

利用低温放热 (LTE) 测定葡萄冬芽耐寒性方法的优化及应用

柴凤梅¹, 祝 为¹, 项 悦¹, 辛海平¹, 李绍华^{1,2,*}

(¹中国科学院武汉植物园, 武汉 430074; ²中国科学院植物研究所, 葡萄科学与酿酒技术北京市重点实验室, 北京 100093)

摘 要: 以葡萄休眠芽为试材, 对利用低温放热 (low temperature exotherm, LTE) 分析耐寒性方法中适宜的保湿水量及取芽位置进行了研究, 同时比较了 -4 °C 和 -8 °C 低温贮藏过程中葡萄冬芽 LTE 的变化动态。结果表明, LTE 测定时每个模块中适宜的保湿水量为 150 μL, 取样时应选择第 3~8 节位饱满休眠芽。枝条在 -4 °C 贮藏能够有效延长冬芽 LTE 的评价, 但适宜的贮藏期限为 3 个月。同时, 采用优化的方法对 4 个类型 20 个葡萄种质的 LTE 测定表明, 欧亚种、欧美种、种间杂种和野生种的耐寒性依次增强, 且同一类型不同品种的耐寒性也存在较大差异。

关键词: 葡萄; 休眠芽; 低温放热分析; 耐寒性; 低温贮存

中图分类号: S 663.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2015) 01-0140-09

Optimized Method for Detecting the Cold Hardiness of Grape Dormant Bud by Low Temperature Exotherms (LTE) Analysis and Its Utilization

CHAI Feng-mei¹, ZHU Wei¹, XIANG Yue¹, XIN Hai-ping¹, and LI Shao-hua^{1,2,*}

(¹Wuhan Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; ²Beijing Key Laboratory of Grape Science and Enology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: The moisture condition and nodes of grapevine dormant buds during the low temperature exotherm (LTE) analysis were optimized and the changes of LTE of dormant buds were investigated under storage at -4 °C and -8 °C. The results show that the appropriate moisture condition of grape dormant buds was 150 μL for each cell. The plump dormant buds from the 3rd - 8th node can be used as suitable material. The cold hardiness of buds was maintained up to 3 months under the storage at -4 °C. By using optimized methods, the cold hardiness of 20 grape germplasms including 5 wild species were detected. The results reveal that the LTE of wild species was significantly lower than those of the other germplasm including the cultivars from interspecific hybrids, and the *Vitis vinifera* cultivars had the highest LTE. Furthermore, the cold hardiness of grape buds of the same type varied with cultivars or species.

Key words: grape; dormant bud; low temperature exotherms analysis; cold hardiness; low temperature storage

收稿日期: 2014-08-22; 修回日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31130047)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: shhli@ibcas.ac.cn; shhli@wbcas.cn)

中国葡萄北方主产区主要为大陆性气候, 冬季寒冷干旱, 必须埋土才能实现安全越冬。而世界葡萄主产区主要在具有地中海气候的地区栽培, 冬季不需要埋土防寒就能安全越冬。葡萄冬季埋土防寒除大幅度增加栽培成本外, 还会对树体造成伤害, 而且埋土也是冬季沙尘的一个重要来源。因此, 进行葡萄种质的抗寒性评价对于抗寒品种的选育及增强中国葡萄产业的竞争力具有重要意义。

经典的评价植物抗性方法是测定组织在低温条件下的电导率 (Sutinen et al., 1992)。该方法存在费时费工和准确度相对较差的缺陷 (牛立新和贺普超, 1989)。20 世纪 70 年代开始, 差热分析 (different thermal analysis, DTA) 或称为低温放热 (low temperature exotherm, LTE) 分析方法开始应用于木本植物组织的抗寒性评价 (Quamme, 1973), 其基本原理为, 在低温下植物组织结冰时会有 1 个放热过程, 通过差热分析检测记录放热温度, 可评价其抗寒性 (Mills et al., 2006)。该方法已应用于苹果 (Ketchie & Kammereck, 1987)、美国红枫 (Lindstrom et al., 1995) 和核桃 (Volk et al., 2009) 等植物组织的抗寒性评价, 且在葡萄抗寒研究中日趋成熟 (Pierquet & Stushnoff, 1980; Clark et al., 1996; 张善江和 Kaps, 2005; 高振 等, 2014), 一般通过测定葡萄冬芽主芽的 LTE 来评价植株的抗寒能力 (Proebsting et al., 1980)。

