种间枝条过冷却点温度均有显著性差异，枝条过冷却点温度从低到高排序为：‘北玫’<‘赤霞珠’<‘西拉’<‘美乐’；‘北玫’和‘赤霞珠’与‘美乐’和‘西拉’枝条结冰点间均无显著性差异，且前两者显著性低于后两者；‘赤霞珠’枝条过冷却能力显著低于其他供试品种，为 1.20；‘西拉’枝条过冷却能力显著高于其他供试品种，为 3.02；‘北玫’和‘美乐’枝条过冷却能力居中，且二者间无显著性差异。

将不同酿酒葡萄品种不同部位过冷却点、结冰点、过冷却能力进行比较(表 2)，结果表明除‘美乐’外，其他供试品种不同部位间过冷却点温度均有显著性差异，而‘美乐’的枝条过冷却点显著高于主根和副根，且其主根和副根间无显著性差异。所有供试品种主根和副根的结冰点温度均无显著性差异，且枝条结冰点显著低于主根和副根结冰点。除‘美乐’外，所有供试品种的过冷却能力均有显著性差

表 2 不同酿酒葡萄品种同一部位及同一品种不同部位的过冷却点、结冰点和过冷却能力差异性分析

Table 2 Variance analysis of supercooling points, freezing points and supercooling capacities of the same part among different wine grape varieties and among different parts of the same variety

指标 Index	部位 Part	北玫 Beimei	美乐 Merlot	西拉 Syrah	赤霞珠 Cabernet Sauvignon
过冷却点温度 Supercooling point temperature (°C)	主根 Taproot	-4.94±0.15aB	-3.91±0.12bB	-3.21±0.14cB	-4.02±0.15bB
	副根 Accessory root	-4.12±0.27aC	-3.73±0.51bB	-2.87±0.01cC	-3.53±0.33bC
	枝条 Branch	-9.79±0.95aA	-7.03±0.99dA	-7.99±0.58cA	-8.71±0.65bA
结冰点温度 Freezing point temperature (°C)	主根 Taproot	-3.49±0.35aB	-2.76±0.46bB	-1.95±0.17dB	-2.45±0.27cB
	副根 Accessory root	-3.14±0.32aB	-2.78±0.51abB	-2.25±0.23bB	-2.62±0.28bB
	枝条 Branch	-7.77±1.37aA	-5.00±1.08bA	-4.97±0.78bA	-7.51±0.84aA
过冷却能力 Supercooling capacity	主根 Taproot	1.45±0.41aB	1.15±0.42aA	1.22±0.19aB	1.57±0.301aC
	副根 Accessory root	0.89±0.30abA	0.95±0.41bA	0.62±0.27aA	0.91±0.21bA
	枝条 Branch	2.02±0.83bC	2.03±0.60bB	3.02±0.81cC	1.20±0.42aB

同行不同小写字母表示不同品种同一部位各指标在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 同列不同大写字母表示同一品种不同部位各指标在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the same line mean significant differences at $P < 0.05$ level in the same part among different varieties; different capital letters in the same column mean significant differences at $P < 0.05$ level in the same variety among different parts.

异, 表现为枝条过冷却能力>主根过冷却能力>副根过冷却能力, 而‘美乐’主根和副根过冷却能力间无明显差异。

2.3 应用模糊隶属函数法的不同酿酒葡萄品种抗寒性综合评价

应用模糊隶属函数法从供试酿酒葡萄品种主根、副根和枝条的过冷却点、结冰点温度和过冷

却能力等差热分析指标进行综合评价, 平均隶属函数度越低其抗寒性越强, 结果如表 3 所示。‘北玫’总体指标抗寒性表现较好, 平均隶属函数度最低, 为 0.22, 抗寒能力较强。而‘西拉’平均隶属函数度为 0.77, 抗寒能力弱。‘美乐’和‘赤霞珠’平均隶属函数度相近, 分别为 0.58 和 0.52, 为中等抗寒类型品种。

表 3 基于模糊隶属函数法综合评价 4 个酿酒葡萄品种的抗寒性

Table 3 Comprehensive evaluation of cold resistance of four wine grape varieties based on fuzzy membership function

