

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.07.002

孙海艳, 陈薇薇, 袁婷, 等. 基于 PLS-DA 探究不同低温贮藏条件对“大五星”枇杷果实香气的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(7): 19-28.

基于 PLS-DA 探究不同低温贮藏条件对“大五星”枇杷果实香气的影响

孙海艳^{1,2}, 陈薇薇³, 袁婷¹, 莫钊宇¹,
李泽冉¹, 张惠明¹, 潘莹芳¹, 向素琼^{1,2},
党江波^{1,2}, 郭启高^{1,2}, 梁国鲁^{1,2}

1. 西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715; 2. 长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715;
3. 河南省作物基因资源与改良国际联合实验室/郑州大学 农学院, 河南 郑州 450001

摘要: 为探究不同贮藏温度对枇杷采后品质的影响, 以红肉枇杷“大五星”为材料, 设置 0℃、8℃及程序降温(Low Temperature Conditioning, LTC)3 种低温处理, 贮藏 35 d, 测定果实硬度、褐变指数, 采用 HS-SPME-GC-MS (Head Space Solid-Phase Microextraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry) 检测香气成分, 结合 PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis) 分析差异香气物质并综合评价品质。结果表明: 21 d 前 3 种处理果实硬度无显著差异, 28 d、35 d 时 0℃处理硬度显著高于 8℃和 LTC 处理, 8℃和 LTC 处理间差异不显著; LTC 处理在 28 d、35 d 时褐变指数显著低于 0℃处理和 8℃处理, 0℃和 8℃间无显著性差异。HS-SPME-GC-MS 共检测到 74 种香气成分, 本研究各贮藏期内共有的成分为 27 种, 主要为醛类、酯类、萜烯类、酮类、芳香族类和其他类, 其中含量最高的为醛类。醛类化合物中 0 d 时己醛含量最高, 为 48.25 μg/kg, 其次是壬醛和反-2-己烯醛, 含量分别为 23.25 μg/kg 和 21.93 μg/kg。酯类挥发性成分总含量次之, 其中 2-甲基丁酸甲酯是 0 d 时含量最高的酯类, 为 84.71 μg/kg; 随着贮藏时间的延长, 各处理酯类总含量不断下降。PLS-DA 统计结果显示, 通过计算变量重要性投影数值得到不同贮藏方式下含量具有显著差异的 7 种香气物质, 分别为: 香叶基丙酮、 α -蒎烯、对伞花烃、壬醛、辛醛、反-2-己烯醛和 2-甲基丁酸甲酯。贮藏到 35 d 时, 0℃处理果实的香叶基丙酮、 α -蒎烯、对伞花烃和壬醛含量较高, LTC 处理则产生较多的对伞花烃、壬醛、辛醛、反-2-己烯醛和 2-甲基丁酸甲酯, 8℃处理的果实仅 2-甲基丁酸甲酯含量较高。结合贮藏期间枇杷的硬度、褐变指数及香气成分种类和含量变化, 程序降温处理在延长贮藏时间后能更好地维持枇杷的采后品质, 表现出较低的褐变程度和较优的香气保留效果。

关键词: 枇杷; 低温贮藏; 香气; 偏最小二乘判别分析

中图分类号: S667.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)07-0019-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2100601); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0044); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU-223002)。

作者简介: 孙海艳, 博士, 助理研究员, 主要从事枇杷果实品质生理及分子生物学研究。

通信作者: 梁国鲁, 博士, 研究员。

Effects of low-temperature storage conditions on aroma compounds of ‘Da wuxing’ loquat fruit based on Partial Least Squares-Discriminant Analysis(PLS-DA)

Sun Haiyan^{1,2}, Chen Weiwei³, Yuan Ting¹, Mo Fangyu¹,
Li Zeran¹, Zhang Huiming¹, Pan Yingfang¹, Xiang Suqiong^{1,2},
Dang Jiangbo^{1,2}, Guo Qigao^{1,2}, Liang Guolu^{1,2}

1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University/Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River (Ministry of Education),
Chongqing 400715, China;

3. Henan International Joint Laboratory of Crop Gene Resources and Improvement, School of Agricultural Sciences,
Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China

Abstract: To investigate the effect of different storage temperatures on the postharvest quality of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl. cv. Dawuxing), red-fleshed ‘Dawuxing’ loquat was used as experimental material, and three low-temperature treatments were set up: 0 °C, 8 °C and Low Temperature Conditioning (LTC). After 35 d of storage, fruit firmness and browning index were measured. Aroma volatiles of loquat were detected by Head Space Solid-Phase Microextraction and Gas Chromatography-Mass Spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Differential aroma compounds were analyzed, and fruit quality was comprehensively evaluated combined with Partial Least Squares-Discriminant Analysis (PLS-DA). The results showed no significant differences in fruit firmness among the three treatments before 21 d of storage. However, at 28 d and 35 d, the firmness of fruits stored at 0 °C was significantly higher than that of fruits stored at 8 °C or LTC treatment, with no significant difference between the latter two. The LTC treatment had a significantly lower browning index at 28 d and 35 d than the other two treatments, with no significant difference observed between the 0 °C and 8 °C treatments. A total of 74 volatile compounds were detected via HS-SPME-GC-MS, and 27 were common in all of the conditions, mainly including aldehydes, esters, terpenes, ketones, aromatic compounds and others. Aldehydes were the most abundant volatile compounds. At 0 d of storage, hexanal was the most abundant aldehyde with a content of 48.25 µg/kg, followed by nonanal and (E)-2-hexenal, with contents of 23.25 µg/kg and 21.93 µg/kg, respectively. The total content of volatile esters ranked second among all categories, and methyl 2-methylbutyrate was the most abundant ester at 0 d with a content of 84.71 µg/kg. As storage time prolonged, the total ester content of all treatments decreased continuously. PLS-DA identified seven key aroma substances with significant differences in content across different storage modes based on variable importance in projection (VIP) scores, namely geranylacetone, α -pinene, p-cymene, nonanal, octanal, (E)-2-hexenal, and methyl 2-methylbutyrate. After 35 d of storage, the 0 °C treatment resulted in higher contents of geranylacetone, α -pinene, p-cymene, and nonanal. The LTC treatment induced higher contents of p-cymene, nonanal, octanal, (E)-2-hexenal, and methyl 2-methylbutyrate. The 8 °C treatment was characterized only by a higher content of methyl 2-methylbutyrate. Based on the changes in fruit firmness, browning index, as

well as the category and content of aroma components during storage, this study concludes that LTC can better maintain the postharvest quality of loquat after prolonged storage, characterized by lower browning degree and superior aroma retention effect.