多年生植物在休眠期间的抗寒性除受气候条件与栽培技术的影响外, 主要取决于树种和品种自身的抗寒能力 (陈钰 等, 2007; 陈新华 等, 2009; 田景花 等, 2013)。晚秋至冬季, 葡萄等多年生植物经过低温锻炼抗寒性加强 (Byard et al., 2010), 在完全进入自然休眠时抗寒性最强, 自然休眠结束之后进入强迫休眠, 并随温度上升抗寒能力逐渐减弱 (Kalberer et al., 2006; Ferguson et al., 2011)。不同基因型植株进入自然休眠和强迫休眠后对低温的耐受力不同, 能耐受的最高温度以及对温度变化的响应存在差异 (Mills et al., 2006)。因此, 同一材料不同时期采集的样品 LTE 温度不同 (Jiang & Howell, 2002)。在自然条件下采用 LTE 进行群体抗寒性测定耗时较长, 外界环境的变化以及植株自身所处的休眠状态的差异会导致所测定结果准确性降低。因此, 有必要研究 LTE 测定的适宜贮存条件, 以满足大量植物组织器官 LTE 测定的需求。

本文报道了 LTE 测定葡萄冬芽抗寒性方法优化的研究结果, 同时报道了利用优化方法对 20 个不同种质抗寒性的评价结果, 以期评价葡萄单株或群体抗寒性提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与仪器

LTE 测定冬芽耐寒性优化试验采用欧山杂种葡萄 (*Vitis vinifera* × *V. amurensis*) ‘北红’和‘北玫’, 欧亚种葡萄 (*Vitis vinifera*) ‘京蜜’和‘京香玉’; 自然条件下葡萄冬芽抗寒力动态变化试验选用‘北红’与‘北玫’; 同时对野生种、种间杂种、欧亚品种和欧美杂交品种部分种质 (表 1) 进行了抗寒性评价。所有试材于 2013 年 11 月—2014 年 3 月采自中国科学院植物研究所葡萄种质资源圃。

采用差热分析 (DTA) 系统进行研究。DTA 系统由程序控制冰箱 (Tenney Environmental Test Chamber) 和数据采集系统 (Data Acquisition System, DAS) 两部分组成。

程序控制冰箱模拟自然降温。数据采集系统有 4 层 PVC 板, 每层 PVC 板上有 9 个电热模块 (CP1.4-127-045L Melor)。每个 PVC 板均配置热敏电阻式温度传感器, 记录芽体放热过程中每个电热模块中温度的变化, 并将其转换成电压 (mV) 形式输出。数据采集器 (2701 ethernet multimeter/DAS, Keithley) 每隔 15 s 采集 1 次从温敏电阻及热电模块中传出的电阻及电压变动数据, 电阻值 (R) 经由公式转换为样品盘的实时温度 [$T (^{\circ}\text{C}) = -0.007742 \times R + 106.5$], 结合 Excel LINX 程序,

在 EXCEL 中完成响应温度下的电压变动图 (Wample et al., 1990; 侯加林 等, 2012)。

1.2 LTE评价葡萄冬芽抗寒性测定条件的优化

已有研究 (Johnson & Howell, 1981; Mills et al., 2006) 表明芽体变干会影响 LTE 值, 所以在 LTE 分析时需加一定量的蒸馏水 (dH_2O) 以保持芽体湿润。2013 年 12 月 14 日, 以 ‘北红’、‘北玫’ 为材料, 设置加 0、150、200 和 400 μL dH_2O 处理, 以不放芽体的空 PVC 板为对照, 研究湿度对 LTE 温度的影响。

选取 ‘北红’、‘北玫’ 芽数多于 12 个的一年生健壮枝条, 剪去基部的两个芽, 依次每两节 (3~4、5~6、7~8、9~10) 为一组, 进行取芽位置差异性分析。每组测定 30~40 个芽进行重复试验。

1.3 自然条件与稳定低温贮藏过程中葡萄冬芽LTE变化动态的测定

2013 年 11 月 6 日、12 月 15 日、2014 年 1 月 24 日、2 月 23 日、3 月 15 日和 3 月 25 日取田间 ‘北红’ 和 ‘北玫’ 进行冬芽 LTE 的测定。

2013 年 12 月 15 日, 取两个欧山杂种品种 ‘北红’ 和 ‘北玫’ 与两个欧亚种品种 ‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ 成熟健壮的枝条, 置于温度为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的冷库中贮藏, 贮藏期间采用保鲜膜保湿。在贮藏后 0、20、40、60、70、80、90、100、110 和 120 d, 分别从冷库中取出, 进行 LTE 测定。每次测定每品种测定 18~30 个芽作为重复。

1.4 葡萄种质资源抗寒性评价

2013 年 12 月 16—20 日, 采集 5 个野生种 (河岸葡萄、燕山葡萄、波兰紫葛、浙江蓼萸和山葡萄), 5 个种间杂种 (3 个欧山杂种: ‘北红’、‘北玫’、‘北醇’; 两个欧蓼杂种 ‘北丰’ 和 ‘北紫’), 5 个欧亚品种 (‘京艳’、‘京秀’、‘京早晶’、‘意大利’ 和 ‘亚历山大’) 和 5 个欧美杂交品种 (‘京亚’、‘京优’、‘巨峰’、‘高妻’ 和 ‘伊豆锦’)。采用优化后条件进行冬芽 LTE 检测, 取芽位置 4~8 节位, 每个电热模块加入 150 μL dH_2O 保湿。