部位 Part	指标 Index	北玫 Beimei	美乐 Merlot	西拉 Syrah	赤霞珠 Cabernet Sauvignon
主根 Taproot	过冷却点 Supercooling point	0.00	0.60	1.00	0.53
	结冰点 Freezing point	0.00	0.47	1.00	0.68
	过冷却能力 Supercooling capacity	0.71	0.00	0.26	1.00
副根 Accessory root	过冷却点 Supercooling point	0.00	0.30	1.00	0.46
	结冰点 Freezing point	0.00	0.45	1.00	0.61
	过冷却能力 Supercooling capacity	0.82	1.00	0.00	0.88
枝条 Branch	过冷却点 Supercooling point	0.00	1.00	0.65	0.39
	结冰点 Freezing point	0.00	0.99	1.00	0.09
	过冷却能力 Supercooling capacity	0.44	0.45	1.00	0.00
平均隶属函数度 Average of subordination value		0.22	0.58	0.77	0.52
抗寒类型 Cold hardness		高 High	中 Middle	低 Low	中 Middle

2.4 不同酿酒葡萄品种不同部位的半致死温度

植物遭到低温胁迫时, 低温会破坏其细胞膜的结构与功能, 使得细胞膜透性增大。植物细胞内电解质浓度增大, 最终导致电导率的增高。当膜透性受到损伤越大时, 电解质外渗的量就越多, 因此电解质渗透率可以反映生物膜受伤害的程度: 在相同温度时, 细胞质膜透性越小, 细胞膜受到的损伤越小, 电解质渗透率越低, 其抗寒性就越强。

对不同酿酒葡萄品种的主根、副根及枝条进行相对电导率的测定, 并进一步计算出 Logistics 方程

及半致死率(LT_{50})如表 4 所示。结果表明 4 种酿酒葡萄的主根、副根和枝条间半致死温度均差异显著。主根半致死温度间基本具有显著性差异, 抗寒性排序为: ‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’。副根半致死温度间也基本具有显著性差异, 抗寒性排序为: ‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’。‘北玫’枝条半致死温度显著低于其他供试品种, 为 -28.86°C ; 而‘西拉’枝条半致死温度显著高于其他供试品种, 为 -14.16°C ; ‘美乐’和‘赤霞珠’枝条半致死温度无显著性差异, 分别为 -17.90°C 和 -17.76°C 。

表 4 不同酿酒葡萄品种不同部位相对电导率(Y)和温度(X)的 Logistics 方程及半致死温度(LT_{50})Table 4 Logistics equations of relative electrical conductivity (Y) and temperature (X) and semi-lethal temperature (LT_{50}) of different parts of different wine grape varieties

部位 Part	品种 Variety	逻辑斯蒂方程 Logistics equations	R^2	LT_{50} ($^{\circ}C$)
主根 Taproot	北玫 Beimei	$Y=52.87/[1+EXP(4.68+0.89X)]$	0.999 3	-5.30f
	美乐 Merlot	$Y=44.97/[1+EXP(2.55+0.66X)]$	0.977 6	-3.97de
	西拉 Syrah	$Y=60.82/[1+EXP(4.39+1.38X)]$	0.982 5	-3.25b
	赤霞珠 Cabernet Sauvignon	$Y=45.07/[1+EXP(1.97+0.49X)]$	0.918 3	-4.06e
副根 Accessory root	北玫 Beimei	$Y=34.02/[1+EXP(4.98+1.22X)]$	0.975 3	-4.10e
	美乐 Merlot	$Y=41.46/[1+EXP(3.33+0.93X)]$	0.963 4	-3.61c
	西拉 Syrah	$Y=30.36/[1+EXP(2.68+0.91X)]$	0.950 1	-2.92a
	赤霞珠 Cabernet Sauvignon	$Y=46.59/[1+EXP(2.75+0.74X)]$	0.994 1	-3.70cd
枝条 Branch	北玫 Beimei	$Y=117.81/[1+EXP(4.62+0.16X)]$	0.967 5	-28.86i
	美乐 Merlot	$Y=84.22/[1+EXP(4.29+0.24X)]$	0.999 5	-17.90h
	西拉 Syrah	$Y=85.34/[1+EXP(6.02+0.43X)]$	0.995 2	-14.16g
	赤霞珠 Cabernet Sauvignon	$Y=72.26/[1+EXP(4.44+0.25X)]$	0.975 7	-17.76h

半致死温度列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the semi-lethal temperature column mean significant differences at $P<0.05$ level.