Key words: loquat; low temperature storage; aroma; PLS-DA

枇杷(*Eriobotrya japonica* Lindl.)成熟于初夏高温多湿季节,果实生理活动旺盛,含水量高、果皮薄,常温下极易腐烂变质。低温能降低采后果实的生理代谢活性,明显抑制呼吸和乙烯释放,同时抑制微生物活性,减少果实腐烂,因此,低温贮藏是采后果蔬贮藏保鲜最通用有效的方法,也是枇杷贮藏保鲜最常用的方法^[1-3]。但是,温度过低时易诱发冷害或冻害,表现为果实木质化加速^[4],伴随果肉质地生硬,粗糙少汁,果皮难剥,并伴有果皮和果肉组织褐变等^[5-6]。

香气是区分一种水果与另一种水果的关键品质指标,也是消费者购买决策的主要驱动因素之一^[7]。香气通常源自植物产生的挥发性化合物,包括酯类、醛类、醇类、内酯类、萜类、碳基化合物及一些含硫化合物等,它们通过累加、协同或抑制作用共同决定果实香气的差异^[8]。果实香气是决定果实品质的重要因素,采后果实中的香气会随贮藏进程发生变化。

“大五星”枇杷是重庆、四川等地的主栽优良枇杷品种。已有学者研究了“大五星”枇杷在采后不同贮藏温度下生理指标的变化^[9-14]。研究发现,8℃是“大五星”枇杷果实适宜的贮藏温度,4℃以下易发生冷害,而程序降温可明显降低贮藏过程中的果实腐烂率,减少水分散失,保持汁液丰富,同时减轻果实褐变程度,口感风味好,并有效延长货架期。低温打破香气物质的动态平衡,使香气组分比例失衡,酯类含量显著下降,整体香气复杂度降低^[15-16]。PLS-DA是一种有监督的多变量统计方法,在代谢组学和食品科学研究中被广泛用于高维数据的降维、分类以及关键差异标记物的筛选^[17-18]。因此,本研究以主栽枇杷品种“大五星”为材料,探索低温冷害、最适温度及程序降温贮藏条件下果实随贮藏时间的延长其香气成分及含量的动态变化,并基于 PLS-DA 统计方法确定 3 种不同低温贮藏方式下有显著贡献的香气物质,以期枇杷采后果实香气变化的相关研究提供参考,为提升果品贮藏品质提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

“大五星”枇杷采自西南大学合川农场渭沱实验基地,当天运回实验室,挑选大小相对均匀,成熟度基本相同,无病虫害、机械伤的果实,经预冷后设置 3 个处理。① 0℃处理:直接置于(0±0.5)℃环境中贮藏;② 8℃处理:直接置于(8±0.5)℃环境中贮藏;③ 程序降温(LTC):果实在 5℃下处理 6 d 后转到(0±0.5)℃贮藏。相对湿度 90%~95%。果实用聚乙烯(PE)薄膜包装后装入塑料筐中,薄膜上打直径 1 mm 圆孔,不扎袋口,每袋 30 个。试验采用完全随机设计,设 3 个生物学重复,每重复 10 个果实,分别于 0 d、7 d、14 d、21 d、28 d、35 d 取样。

1.2 方法

1.2.1 果肉硬度测定和褐变指数统计及计算

硬度测定采用 TA-XT plus 型质构分析仪(Stable Micro Systems, UK),采用 PS 探头(直径 5 mm)。参考徐倩^[19]的方法:测定深度 4 mm,测前速度 3 mm/s,测定速度 1 mm/s,测后速度 10 mm/s。每个果实赤道面(去除小块果皮)测定两次,间隔 90°,以单个果实 2 次测定数值的平均值作为一个重复,单果重复 10 次。单位用牛顿(N)表示。

褐变指数的统计和计算参考 Cai 等^[20]的方法,果皮褐变按褐变面积分为 5 级。0 级:无褐变;1 级:褐变面积<5%;2 级:褐变面积 5%~25%;3 级:褐变面积 25%~50%;4 级:褐变面积>50%。

$$\text{褐变指数} = \Sigma[(\text{褐变级别}) \times (\text{各级别中褐变个数})] / (4 \times \text{检查果实个数}) \quad (1)$$

1.2.2 果实挥发性成分测定

果实香气成分采用顶空固相微萃取技术(HS-SPME)和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)进行测定。称取 5 g 枇杷果实冷冻样品,加液氮磨成粉末,放入 20 mL 顶空萃取瓶中,加入 5 mL 饱和氯化钠溶液和壬酸乙酯(内标),封口后混匀,置于 AOC-5000 自动进样萃取装置的萃取盘,顶空萃取 30 min 后进入 GC-MS(岛津 QP2010 气相色谱-质谱联用仪,日本)系统检测。HS-SPME 针头为 65 μm PDMS/DVB (Sigma 公司,美国),设置色谱条件。色谱柱:Rtx-5MS(30 m $\times$ 0.25 μm $\times$ 0.25 mm);升温程序:初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 150 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 220 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,最后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 240 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min;载气为氦气,流速 1 mL/min,恒线速率,不分流进样。MS 条件:离子源为电子电离源,离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$,接口温度 240 $^{\circ}\text{C}$,电子能量 70 eV,扫描范围 35~350 m/z。

$$\text{香气成分含量}(\mu\text{g}/\text{kg}) = \text{组分峰面积} / \text{内标峰面积} \times \text{内标浓度}(\mu\text{g}/\mu\text{L}) \times \text{内标体积}(\mu\text{L}) / \text{样品质量}(\text{kg}) \quad (2)$$