1.5 LTE测定

选择饱满芽体, 垂直芽体中轴线下刀, 仅带 0.5~1.0 mm 厚木质部组织, 切面平整。将切好的芽体放入有潮湿吸水纸的培皿中。在电热模块中放好薄纸片, 除湿度比较研究外, 加入 150 μL dH_2O , 每个电热模块中放入 6 个芽体, 切面向下。盖上海绵, 轻压使切面与电热模块紧密接触。固定好的 PVC 板置于程序控制冰箱降温, 降温程序为: 室温至 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 min; $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 1 h; $-4\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降温速度 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, 共需 10 h; $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 1 h; 45 min 内升温至 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。每隔 15 s 采集 1 次温度数据。植物组织结冰时会放热, 导致瞬间温度升高, 高峰出现时所对应的气候室温度值即为芽的致死温度 (张善江和 Kaps, 2005; Mills et al., 2006)。选用主芽 LTE 值对葡萄品种抗寒性进行分析。

2 结果与讨论

2.1 保湿水量

差热分析系统中无放热现象时输出的一条较平稳的曲线为系统基线, 稳定的基线是 LTE 测定中评价植物组织抗寒性的基础 (Vučelić et al., 1972), 并能使测定结果中植物组织结冰导致的放热峰被准确识别。不同保湿水量影响基线的波动 (图 1), 5 次重复测定的结果表明, 加水 150 μL 的基线

波动幅度为 2.76×10^{-2} mV, 与不放芽体的空 PVC 板 (2.94×10^{-2} mV) 接近。0 和 200 μ L 时分别为 3.24×10^{-2} mV 和 3.72×10^{-2} mV, 400 μ L 时波动幅度最大, 为 4.05×10^{-2} mV。

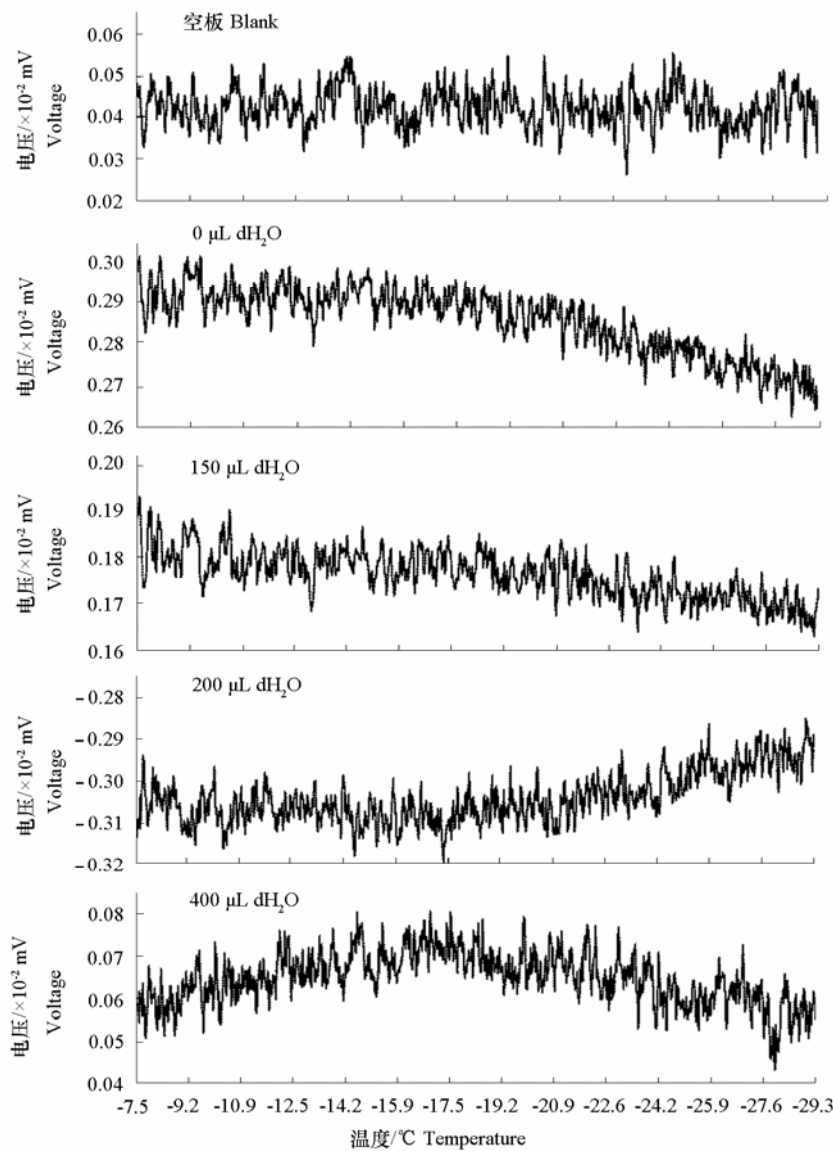


图 1 不同湿度条件下电热板输出电压波动幅度
Fig. 1 Typical DTA profiles of temperature-voltage curve under different moisture