2.5 基于半致死温度的不同酿酒葡萄品种抗寒性综合评价

应用模糊隶属函数法从不同酿酒葡萄品种主根、副根和枝条的半致死温度进行评价, 平均隶属函数度越低其抗寒性越强, 结果如表 5 所示。结果表明‘北玫’总体指标抗寒性表现较好, 平均隶属函

数度最低, 为 0, 抗寒能力强。而‘西拉’平均隶属函数度为 1.00, 抗寒能力弱。‘美乐’和‘赤霞珠’平均隶属函数度相近, 分别为 0.62 和 0.55, 为中等抗寒类型品种。按抗寒能力强弱排序为: ‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’。其结果与差热分析结果一致, 表明最终抗寒性排序为‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’。

表 5 应用模糊隶属函数法基于半致死温度的不同酿酒葡萄品种抗寒性评价

Table 5 Cold resistance evaluation of different grape varieties based on semi-lethal temperature by fuzzy membership function method

品种 Variety	半致死温度 Semi-lethal temperature (LT_{50})			平均隶属函数度 Average of subordination value	抗寒类型 Cold hardness
	主根 Taproot	副根 Accessory root	枝条 Branch		
北玫 Beimei	0	0	0	0	高 High
美乐 Merlot	0.69	0.44	0.75	0.62	中 Middle
西拉 Syrah	1.00	1.00	1.00	1.00	低 Low
赤霞珠 Cabernet Sauvignon	0.58	0.31	0.76	0.55	中 Middle

2.6 酿酒葡萄半致死温度与过冷却点、结冰点及过冷却能力的相关性

不同酿酒葡萄品种半致死温度与过冷却点、结冰点和过冷却能力的相关性分析如表 6 所示。结果表明, 主根的半致死温度与过冷却点有极显著正相关关系, 相关系数为 0.996; 与结冰点有显著正相关关系, 相关系数为 0.969。副根半致死温度与过冷却点有显著正相关关系, 相关系数为 0.972; 与结冰点有显著性正相关关系, 相关系数为 0.954。而枝条的半致死温度与各项指标无显著性相关关系。

2.7 不同酿酒葡萄品种的枝条含水量及其与过冷却点、结冰点及过冷却能力的相关性

不同酿酒葡萄品种 1 年生枝条含水量‘北玫’最

低, 为 50.51%; ‘西拉’枝条含水量最高, 为 52.33%; ‘赤霞珠’和‘美乐’枝条含水量分别为 51.09%和 51.93%。除‘北玫’与‘美乐’和‘西拉’直接存在显著性差异外, 其他供试品种间均无显著性差异。

枝条含水量与过冷却点、结冰点及过冷却能力的相关性分析如表 7 所示, 枝条含水量与枝条过冷却点有显著正相关关系, 相关关系为 0.984。枝条含水量与枝条结冰点有显著正相关关系, 相关关系为 0.953。该结论与祁娇娇等^[21]的研究结果一致。

3 讨论与结论

宁夏多处酿酒葡萄基地的地表土温和距地 20 cm 深、40 cm 深的土温有降低趋势, 有些年份距地

表 6 酿酒葡萄半致死温度(LT₅₀)与抗寒性指标的相关性分析
Table 6 Correlation analysis between semi-lethal temperature (LT₅₀) and cold resistance indexes of wine grape