1.2.3 定性与定量分析

数据分析运用计算机检索并与图谱库(NIST 08)的标准质谱图对照,结合相关文献和保留指数 RI(Retention Index),确认香气物质的化学成分,按内标法算出样品各个组分的含量。偏最小二乘判别分析(PLS-DA)和热图分析利用 Metaboanalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca>)开展,并计算变量重要性投影值(VIP),采用 SPSS 18.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 枇杷果实采后不同温度处理对硬度和褐变指数的影响

“大五星”枇杷采后 3 种处理条件下的果实硬度和褐变指数见图 1。21 d 时,3 种贮藏方式果实硬度变化差异不显著;28 d 和 35 d 时,0 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实的硬度显著高于 8 $^{\circ}\text{C}$ 和 LTC 处理,8 $^{\circ}\text{C}$ 与 LTC 处理间差异不显著。其中,35 d 时果实的硬度比贮藏前(0 d)增加 28%。

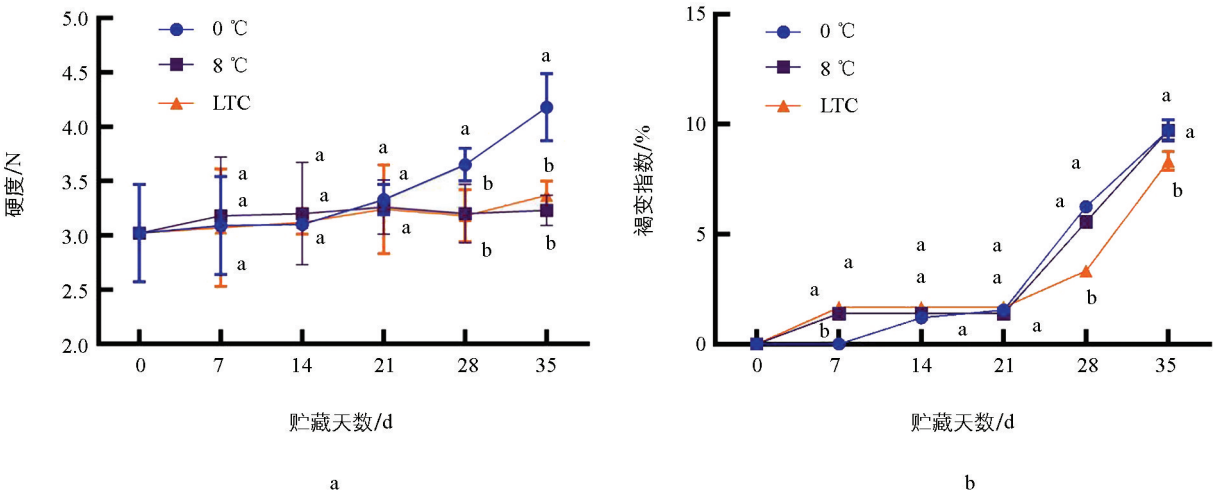
3 种贮藏条件下褐变起始时间不同:8 $^{\circ}\text{C}$ 和 LTC 处理在 7 d 时已有褐变发生,而 0 $^{\circ}\text{C}$ 处理 7 d 后才出现(图 1);14 d、21 d 时,3 种贮藏方式的褐变指数差异不显著,但 21 d 后,褐变指数上升趋势则明显增强;28 d 和 35 d 时,0 $^{\circ}\text{C}$ 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理的褐变指数显著高于 LTC 处理,0 $^{\circ}\text{C}$ 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理两者间差异不显著。

综合来看,贮藏时间延长到 28 d 和 35 d 时,LTC 处理对减缓果实硬度增加和降低果实褐变效果较好。

2.2 枇杷果实采后不同低温贮藏处理对挥发性成分的影响

2.2.1 采后不同贮藏温度处理对总香气成分的影响

采用 HS-SPME-GC-MS 分析 3 种贮藏温度下枇杷果肉的香气成分,共检测到 74 种成分,包括醛类 15 种、醇类 10 种、萜烯类 18 种、酯类 10 种、酮类 8 种、酸类 1 种、芳香族类 8 种和其他类 4 种。本研究各贮藏期内共有的成分为 27 种。包括 9 种醛类:分别是己醛、反-2-己烯醛、正庚醛、辛醛、壬醛、反-2-壬烯醛、癸醛、 β -环柠檬醛、 β -环高柠檬醛;3 种酯类:2-甲基丁酸甲酯、丁酸辛酯、邻苯二甲酸二乙酯;5 种酮类:3-辛酮、苄酮、香叶基丙酮、 β -紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯;3 种萜烯:对伞花烃、 α -蒎烯、 γ -松油烯;4 种芳香类:1-甲基乙基苯、1-乙基-2-甲基苯、1,2,3-三甲苯、1,2,3,5-四甲苯;3 种其他成分:萘、麝香草酚以及甲氧基-苯酚。醛类是总含量最高的物质,0 d 时为 115.69 $\mu\text{g}/\text{kg}$;在整个贮藏过程中,8 $^{\circ}\text{C}$ 和 0 $^{\circ}\text{C}$ 两个处理下醛类总含量总体上呈下降趋势,8 $^{\circ}\text{C}$ 处理下在 35 d 时最低,为 54.32 $\mu\text{g}/\text{kg}$,而 0 $^{\circ}\text{C}$ 处理在 14 d 时最低,为 36.20 $\mu\text{g}/\text{kg}$;LTC 处理的总含量则为先下降后上升的趋势,到 35 d 时达到 130.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。酯类的总含量仅次于醛类,在 0 d 时为 96.96 $\mu\text{g}/\text{kg}$,3 种贮藏方式下总含量均