不同加水量条件下, 所得到‘北红’冬芽的 LTE 图存在明显差异 (图 2)。由于切芽过程耗时较长, 不加水 (0 μ L) 时切芽后芽体变干, 每个热电模块内 6 个芽中仅有 1 个芽出峰, 且 LTE 温度较低。随着加水量的增加, 出峰位置向 LTE 温度升高方向移动, 尤其是在加水量为 400 μ L 情况下, 冬芽的 LTE 温度较 150 μ L 和 200 μ L 明显高, 且加水量的增加会导致每次不同冬芽 LTE 的离散度加大。上述结果与 Johnson 和 Howell (1981)、Mills 等 (2006) 的研究结果相同。芽体湿度增大会增加其对冻害的敏感性, 湿度大的芽相比于较干的芽在较低温度下易发生冻害, 影响休眠芽的 LTE 测定。上述的研究结果可以看出, 保湿水量在 150 μ L 时所获得的 LTE 结果较准确, 因此, 后面的研究均采用 150 μ L 保湿量进行冬芽的 LTE 测定。

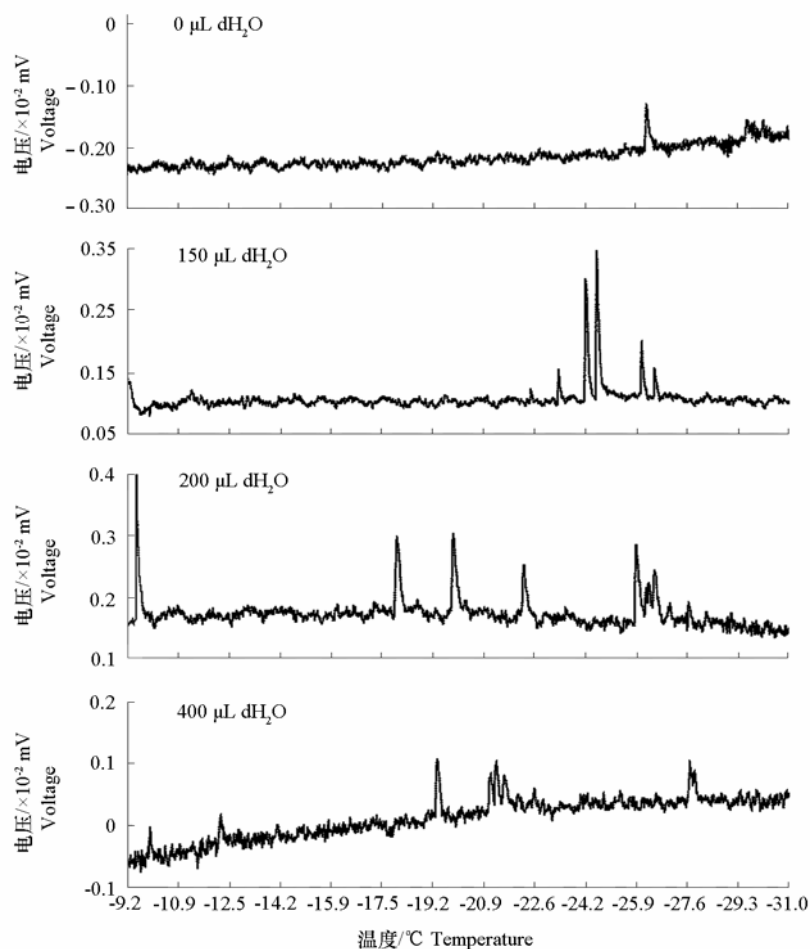


图 2 不同湿度条件下‘北红’冬芽的典型 LTE 图

Fig. 2 Typical DTA profiles of low temperature exotherms of ‘Beihong’ buds under different moisture

2.2 取芽位置

‘北红’和‘北玫’不同节位的芽的 LTE 差异趋势相似 (表 2)。“北红”不同节位的冬芽 LTE 温度差异不显著。“北玫”3~8 节的芽间 LTE 温度不存在显著差异, 但 7~8 节的芽 LTE 较 9~10 节的高, 差值约为 3℃。因此, 进行葡萄冬芽 LTE 测定时, 应选取枝条中部 3~8 节生长饱满、状态良好的芽体。在进行葡萄冬芽 LTE 测定时, 需进行葡萄主芽和副芽 LTE 温度的区分 (Wolf & Cook, 1994)。

表 2 ‘北红’和‘北玫’不同位置芽的 LTE 温度

Table 2 LTE of buds from different nodes of ‘Beihong’ and ‘Beimei’

节位 Nodes	‘北红’ Beihong	‘北玫’ Beimei
3~4	-22.60 a	-24.27 a
5~6	-22.74 a	-25.63 ab
7~8	-24.55 a	-23.89 a
9~10	-24.03 a	-26.90 b

注: 不同字母表示不同节间的芽差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference among the buds from different nodes at $P < 0.05$ level.