		过冷却点 Supercooling point	结冰点 Freezing point	过冷却能力 Supercooling capacity	LT ₅₀
主根 Taproot	过冷却点 Supercooling point	1.000			
	结冰点 Freezing point	0.966*	1.000		
	过冷却能力 Supercooling capacity	-0.525	-0.288	1.000	
	LT ₅₀	0.996**	0.969*	-0.494	1.000
副根 Accessory root	过冷却点 Supercooling point	1.000			
	结冰点 Freezing point	0.990*	1.000		
	过冷却能力 Supercooling capacity	-0.833	-0.746	1.000	
	LT ₅₀	0.972*	0.954*	-0.828	1.000
枝条 Branch	过冷却点 Supercooling point	1.000			
	结冰点 Freezing point	0.884	1.000		
	过冷却能力 Supercooling capacity	0.259	0.681	1.000	
	LT ₅₀	0.833	0.940	0.637	1.000

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 7 不同酿酒葡萄品种枝条含水量与抗寒性指标的相关性分析
Table 7 Correlation analysis between water contents and cold resistance indexes of branches of wine grape

		过冷却点 Supercooling point	结冰点 Freezing point	过冷却能力 Supercooling capacity	含水量 water content
过冷却点 Supercooling point		1.000			
结冰点 Freezing point		0.884	1.000		
过冷却能力 Supercooling capacity		0.259	0.681	1.000	
含水量 Water content		0.984*	0.953*	-0.515	1.000

*: $P < 0.05$.

20 cm 深最低土温低于 -3.5°C 的天数有 10 d, 葡萄萌芽前过低的土壤温度影响了根系的活动, 进而延迟了葡萄萌芽, 严重影响着葡萄后续的生长发育^[25]。基于本文中供试品种抗寒能力主根显著大于副根, 有以下推测: 供试葡萄品种根系在遭受冻害时由于主根与副根抗寒性不同, 其副根首先会受到损伤, 部分或全部死亡, 此时根系表现为轻度冻害; 当温度降至副根损伤严重或全部死亡, 主根部分损伤时根系表现为中度冻害; 温度降至主根严重损伤或完全死亡时, 根系表现为严重冻害。本试验中供试品种根系的过冷却点温度范围为 $-5.2\sim-2.7^{\circ}\text{C}$, 此温度范围与王丽雪等^[26]研究所得的根系受冻临界温度范围一致。各供试品种不同部位各项指标的抗寒性结果比较一致, 因此可以把 $-5.2\sim-2.7^{\circ}\text{C}$ 作为这 4 个酿酒葡萄品种根系越冬冻害的温度参考指标, 对葡萄根系冻害情况进行有效判断, 同时也为葡萄沟栽、科学埋土等防御措施提供理论依据。

半致死温度是判断植物逆境伤害的指标之一^[27], 尤其在果树抗寒性上有广泛应用^[28]。本试验采用相对电导法与过冷却点、结冰点相结合的方法, 可以有效鉴定酿酒葡萄抗寒性。此次研究结果表明, 主根过冷却点温度和半致死温度相近, 且有极显著的

正相关关系; 主根结冰点与半致死温度有显著的正相关关系。副根结冰点与半致死温度有显著的正相关关系。基于以上分析结果表明, 葡萄根系过冷却点和结冰点与半致死温度有显著的正相关关系。而枝条的半致死温度与过冷却点、结冰点均无显著性相关关系且与过冷却点温度范围相差较大, 可能与枝条没有经历冷驯化以及含水率有关, 枝条抗寒性与枝条含水率关系密切, 枝条含水率变化会引起细胞中的自由水与可溶性糖和可溶性蛋白结合, 造成细胞液浓度发生变化且减少细胞间隙中的水分。

此次研究表明, 枝条含水率与枝条过冷却点和结冰点均有显著的正相关关系。由于试验条件本文中供试品种的主根和副根前期处理时没有测定含水率, 在过冷却点和结冰点的测定中由于含水量的不同, 结果会有所差异。因此, 不同部位过冷却点和结冰点的临界含水量值有待进一步研究。