相同天数不同处理之间小写字母不同表示差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同温度处理对枇杷果实硬度(a)和褐变指数(b)的影响

不断减少。萜烯类的总含量在 0 d 时为 22.20 $\mu\text{g/kg}$, 3 个处理含量均不断降低, 其中萜草烯、 γ -衣兰油烯和 δ -杜松烯仅在 0 d 中检测到。酮类的总含量在 8 °C 处理下不断降低, 到 35 d 时下降了 62.5%, 为 3.37 $\mu\text{g/kg}$; 在 LTC 和 0 °C 处理下则不断增加, 为 15.44 $\mu\text{g/kg}$ 和 20.21 $\mu\text{g/kg}$ 。仅检测到一种酸类, 即 2-甲基丁酸, 含量总体呈下降趋势。共检测到 10 种醇类, 贮藏期间含量均不断增加, 但在 28 d 和 35 d 时, LTC 和 0 °C 处理的总含量明显高于 8 °C 处理。芳香族类物质的总含量则整体上呈上升变化(图 2)。

从贮藏期内香气成分总含量变化可知, 8 °C 处理在 14 d 时总含量最高, 之后不断降低, 在 35 d 时最低; 而 LTC 和 0 °C 处理的总含量在 35 d 最高, 但仍低于 0 d 时的总含量, 表明低温贮藏导致香气总含量减少。

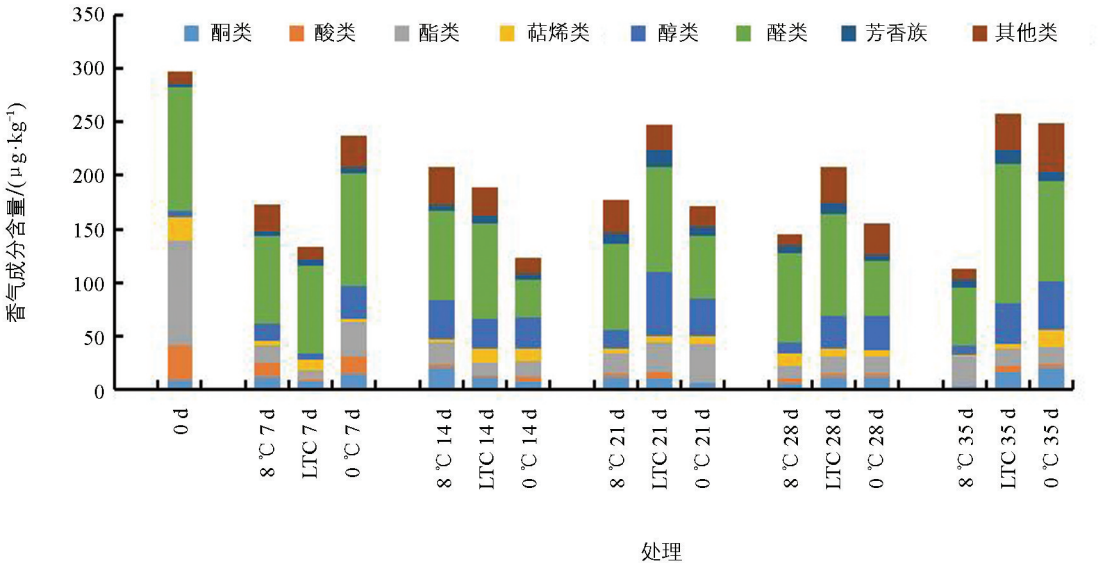


图 2 3 种贮藏方式下香气成分总含量变化

2.2.2 采后不同贮藏温度处理对不同种类重要香气成分的影响

将 3 种贮藏方式下采收当天及采收贮藏期间检测出的 24 种共有芳香物质(萘、麝香草酚、甲氧基-苯酚除外)绘制为热图并进行聚类分析(图 3)。结果显示, I 类中主要是醛类和酯类, 壬醛和辛醛是 0 d 时含量较高的脂肪族醛类, 分别为 23.25 $\mu\text{g/kg}$ 和 7.48 $\mu\text{g/kg}$, C7-C12 的脂肪族醛类是醛香型化合物的重要代

表。壬醛在 0 ℃ 和 LTC 处理下含量总体呈上升的趋势, 8 ℃ 处理下含量则不断降低, 35 d 时, 0 ℃ 和 LTC 处理间差异不显著, 但均显著高于 8 ℃ 处理。辛醛在 3 种贮藏方式下呈下降趋势, 在 35 d 时, 0 ℃ 和 LTC 处理间差异不显著, 但 LTC 显著高于 8 ℃ 处理; 癸醛在 3 种贮藏方式下含量变化无显著差异, 0 ℃ 和 LTC 处理间差异也不显著, 但两者均显著高于 8 ℃ 处理。0 d 时正己醛含量最高, 为 48.25 μg/kg, 正己醛在 0 ℃ 处理下总体上呈下降趋势, 在 LTC 处理下呈先下降后上升趋势, 8 ℃ 处理下呈现先下降后上升又下降的规律, 35 d 时 LTC 处理的含量显著高于 0 ℃ 和 8 ℃ 处理。反-2-己烯醛在 3 种贮藏方式下均表现为下降趋势, 但 35 d 时 LTC 显著高于其他两种处理。反-2-壬烯醛在 8 ℃ 处理下先升高后下降, 在 0 ℃ 和 LTC 处理下则呈升高的趋势, 35 d 时 LTC 显著高于 8 ℃ 处理。2-甲基丁酸甲酯是 0 d 时含量最高的酯类, 含量为 84.71 μg/kg, 占 0 d 时总香气的 87.4%, 贮藏 35 d 后显著降低; 0 ℃、8 ℃ 和 LTC 处理后分别为 2.89、5.23 和 5.10 μg/kg, 8 ℃ 和 LTC 处理间无显著差异, 但均显著高于 0 ℃ 处理。0 d 时含量次之的酯为邻苯二甲酸二乙酯, 为 9.53 μg/kg, 具有微弱的芳香气味, 是香蕉、成熟木瓜中的一种香气成分。