2.3 自然条件下休眠期冬芽 LTE 变化动态

由图 3 可以看出, 在葡萄整个休眠过程中, 前一年 11—12 月随着气温下降, 葡萄冬芽耐寒性增加。12 月中下旬至次年 1 月耐寒性强且稳定。2 月以后随着天气气温回升, 耐寒性下降。初冬后的

锻炼过程和早春的脱锻炼过程十分迅速并与环境温度密切相关 (毛才良和霍洛博维茨, 1995; Kalberer et al., 2006)。所测定的两个葡萄品种在不同休眠时期表现出的抗寒性强弱存在较小差异。在休眠早期 (11 月 06 日、12 月 15 日取样) 和强迫休眠期 (3 月 15、25 日取样) 两品种的 LTE 温度均为 ‘北红’ 低于 ‘北玫’, 而在休眠期 (1 月 24 日、2 月 23 日取样) ‘北玫’ 低于 ‘北红’。

对两品种在不同休眠期的 LTE 温度的比较表明, 在低温锻炼的过程中, ‘北玫’ 在自然休眠结束后 LTE 温度上升的速度也快于 ‘北红’, 说明 ‘北玫’ 失去抗寒能力的速度快于 ‘北红’。抗寒性强的品种自然休眠结束后其脱锻炼时间长于弱抗寒品种 (简令成, 1992), 这种延长脱锻炼时间的特性对防止异常天气的危害是有益的 (Ferguson et al., 2011)。几十年的田间表现也证明 ‘北红’ 较 ‘北玫’ 具有更强的抗寒性。

2.4 低温贮藏条件下冬芽LTE变化

‘北红’、‘北玫’、‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ 4 个品种分别在 -4 、 -8 $^{\circ}\text{C}$ 条件下贮藏 120 d 的 LTE 变化动态结果 (图 4) 表明, 贮藏温度显著影响葡萄休眠芽 LTE 温度。整个贮藏过程中, 欧亚种的 ‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ LTE 显著高于欧山杂种品种 ‘北红’ 和 ‘北玫’。并且, 尽管每个品种的 LTE 有或高或低的波动, 但除 -4 $^{\circ}\text{C}$ 90 d 后和 -8 $^{\circ}\text{C}$ 20 d 后的 ‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ 外, LTE 表现基本稳定。尤其是 ‘北红’ 和 ‘北玫’, 在两个温度贮藏条件下, 贮藏 120 d 的 LTE 较为稳定, 其 LET 的波动可以被认为是芽的异质性所致。 -4 $^{\circ}\text{C}$ 90 d 后和 -8 $^{\circ}\text{C}$ 20 d 后的 ‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ LET 表现出增高的趋势, 并且在贮藏 110 d 时 ‘京蜜’、‘京香玉’ 已无放热峰 (图 4), 可能是较长时间冬芽芽体已经变干所致。