不同酿酒葡萄品种枝条与根系的抗寒能力表现相近, 过冷却点温度从高到低排序, 主根过冷却点依次为: ‘西拉’>‘美乐’>‘赤霞珠’>‘北玫’; 副根过冷却点为: ‘西拉’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘北玫’; 枝条过冷却点为: ‘美乐’>‘西拉’>‘赤霞珠’>‘北玫’。结冰点温度从高到低排序, 主根结冰点为: ‘西拉’>‘赤霞

珠’>‘美乐’>‘北玫’; 副根结冰点为: ‘西拉’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘北玫’; 枝条结冰点为: ‘西拉’>‘美乐’>‘赤霞珠’>‘北玫’。对过冷却点、结冰点和过冷却能力应用模糊隶属函数法对供试品种抗寒能力的综合评价结果与对半致死温度应用模糊隶属函数法对供试品种抗寒能力的评价结果完全一致, 可得各供试品种抗寒性由强到弱为: ‘北玫’>‘赤霞珠’>‘美乐’>‘西拉’, 与马小河等^[7]、高振等^[16]和杨豫等^[17]研究结果相近。同时得出供试品种不同部位抗寒性由强到弱为: 枝条>主根>副根, 符合前人的研究结果^[29-30]。结果表明: 酿酒葡萄不同品种根系、枝条抗寒能力趋势表现相近, 且根据田间调查, ‘北玫’在宁夏地区不需埋土即可安全过冬, 与本研究‘北玫’不同部位抗寒能力均较强的结果一致。