II 类中主要是脱辅基类胡萝卜素类香气物质, 其中香叶基丙酮、β-紫罗兰酮和二氢猕猴桃内酯属于低阈值香气物质, 35 d 时, LTC 和 0 ℃ 处理的二氢猕猴桃内酯显著高于 8 ℃ 处理。香叶基丙酮的阈值为 60 nL/L, 具有木兰、青草和花香, 35 d 时, 8 ℃、LTC 和 0 ℃ 处理分别为 0.28、0.98 和 2.56 μg/kg, 0 ℃ 处理显著高于其他两种处理。β-紫罗兰酮带有紫罗兰木本和浆果的特有香气, 在水中的阈值为 0.007 μg/kg, 0 d 时 β-紫罗兰酮的含量为 2.53 μg/kg, 占酮类香气总含量的 28.1%; 35 d 时, 8 ℃、LTC 和 0 ℃ 中的含量分别为 1.16、7.19 和 11.11 μg/kg, 分别占总酮类的 34.4%、46.6% 和 55.0%, 3 个处理间差异达显著水平。β-环柠檬醛赋予新鲜枇杷甘草气味。

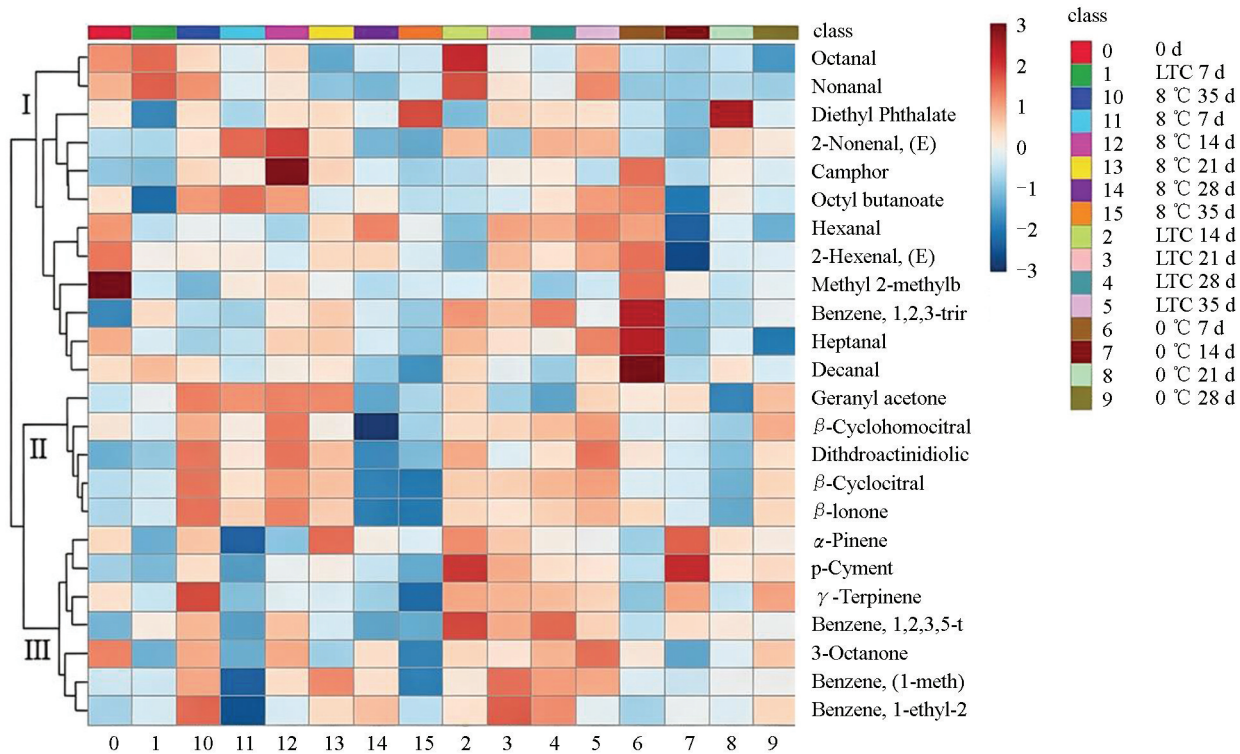


图 3 采后贮藏果实共有香气成分含量热图聚类分析

III 类中主要是萜烯类和芳香族类, α-蒎烯、γ-松油烯和对伞花烃属单萜类。α-蒎烯具有松香气味, 油中阈值为 2.08 μg/mg; γ-松油烯的油中阈值为 2.89 μg/mg, 具有草本香气; 对伞花烃具有柑橘香味, 水中阈值为 0.1 μg/mg。0 d 时对伞花烃、α-蒎烯、γ-松油烯的含量分别为 0.16、0.22 和 1.89 μg/kg; 对伞花烃和 γ-松油烯在 8 ℃ 处理下无显著差异, 在 0 ℃ 和 LTC 处理下则呈上升趋势; α-蒎烯在 0 ℃ 和 LTC 处理下

14 d 时含量最高, 分别为 0.45 和 0.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 而 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理在 21 d 时最高, 为 0.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。 α -蒎烯、 γ -松油烯和对伞花烃等单萜类是宽皮柑橘、柚子和晚熟甜橙精油中的主要香气成分。

2.2.3 芳香物质 PLS-DA 分析和 VIP 值分析

偏最小二乘判别分析(PLS-DA)是一种多变量统计方法, 可以有效区分组间差异。为了从整体上评判不同贮藏温度下枇杷果实香气的差异, 以不同贮藏温度和时间下的共有香气物质及 0 d 含量为变量, 对数据归一化处理后进行 PLS-DA 分析, 置换检验结果通过了验证, 表明构建的 PLS-DA 模型结果可靠。PLS-DA 模型的前 3 个成了解释了 60.1% 的香气差异(图 4)。该模型可以较好区分相同贮藏时间下不同贮藏温度的枇杷果实样品。