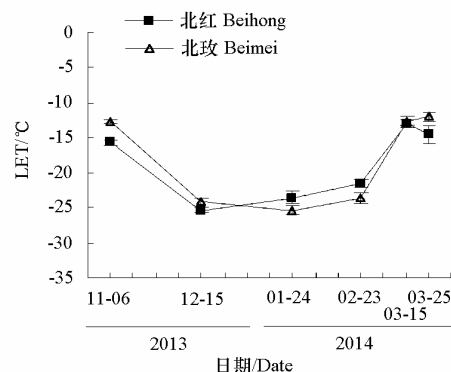


图 3 2013 年 11 月至 2014 年 3 月 ‘北红’ 和 ‘北玫’ 休眠芽的 LTE

Fig. 3 Buds LTE of ‘Beihong’ and ‘Beimei’ from November 2013 through March 2014

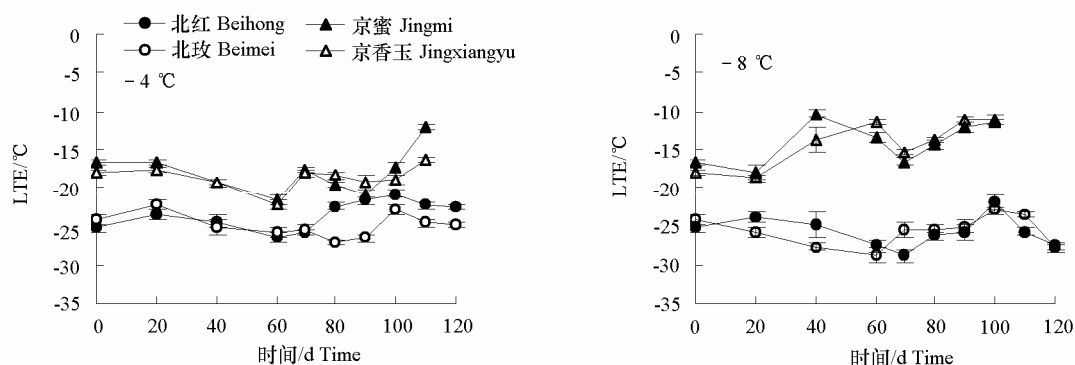


图 4 ‘北红’、‘北玫’、‘京蜜’ 和 ‘京香玉’ 分别在 -4 $^{\circ}\text{C}$ 、 -8 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下 LTE 温度变化

Fig. 4 Dynamic changes of buds cold hardness of four grape cultivars during storage at different low temperature (-4 or -8 $^{\circ}\text{C}$)

在低温条件下贮藏可以用来延长葡萄冬芽 LTE 保持的时间, 不同品种芽体在长期低温贮藏后, DTA (差热分析法) 是否出峰也取决于品种或种质的耐寒性。Volk 等 (2009) 利用 DTA 将 112 个山核桃品种的枝条, 在 -3°C 下贮藏 120 d 后检测休眠芽 LTE 发现, 37% 的耐寒性弱的南方品种检测不到放热峰, 而仅有 11% 耐寒性强的北方品种检测不到放热峰。因此, 在用于 LTE 研究时, 抗寒性强的种质低温保存时间长, 也耐更低温度条件的贮藏。从上述结果看, 在 -4°C 条件下贮藏, 并在 90 d 之内完成检测获得的 LTE 较为可靠。

2.5 利用 LTE 对 20 个葡萄种质冬芽的耐寒性评价

应用优化的 LTE 方法对 2013 年 12 月 16—20 日 20 个种质的耐寒性鉴定结果表明, 不同类别种质耐寒性存在显著性差异: 野生种葡萄休眠芽的 LTE 显著低于其他 3 类, 欧亚种品种 LTE 最高, 欧美杂种品种显著低于欧亚种品种, 但显著高于种间杂种 (表 1)。其中野生种河岸葡萄和燕山一号耐寒性最强, LTE 分别为 -26.03°C 和 -25.70°C 。欧山杂种后代 ‘北红’ 和 ‘北玫’ 耐寒性较强, LTE 分别为 -24.51°C 和 -23.93°C 。欧亚种 ‘京艳’、‘京秀’ 和 ‘京早晶’ 耐寒性最弱, LTE 分别为 -17.88°C 、 -17.99°C 和 -17.54°C 。另外同一类别不同品种的抗寒性也存在差异。欧亚种中 ‘亚历山大’ 与 ‘京艳’、‘京秀’、‘京早晶’ 差异显著, 并以 ‘亚历山大’ 抗寒性最强; 欧美杂种中 ‘巨峰’ 与 ‘京优’、‘高妻’ 差异显著; 种间杂种中 ‘北红’ 和 ‘北玫’ 抗寒性显著高于 ‘北醇’、‘北丰’ 及 ‘北紫’; 野生种中河岸葡萄和燕山一号抗寒性显著高于其他野生种, 并以浙江蔓蓂的抗寒性最差。

表 1 20 个葡萄品种和野生种冬芽的平均 LTE 温度
Table 1 Average LTE of buds from different grape cultivars or species

类别 Type	品种或野生种 Cultivar or wild species	LTE/ $^{\circ}\text{C}$	类别平均 LTE / $^{\circ}\text{C}$ Average LTE of type
欧亚种 <i>V. vinifera</i>	京早晶 Jingzaojing	-17.54 a	-18.21 a
	京艳 Jingyan	-17.88 a	
	京秀 Jingxiu	-17.99 ab	
	意大利 Italia	-18.57 abc	
	亚历山大 Muscat of Alexandria	-19.96 cde	
	类别平均 Average LTE of type		
欧美杂种 Hybrids between <i>V. vinifera</i> and <i>V. labrusca</i>	高妻 Gaoqi	-19.38 bcd	-20.16 b
	京优 Jingyou	-19.61 cd	
	伊豆锦 Yidoujin	-20.45 de	
	京亚 Jingya	-20.87 def	
	巨峰 Jufeng	-21.36 ef	
	类别平均 Average LTE of type		
欧蓂杂种 Hybrids between <i>V. vinifera</i> and <i>V. thunbergii</i>	北紫 Beizi	-20.14 de	-22.41 c
	北丰 Beifeng	-20.76 def	
	北醇 Beichun	-22.19 fg	
欧山杂种 Hybrids between <i>V. vinifera</i> and <i>V. amurensis</i>	北玫 Beimei	-23.93 h	-24.02 d
	北红 Beihong	-24.51 hi	
	类别平均 Average LTE of type		
	野生种 Wild species		
	浙江蔓蓂 <i>V. amurensis</i>	-18.15 ab	-24.02 d
	波兰紫葛 <i>V. coignetiae</i>	-23.45 gh	
	山葡萄 <i>V. amurensis</i>	-24.17 h	
	燕山一号 <i>V. amurensis</i> var. <i>dissecta</i> ‘Yanshan’	-25.70 ij	
	河岸葡萄 <i>V. riparia</i>	-26.03 j	
	类别平均 Average LTE of type		