参考文献 References

- [1] STEPONKUS P L. Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation[J]. Annual Review of Plant Biology, 1984, 35(1): 543-584
- [2] TONETTO J, CARBONNEAU A. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(1/2): 81-97
- [3] 王文平, 郭祀远, 李琳, 等. 苯酚-硫酸法测定野木瓜中多糖含量的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(4): 276-279
WANG W P, GUO S Y, LI L, et al. Assay study on content of polysaccharides in *Stanuntonia chinensis* by phenol-sulfuric acid method[J]. Food Science, 2007, 28(4): 276-279
- [4] XIN Z, BROWSE J. Cold comfort farm: The acclimation of plants to freezing temperatures[J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(9): 893-902
- [5] 苏李维, 李胜, 马绍英, 等. 葡萄抗寒性综合评价方法的建立[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 70-79
SU L W, LI S, MA S Y, et al. A comprehensive assessment method for cold resistance of grape vines[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(3): 70-79
- [6] 牛锦凤, 王振平, 李国, 等. 几种方法测定鲜食葡萄枝条抗寒性的比较[J]. 果树学报, 2006, 23(1): 31-34
NIU J F, WANG Z P, LI G, et al. Comparison of different methods for examination of grape hardiness[J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(1): 31-34
- [7] 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
- [8] 张文娥, 王飞, 潘学军. 应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性[J]. 果树学报, 2007, 24(6): 849-853
ZHANG W E, WANG F, PAN X J. Comprehensive evaluation on cold hardiness of *Vitis* species by Subordinate Function (SF)[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(6): 849-853
- [9] 鲁金星, 姜寒玉, 李唯. 低温胁迫对砧木及酿酒葡萄枝条抗寒性的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(6): 1040-1046
LU J X, JIANG H Y, LI W. Effects of low temperature stress on the cold resistance of rootstock and branch of wine grapes[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(6): 1040-1046
- [10] 赵滢, 艾军, 杨义明, 等. TTC染色指数配合Logistic方程鉴定山葡萄种质抗寒性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 174-180
ZHAO Y, AI J, YANG Y M, et al. Identification of cold resistance in *Vitis amurens* germplasm based on TTC staining index and Logistic equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 174-180
- [11] 陈佰鸿, 张彪, 毛娟, 等. 葡萄枝条水分含量变化与抗寒性关系[J]. 植物生理学报, 2014, 50(4): 535-541
CHEN B H, ZHANG B, MAO J, et al. The relationship between the changing of water content and the cold resistance of grape branches[J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(4): 535-541
- [12] 范宗民, 孙军利, 赵宝龙, 等. 不同砧木‘赤霞珠’葡萄枝条抗寒性比较[J]. 果树学报, 2020, 37(2): 215-225
FAN Z M, SUN J L, ZHAO B L, et al. Evaluation of cold resistance of one-year shoots from ‘Cabernet Sauvignon’ grape vine grafted on different rootstocks[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(2): 215-225
- [13] 郭修武, 傅望衡, 王光洁. 葡萄根系抗寒性的研究[J]. 园艺学报, 1989, 16(1): 17-22
GUO X W, FU W H, WANG G J. Studies on cold hardiness of grape roots[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1989, 16(1): 17-22
- [14] 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
- [15] 袁军伟, 郭紫娟, 刘长江, 等. 11个葡萄品种根系抗寒性的综合评价[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2015, (2): 21-25
YUAN J W, GUO Z J, LIU C J, et al. Comprehensive assessment of the cold resistance of roots from eleven grape cultivars[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2015, (2): 21-25
- [16] 高振, 翟衡, 孙鲁龙, 等. 基于温度-伤害度关系分析酿酒葡萄根系及芽抗寒性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 983-990
GAO Z, ZHAI H, SUN L L, et al. Evaluation of root and bud cold hardiness of wine grape varieties based on temperature-injury relation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 983-990
- [17] 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(中英文), 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
- [18] 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
- [19] 秦明, 王红芳, 刘振国, 等. 中华蜜蜂和意大利蜜蜂耐寒性能差异比较[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2380–2388
QIN M, WANG H F, LIU Z G, et al. Comparison of different cold resistance between *Apis cerana cerana* and *Apis mellifera ligustica*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2380–2388
- [20] 孟庆瑞, 王文凤, 梁隐泉, 等. 杏品种花器官过冷却点及结冰点的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1128–1133
MENG Q R, WANG W F, LIANG Y Q, et al. Study on supercooling point and freezing point in floral organs of apricot[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1128–1133
- [21] 祁娇娇, 崔如海, 李保国, 等. 5 个核桃品种结果母枝过冷却点及结冰点的研究[J]. 林业实用技术, 2012, (11): 13–16
QI J J, CUI R H, LI B G, et al. Study on supercooling point and freezing point of 5 varieties of walnut[J]. Practical Forestry Technology, 2012, (11): 13–16
- [22] 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): 2948–2953
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): 2948–2953
- [23] 李盼华. 低温胁迫对早春开花植物花器官抗寒性及花色的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2011
LI P H. The impact of cold hardiness and floral color under low temperature stress on floral organs of early spring flowering plants[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011
- [24] 王文举, 张亚红, 牛锦凤, 等. 电导法测定鲜食葡萄的抗寒性[J]. 果树学报, 2007, 24(1): 34–37
WANG W J, ZHANG Y H, NIU J F, et al. Study on cold tolerance of table grape cultivars by measuring the conductivity[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(1): 34–37
- [25] 李玉鼎, 宋文章, 宋长冰, 等. 2009 年黄羊滩、红寺堡等酿酒葡萄基地葡萄冻害调查报告[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2010, (11): 35–37
LI Y D, SONG W Z, SONG C B, et al. Investigation report on grape freezing injury in wine bases of Huangyangtan and Hongsibao in 2009[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2010, (11): 35–37
- [26] 王丽雪, 赵金枝, 余茂莉, 等. 葡萄根系抗寒力的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1982, 4(1): 111–123
WANG L X, ZHAO J Z, YU M L, et al. Study on cold resistance of grape roots[J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry, 1982, 4(1): 111–123
- [27] 刘建, 项东云, 陈健波, 等. 应用 Logistic 方程确定三种桉树的低温半致死温度[J]. 广西林业科学, 2009, 38(02): 75–78.
LIU J, XIANG D Y, CHEN J B, et al. Low temperature LT50 of three eucalyptus seedlings with electrical conductivity method and Logistic equation[J]. Guangxi Forestry Science, 2009, 38(2): 75–78
- [28] 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
- [29] ZHENG C L, HALALY T, ACHEAMPONG A K, et al. Abscissic 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
- [30] 焦奎宝. 葡萄根系抗寒性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010
JIAO K B. Study on cold hardiness of grape roots[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010