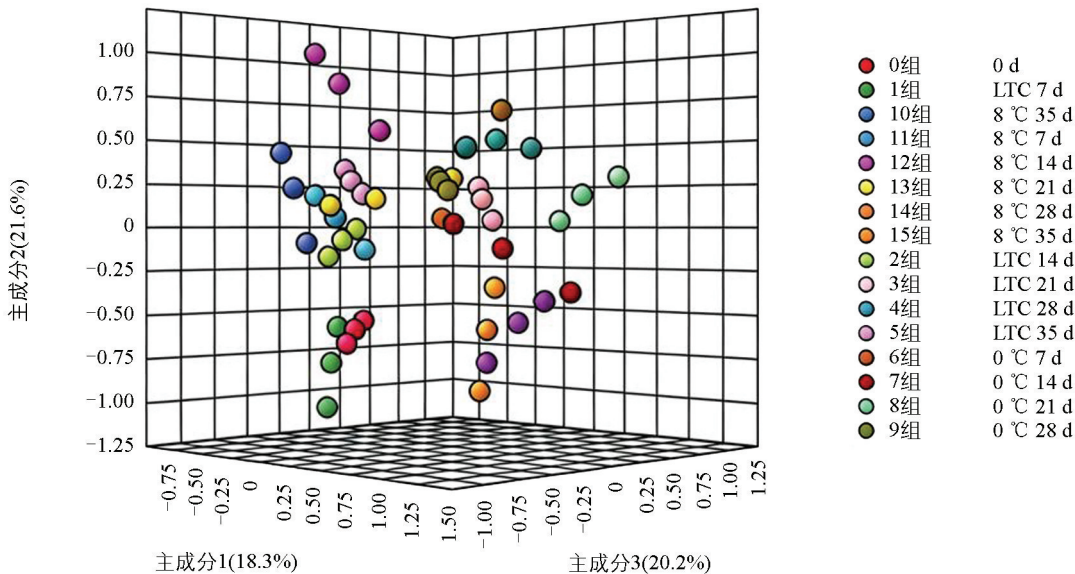


图 4 枇杷果实芳香物质的 PLS-DA 分析

变量重要性投影(VIP)主要用于说明自变量在解释因变量时的权重, 通常 VIP 大于 1 的物质表示在 PLS-DA 判别过程中为重要差异化合物, 这些物质被认为在模型解释中具有显著贡献。本研究中 VIP 大于 1 的香气物质有 7 种(图 5), 分别是对伞花烃、香叶基丙酮、辛醛、 α -蒎烯、壬醛、反-2-己烯醛和 2-甲基丁酸甲酯。贮藏 14 d、21 d、28 d、35 d 时, LTC 处理对伞花烃的含量均显著高于 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理, 其中 14 d、28 d、35 d 时 LTC 和 0 $^{\circ}\text{C}$ 处理间差异不显著。贮藏 7 d、14 d、28 d 时, LTC 处理的壬醛含量显著高于其他两处理; 35 d 时, LTC 与 0 $^{\circ}\text{C}$ 间差异不显著, 但均显著高于 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理。35 d 时, 0 $^{\circ}\text{C}$ 处理的香叶基丙酮、 α -蒎烯、对伞花烃和壬醛含量较高, LTC 处理中关键差异物质为对伞花烃、壬醛、辛醛、反-2-己烯醛和 2-甲基丁酸甲酯, 其中醛类物质种类多且含量较高, 对枇杷清香属性贡献显著。8 $^{\circ}\text{C}$ 处理仅 2-甲基丁酸甲酯含量较高。

3 讨论与结论

适宜低温是果实采后长期贮藏最主要的技术措施, 可有效延长贮藏期。本研究结果显示, 0 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏 7 d 后才出现褐变, 而 8 $^{\circ}\text{C}$ 和 LTC 处理在 7 d 时已有褐变, 这些现象表明, 低温贮藏可降低果实褐变发生率, 提高好果率, 但会诱发冷害。与 0 $^{\circ}\text{C}$ 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 相比, LTC 贮藏可减缓果实硬度增加和褐变指数上升, 表明 LTC 处理能有效减轻木质化症状, 减缓冷害症状, 较好地保持果实品质, 这与相关研究结果基本一致^[11, 20-21]。

本研究基于 PLS-DA 的多元统计分析获得 7 种重要差异香气物质, 分别是对伞花烃、香叶基丙酮、辛醛、 α -蒎烯、壬醛、反-2-己烯醛和 2-甲基丁酸甲酯。其中 8 $^{\circ}\text{C}$ 处理组的反-2-己烯醛含量呈下降趋势。王毓