注: 不同字母表示种质间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference among germplasms at $P < 0.05$ level.

多个研究中证明抗寒性极强的山葡萄, LTE 温度高于河岸葡萄和燕山一号, 且与‘北红’和‘北玫’的 LTE 的差异不大。这种可能的原因一是与生态型相关, 另外一个原因可能与被测定芽的异质性有关。在 LTE 图中不同芽受冻结冰的放热峰, ‘北红’、‘北玫’出峰范围集中, 说明这两个品种的芽体生长状态良好, 且一致性好, 但山葡萄 LET 图中不同芽受冻结冰的放热峰的离散度大。根据上述结果, 在 LTE 评价中应适当增加每次芽的数量或增加重复的次数, 以减少因芽的异质性对评价结果的影响。

3 结论

在每年 12 月中至次年 1 月中选取健壮枝条上 3~8 节位的饱满冬芽, 测定过程中芽体保湿量 150 μL 进行 LTE 测定, 是葡萄抗寒性评价的适宜方法。在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温贮藏, 可以有效延长冬芽耐寒性评价时间, 其适宜的低温贮藏时间为 3 个月。在本研究中所选的不同类型葡萄种质间抗寒性存在较大差异, 欧亚种、欧美种、欧山和欧蔓种间杂种和野生种的耐寒性依次增强, 且同一类型内不同品种以及不同的野生种的抗寒性也存在显著差异。

References

- Byard S, Wisniewski M, Li J H, Karlson D. 2010. Interspecific analysis of xylem freezing responses in *Acer* and *Betula*. *HortScience*, 45 (1): 165 - 168.
- Clark J R, Wolf T K, Warren M K. 1996. Thermal analysis of dormant buds of tow muscadine grape cultivars and of *Vitis labrusca* L. ‘Mars’. *HortScience*, 31 (1): 79 - 81.
- Chen Yu, Guo Ai-hua, Yao Yan-tao. 2007. A study on cold tolerance of one year old dormant branch of six almond cultivars. *Journal of West China Forestry Science*, 36 (4): 113 - 115. (in Chinese)
- 陈 钰, 郭爱华, 姚延涛. 2007. 6 个杏品种 1 年生休眠枝的抗寒性研究. *西部林业科学*, 36 (4): 113 - 115.
- Chen Xin-hua, Guo Bao-lin, Zhao Jing, Yang Jun-xia. 2009. Cold hardiness in dormant branches of different sweet cherry varieties. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 32 (6): 37 - 40. (in Chinese)
- 陈新华, 郭宝林, 赵 静, 杨俊霞. 2009. 休眠期内甜樱桃不同品种枝条的抗寒性. *河北农业大学学报*, 32 (6): 37 - 40.
- Ferguson J C, Tarara J M, Mills L J, Gary G G, Keller M. 2011. Dynamic thermal time model of cold hardiness for dormant grapevine buds. *Annals of Botany*, 107: 389 - 396.
- Gao Zhen, Zhai Heng, Zang Xing-long, Zhu Hua-ping, Du Yuan-peng. 2014. Using differential thermal analysis to analyze grape buds cold hardiness of 8 rootstocks and 6 cultivars. *Acta Horticulturae Sinica*, 41 (1): 17 - 25. (in Chinese)
- 高 振, 翟 衡, 臧兴隆, 朱化平, 杜远鹏. 2014. 利用低温放热分析 8 个葡萄砧木和 6 个栽培品种芽的抗寒性. *园艺学报*, 41 (1): 17 - 25.
- Hou Jia-lin, Dang Yuan, Gao Zhen, Zhai Heng. 2012. Development and experiment of cold resistance tester for grape roots and branches. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28 (24): 41 - 46. (in Chinese)
- 侯加林, 党 园, 高 振, 翟 衡. 2012. 葡萄根和枝条抗寒性能测试仪的研制与试验. *农业工程学报*, 28 (24): 41 - 46.
- Jian Ling-cheng. 1992. Advances of the studies on the mechanism of plant cold hardiness. *Chinese Bulletin of Botany*, 9 (3): 17 - 22. (in Chinese)
- 简令成. 1992. 植物抗寒机理研究的新进展. *植物学通报*, 9 (3): 17 - 22.
- Jiang H, Howell G S. 2002. Correlation and regression analyses of cold hardiness, air temperatures, and water content of Concord grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53: 227 - 230.
- Johnson D E, Howell G S. 1981. Factors influencing critical temperatures for spring freeze damage to developing primary shoots on Concord grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 32: 144 - 148.