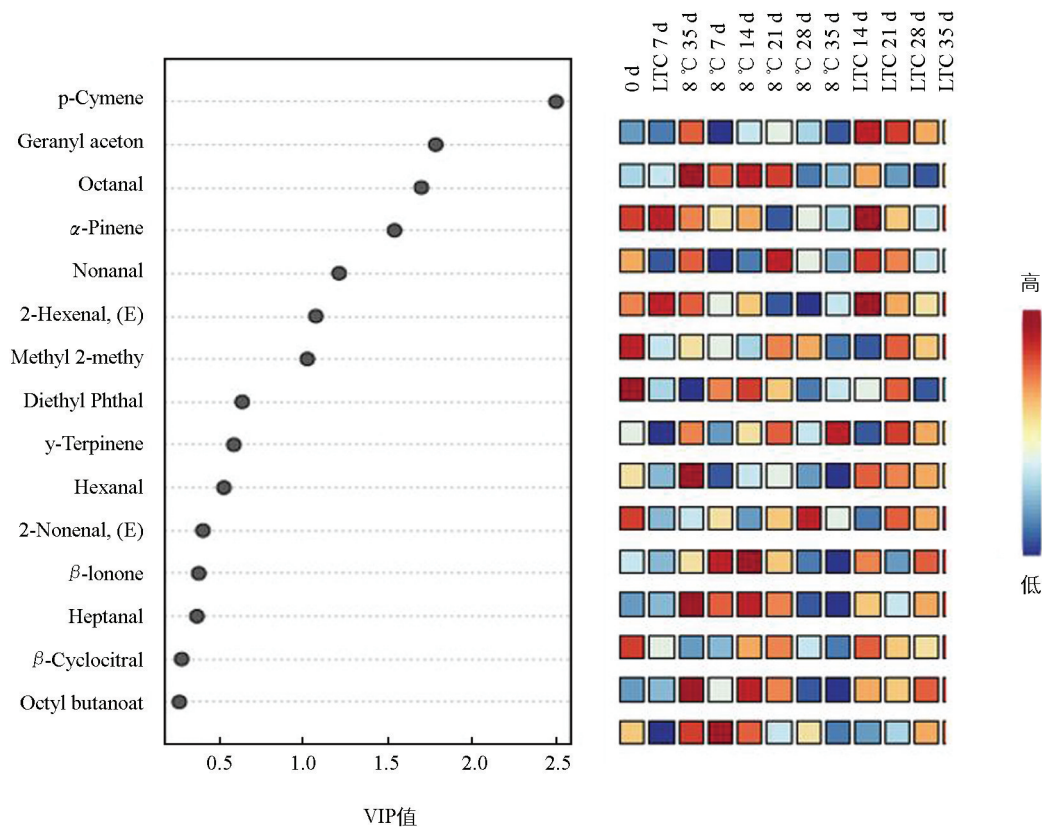


图 5 不同低温处理下枇杷果实香气物质的 VIP 数值

宁等^[22]报道,随着贮藏时间延长,(6±0.5)℃贮藏的“冠玉”枇杷中反-2-己烯醛逐渐增加,与本研究结果相反,可能源于品种差异。壬醛赋予水果果香和柑橘香,本研究中0 d时壬醛占醛类总含量的20%。袁婷等^[23]对7个白肉品种枇杷和15个红肉品种枇杷成熟果实的研究表明,壬醛是对果肉风味贡献率最高的挥发性物质,与本研究结论一致。2-甲基丁酸甲酯是0 d时含量最高的酯,付婷婷^[12]报道0 d时含量最高的酯为油酸甲酯,贮藏中均能检测到棕榈酸甲酯,与本研究结果不太一致。袁婷等^[23]在成熟的“大五星”果实中也检测到了2-甲基丁酸甲酯。付婷婷^[12]采用同时蒸馏萃取法提取“大五星”样品,而本研究和袁婷等^[23]采用的是顶空固相微萃取法,差异可能源于萃取方法的不同。王毓宁等^[22]的研究表明,2-甲基丁酸甲酯是“冠玉”枇杷的特征挥发性物质,含量在贮藏中逐渐降低。2-甲基丁酸甲酯具有新鲜水果香味,在“Algerie”枇杷发育过程中被检测到,含量随果实成熟不断增加,但在“Golden”枇杷中却未被检测出^[24]。蒋际谋等^[25]在“香甜”和“钟香25号”两个枇杷品种中检测到了2-甲基丁酸甲酯,但在“解放钟”和“香钟11号”枇杷中却未发现,而Sun等^[26]在“香钟11号”枇杷中检测到了该物质;这些研究表明,香气物质的生物合成受到遗传、成熟阶段、采后贮藏以及生长环境等因素影响^[27-28]。

PLS-DA作为一种有监督的多元统计降维与判别方法,在香气的客观评价中被广泛应用^[29-31],可衡量变量对分组区分的贡献度。徐慧等^[29]依据检测的挥发性成分构建PLS-DA模型,将3种野生牡丹分类,筛选得到15种差异性成分。通过建立的PLS-DA模型,张映萍等^[30]从草果、艳山姜、草豆蔻3种姜科植物果实中筛选出21种VIP>1的关键挥发性香气成分。张鹏等^[31]通过“梨香”菊花挥发物的PLS-DA模型,利用VIP值和P值筛选得到24种重要差异性成分,对区分不同开花阶段/时间点下“梨香”菊花挥发物具有重要作用。研究表明“大五星”枇杷果实在4℃下贮藏时,随着贮藏期的延长,会诱发冷害发生,出现木质化败坏^[9],8℃是“大五星”枇杷较适宜的贮藏温度,贮藏期为20 d左右^[9]。程序降温过程中,因果实逐渐适应低温的冷锻炼^[32],减轻了低温对细胞膜、细胞壁的伤害程度^[26],最终减缓果皮

的褐变程度^[32-33], 从而保持较好的贮藏品质。本研究中, 35 d 时, LTC 处理包含较多 VIP>1 的重要差异香气物质, 0 ℃处理次之, 8 ℃处理仅 2-甲基丁酸甲酯含量较高。郑现容^[34]的研究表明, 梯度预冷处理下关键风味物质(ROAV>1)有 7 种: 2-戊基呋喃、2-乙基己醇、2-壬烯醛、庚醛、2-十一烷、异戊醇、2-辛烯醛, 而直接预冷处理下仅为前 4 种, 表明梯度预冷处理可保留更多关键风味物质。此外, LTC 处理一定程度上缓解了冷藏南果梨香气变淡的问题^[35], 蟠桃果实采用一氧化氮结合 LTC 处理可以延缓果实中体现桃成熟芳香风味的酯类物质的下降, 保持贮藏后期芳香风味^[36]; 基于本研究结果, 后续可结合感官评价或 GC-O 试验, 对不同贮藏方式下的果实香气变化情况进行较为全面的评价。本研究结果表明, 3 种低温贮藏条件下, 结合硬度、褐变指数及香气成分的变化, LTC 处理在延长贮藏时间后能更好地维持枇杷的采后品质, 表现出较低的褐变程度和较优的香气保留效果。

参考文献:

[1] Zhang S, Sun H M, Wang J Y, et al. The regulatory mechanisms and control technologies of chilling injury and fungal diseases of postharvest loquat fruit [J]. Plants, 2022, 11(24): 3472.

[2] Shah H M S, Khan A S, Singh Z, et al. Postharvest biology and technology of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) [J]. Foods, 2023, 12(6): 1329.

[3] Huang G L, Liu T T, Mao X M, et al. Insights into the volatile flavor and quality profiles of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) during shelf-life via HS-GC-IMS, E-nose, and E-tongue [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100886.

[4] Wang P, Zhang B, Li X, et al. Ethylene signal transduction elements involved in chilling injury in non-climacteric loquat fruit [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(1): 179-190.

[5] 吴光斌, 陈发河, 张其标, 等. 热激处理对冷藏枇杷果实冷害的生理作用 [J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(2): 1-5.

[6] 郑永华, 李三玉, 席珂芳. 枇杷冷藏过程中果肉木质化与细胞壁物质变化的关系 [J]. 植物生理学报, 2000, 26(4): 306-310.

[7] Sung J, Frost S, Suh J H. Progress in flavor research in food: flavor chemistry in food quality, safety, and sensory properties [J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102071.

[8] Planeta D, Farina V, Bambina P, et al. Analysis of aroma compounds of nine autochthonous and non-autochthonous loquat cultivars grown in Sicily [J]. Italian Journal of Food Science, 2021, 33(4): 33-42.

[9] 秦文, 姚昕, 刘维, 等. 不同贮藏温度对大五星枇杷果实保鲜效果的研究 [J]. 中国南方果树, 2005, 34(5): 21-24.

[10] 秦文, 姚昕, 陈宗道, 等. “大五星”枇杷冷藏过程中采后生理特性的研究 [J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 151-156.

[11] 江国良, 陈栋, 谢红江, 等. 程序降温对大五星枇杷果实贮藏品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2009, 22(3): 750-753.

[12] 付婷婷. “大五星”枇杷采后低温冷害及变温处理效果的研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2011: 38-46.

[13] 付婷婷, 秦文, 张正周. 冷害对采后“大五星”枇杷果实贮藏品质及木质化败坏的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 69-74.

[14] 郑现容, 鲜双, 谢鸿林, 等. 梯度预冷复合低温贮藏对大五星枇杷采后品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(22): 254-260.

[15] Sivankalyani V, Maoz I, Feygenberg O, et al. Chilling stress upregulates α -linolenic acid-oxidation pathway and induces volatiles of C₆ and C₉ aldehydes in mango fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(3): 632-638.

[16] Li X Y, Li G, Wang H J, et al. Characterization of volatile flavor profiles in three peach cultivars during postharvest storage at various temperatures using HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102554.

[17] Zontov Y V, Rodionova O Y, Kucheryavskiy S V, et al. PLS-DA-A MATLAB GUI tool for hard and soft approaches to partial least squares discriminant analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2020, 203: 104064.

[18] Rodionova O Y, Pomerantsev A L. Multiclass partial least squares discriminant analysis: taking new ways: a perspective [J]. Journal of Chemometrics, 2025, 39(11): e70078.

- [19] 徐倩. 枇杷果实木质化的 MYB 转录调控 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 20.
- [20] Cai C, Xu C J, Shan L L, et al. Low temperature conditioning reduces postharvest chilling injury in loquat fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 41(3): 252-259.
- [21] 金鹏, 吕慕雯, 孙萃萃, 等. MeJA 与低温预贮对枇杷冷害和活性氧代谢的影响 [J]. *园艺学报*, 2012, 39(3): 461-468.
- [22] 王毓宁, 马佳佳, 张鹏, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 与电子舌分析冷藏冠玉枇杷的风味特性 [J]. *包装工程*, 2020, 41(23): 11-18.
- [23] 袁婷, 陈薇薇, 孙海艳, 等. 不同果肉类型枇杷果肉挥发性成分分析 [J]. *食品科学*, 2018, 39(24): 209-217.
- [24] Besada C, Salvador A, Sdiri S, et al. A combination of physiological and chemometrics analyses reveals the main associations between quality and ripening traits and volatiles in two loquat cultivars [J]. *Metabolomics*, 2013, 9(2): 324-336.
- [25] 蒋际谋, 胡文舜, 许奇志, 等. 枇杷品种香甜和解放钟及两者杂交子代优系果实香气成分分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(4): 894-900.
- [26] Sun H Y, Chen W W, Jiang Y, et al. Characterization of volatiles in red-and white-fleshed loquat (*Eriobotrya japonica*) fruits by electronic nose and headspace solid-phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Science and Technology*, 2020, 40(suppl 1): 21-32.
- [27] 席万鹏. 桃果实香气物质生物合成研究进展 [J]. *园艺学报*, 2013, 40(9): 1679-1690.
- [28] 李怡诺. 不同产区枇杷果实品质研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023: 41-46.
- [29] 徐慧, 姚霞珍, 佟珂珂, 等. 3 种牡丹花器官不同部位挥发性成分分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(3): 63-69.
- [30] 张映萍, 何江斌, 黄梅, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 PLS-DA 分析三种姜科植物果实挥发性香气成分 [J]. *天然产物研究与开发*, 2024, 36(8): 1368-1377.
- [31] 张鹏. ‘梨香’菊花香成分鉴定及香气特征分析 [J]. *园艺学报*, 2026, 53(2): 496-512.
- [32] 常文俊, 阎宁, 沈丸钧, 等. 程序降温处理对黄皮果实贮藏品质和采后生理的影响 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(6): 1181-1187.
- [33] 常文俊. 热处理和程序降温处理对黄皮果实贮藏效果及 *HSPs* 基因表达的影响 [D]. 海口: 海南大学, 2019: 24-28.
- [34] 郑现容. 梯度预冷及 CMCS/TP 浸涂结合低温处理对大五星枇杷贮藏品质的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2024: 53-60.
- [35] 石飞. 基于转录组和 miRNA 测序的冷藏南果梨香气变淡机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 86-95.
- [36] 宋方圆. NO 协同程序降温调控蟠桃香气物质代谢的机理研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2024: 76-77.

责任编辑 王新娟