- Ketchie D O, Kammereck R. 1987. Seasonal variation of cold resistance in *Malus* woody tissue as determined by differential thermal analysis and viability tests. Canadian Journal of Botany, 65 (12): 2640 - 2645.
- Kalberer S R, Wisniewski M, Arora R. 2006. Deacclimation and reacclimation of cold-hardy plants: Current understanding and emerging concepts. Plant Science, 171: 3 - 16.
- Lindstrom O M, Anisko T, Dirr M A. 1995. Low-temperature exotherms and cold hardiness in three taxa of deciduous trees. Journal of American Society for Horticultural Science, 120 (5): 830 - 834.
- Mao Cai-liang, Holubowicz T. 1995. Deep supercooling and cold hardiness of chokeberry shoots. Journal of Plant Resources and Environment, 4 (4): 28 - 32. (in Chinese)
- 毛才良, 霍洛博维茨 T. 1995. 黑果腺肋花楸枝条的深超冷与抗寒性. 植物资源与环境, 4 (4): 28 - 32.
- Mills L J, Ferguson J C, Keller M. 2006. Cold-hardiness evaluation of grapevine buds and cane tissues. American Society for Enology and Viticulture, 57 (2): 194 - 200.
- Niu Li-xin, He Pu-chao. 1989. The effect of different calculating units in the electrical conductivity method on the cold hardiness evaluation in *Vitis* L. Journal of Fruit Science, 6 (3): 159 - 164. (in Chinese)
- 牛立新, 贺普超. 1989. 电导法不同计量单位鉴定葡萄抗寒性研究. 果树科学, 6 (3): 159 - 164.
- Pierquet P, Stushnoff C. 1980. Relationship of low temperature exotherms to cold injury in *Vitis riparia* Michx. American Society for Enology and Viticulture, 31 (1): 1 - 6.
- Proebsting E L, Ahmedullah M, Brummund V P. 1980. Seasonal changes in low temperature resistance of grape buds. American Society for Enology and Viticulture, 31 (4): 329 - 336.
- Quamme H A. 1973. An exothermic process involved in the freezing injury to flower buds of several *Prunus* species. Journal of the American Society for Horticultural Science, 99: 315 - 318.
- Sutinen M L, Palta J P, Reich P B. 1992. Seasonal differences in freezing stress resistance of needles of *Pinus nigra* and *Pinus resinosa*: Evaluation of the electrolyte leakage method. Tree Physiology, 11: 241 - 254.
- Tian Jing-hua, Wang Hong-xia, Gao Yi, Zhang Zhi-hua. 2013. Assessment of freezing tolerance of *Juglans* germplasms by using annual dormant branches. Acta Horticulturae Sinica, 40 (6): 1051 - 1060. (in Chinese)
- 田景花, 王红霞, 高 仪, 张志华. 2013. 核桃属植物休眠期的抗寒性鉴定. 园艺学报, 40 (6): 1051 - 1060.
- Volk G M, Waddell J, Towill L. 2009. Variation in low-temperature exotherms of pecan cultivar dormant twigs. HortScience, 44 (2): 317 - 321.
- Vučelić D, Stamatović A, Todorć U. 1972. Baseline interpolation in DTA and DSC quantitative analysis of slow processes. Journal of Thermal Analysis, 4: 479 - 482.
- Wample R L, Reisenauer G, Bary A. 1990. Microcomputer - controlled Freezing, data acquisition and analysis system for cold hardiness evaluation. HortScience, 25 (8): 973 - 976.
- Wolf T K, Cook M K. 1994. Cold hardiness of dormant buds of grape cultivars: Comparison of thermal analysis and field survival. HortScience, 29 (12): 1453 - 1455.
- Zhang Shan-jiang, Kaps M L. 2005. Studies on cold hardiness softwine grape cultivars by Low Temperature Exotherms (LTE) analysis. Journal of Fruit Science, 22 (2): 121 - 124. (in Chinese)
- 张善江, Kaps M L. 2005. 应用低温放热分析测评 8 个酒用葡萄新品种的抗寒性. 果树学报, 22 (2): 121 - 124.